

GUSTAVO BORGES FEITOSA

**RELAÇÃO ENTRE OS PREÇOS DO PETRÓLEO E DA ENERGIA
ELÉTRICA NO BRASIL**

**Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção
do diploma de Engenharia de Petróleo.**

SANTOS

2021

GUSTAVO BORGES FEITOSA

**RELAÇÃO ENTRE OS PREÇOS DO PETRÓLEO E DA ENERGIA
ELÉTRICA NO BRASIL**

**Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção
do diploma de Engenharia de Petróleo.**

**Área de concentração: Engenharia de
Petróleo**

**Orientador: Profª Dra. Regina Meyer
Branski**

SANTOS

2021

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catálogo-na-publicação

Feitosa, Gustavo

Relação entre o preço do petróleo e da energia elétrica no Brasil / G.
Feitosa -- São Paulo, 2021.
62 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São
Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo.

1.Preço do petróleo 2.Preço da energia elétrica 3.Correlação Cruzada
4.Causalidade de Granger 5.Brasil I.Universidade de São Paulo. Escola
Politécnica. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo II.t.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus por ter me abençoado com o ensino que tive ao longo desses anos e pelas oportunidades que me foram abertas. Agradeço aos meus pais e meus avós por sempre me apoiarem nos meus estudos. Agradeço aos professores do Colégio Agostiniano São José, no qual fui bolsista, por todo conhecimento transmitido no ensino fundamental e médio. Agradeço aos professores da Escola Politécnica por me moldarem ao longo desses anos e, principalmente, a minha orientadora, Regina Meyer Branski, por me orientar nesse trabalho de conclusão de curso. Por fim, agradeço aos meus amigos de faculdade por todo suporte e companheirismo nos momentos mais difíceis nos últimos anos.

RESUMO

O petróleo ocupa um papel importante na matriz energética mundial. No Brasil, o cenário é semelhante, tendo o petróleo como a principal fonte de energia, porém a parcelas de biomassa e hidráulica são significativas em sua matriz. Diante da intensificação das mudanças climáticas, as nações vêm buscando fontes mais limpas de geração de energia. A produção de veículos elétricos, que emitem uma baixa quantidade de gases poluentes para o meio ambiente, estão substituindo a utilização de combustíveis fósseis por energia elétrica, tornando-se uma alternativa para o futuro. Como o preço do barril de petróleo impacta diretamente na gasolina e seus derivados e a energia elétrica tende a ser mais utilizada como uma via menos poluente, nota-se uma necessidade para entender influência que os preços possuem entre si. Com isso, o objetivo do trabalho é identificar padrões e relações entre o preço médio mensal do petróleo Brent e da energia elétrica no Brasil entre os anos de 2011 e 2021. Após o levantamento dos dados foram aplicados os seguintes testes estatísticos: Correlação Cruzada e Causalidade de Granger. O primeiro observa se há uma relação de força e direção entre os preços ao longo do tempo. Já o segundo teste mostra se um preço pode interferir no futuro de outro de alguma maneira. A Correlação Cruzada indicou existir direção negativa e força moderada entre os preços. Já a Causalidade de Granger indicou que não há causalidade no sentido de Granger entre o preço do petróleo e o preço da energia elétrica, nem entre o preço da energia elétrica e o do petróleo.

Palavras-chave: Petróleo Brent, Energia elétrica, Preço, Correlação Cruzada, Causalidade de Granger, Brasil

ABSTRACT

Oil plays an important role in the world's energy matrix. In Brazil, the scenario is similar, with oil as the main source of energy, but biomass and hydraulic portions are significant in its matrix. Faced with the intensification of climate change, nations have been looking for cleaner sources of energy generation. The production of electric vehicles, which emit a low amount of polluting gases into the environment, are replacing the use of fossil fuels with electricity, becoming an alternative for the future. As the price of a barrel of oil directly impacts gasoline and its derivatives and electricity tends to be used more as a less polluting route, there is a need to understand the influence that prices have on each other. Thus, the objective of the work is to identify patterns and relationships between the monthly average price of Brent oil and electricity in Brazil between the years 2011 and 2021. After collecting the data, the following statistical tests were applied: Cross Correlation and Causality of Granger. The first looks at whether there is a relationship of strength and direction between prices over time. The second test shows whether one price can interfere in the future of another in any way. The Cross Correlation indicated that there is a negative direction and moderate strength between prices. Granger's Causality, on the other hand, indicated that there is no causality in Granger's sense between the price of oil and the price of electricity, nor between the price of electricity and that of oil.

Keywords: Brent Oil, electric energy, price, Cross Correlation, Granger Causality, Brazil

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Matriz energética mundial 2018	5
Figura 2 - Matriz energética brasileira	6
Figura 3 - Fluxograma dos cálculos para o <i>Dated Brent</i>	9
Figura 4 – Comparação entre o preço do barril Brent e WTI.....	10
Figura 5 - Matriz elétrica mundial	12
Figura 6 - Matriz energética brasileira	13
Figura 7 – Evolução da matriz energética brasileira desde 1990 até 2020	14
Figura 8 - Fluxograma dos recursos das TUST e TUSD	16
Figura 9 - Composição tarifária média do Brasil.....	17
Figura 10 – Etapas desenvolvidas	21
Figura 11 - Comparação Preço da Energia elétrica e do Petróleo Brent (R\$/kWh)...	26
Figura 12 – Coeficiente de Correlação Cruzada pela defasagem	27
Figura 13 - Taxa de variação dos preços do petróleo Brent.....	28
Figura 14 - Taxa de variação dos preços da energia elétrica.....	29

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Critérios de correlação	23
Tabela 2 - Preços Anuais Médios da Energia Elétrica, do Petróleo Brent e IGP-M (2011 a 2021).....	24
Tabela 3 - Média anual dos preços do petróleo Brent e da energia elétrica convertidos	25
Tabela 4 - Preço Anual Médio do Brent e da Energia Elétrica deflacionados pelo IGP-M (mês base junho de 2021)	25
Tabela 5 - Coeficientes de correlação cruzada entre os preços do petróleo Brent e da energia elétrica	27
Tabela 6 – Valores críticos de Dickey-Fuller	30
Tabela 7 – Valores t do preço do petróleo e da energia elétrica	30
Tabela 8 - Valor-p: Preço do petróleo Brent causa preço energia elétrica	32
Tabela 9 - Valor-p: Preço da energia elétrica causa preço do petróleo Brent	32
Tabela 10 – Cronograma de progresso.....	39
Tabela 11 - Base de dados do preço do petróleo Brent	40
Tabela 12 - Base de dados do preço da energia elétrica	43

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVO.....	3
2.1	Organização do trabalho	3
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1	Panorama geral do Petróleo no mundo e no Brasil	4
3.2	Panorama econômico do Petróleo	6
3.2.1	Preço do barril de petróleo Brent	7
3.2.2	Preço do barril de petróleo WTI	9
3.2.3	Comparação entre o preço do Brent e do WTI (2000 – 2021)	10
3.3	Energia Elétrica no Brasil e no mundo.....	10
3.3.1	Composição da tarifa da energia elétrica	14
3.4	Métodos estatísticos.....	17
3.4.1	Teste de Correlação Cruzada.....	17
3.4.2	Teste de Causalidade de Granger.....	19
4	METODOLOGIA.....	21
5	RESULTADOS	24
5.1	Preços do petróleo e da energia elétrica	24
5.2	Teste de Correlação Cruzada.....	26
5.3	Teste de Causalidade de Granger.....	28
5.3.1	Teste de Dickey-Fuller aumentado	28
5.3.2	Teste de Causalidade de Granger.....	31
6	CONCLUSÃO.....	34
	REFERÊNCIAS.....	35
	APÊNDICE A - CRONOGRAMA DO TRABALHO	39
	APÊNDICE B - BASE DE DADOS	40

ANEXO A – ARTIGO SÍNTESE.....	46
--------------------------------------	-----------

1 INTRODUÇÃO

O petróleo é a fonte de energia predominante na atualidade e, desde os primórdios da história moderna, assume um papel fundamental na produção de combustíveis, tais como diesel e gasolina. Devido ao crescimento da demanda ao longo dos séculos, o petróleo se mostrou um recurso estratégico para as nações, trazendo influência e poder para aqueles que o possuem. Muitos conflitos e guerras ao longo da história foram causados por ser tão cobiçado e pela dependência mundial por esse bem mineral.

A dependência excessiva mundial de petróleo para o fornecimento de energia fez com que estudos buscassem a geração de novas fontes de energia alternativas, renováveis e mais baratas. Além disso, em 2016, as potências mundiais assinaram o Acordo de Paris para reduzir a emissão de gases de efeito estufa e o aquecimento global. Assim, tem ocorrido um esforço por parte dos governos e das empresas em busca de menor dependência das energias não-renováveis e maior utilização das energias renováveis. Veículos movidos a energia elétrica são um exemplo, pois reduzem a importância do petróleo utilizando fontes menos poluentes para o meio ambiente.

O Brasil, por conta das descobertas do pré-sal em 2006, tornou-se o sétimo maior produtor de petróleo do mundo (PETROBRAS, 2018), e vem aumentando ainda mais sua produção. Ao mesmo tempo, tem grande potencial para geração de energias renováveis como hidroelétrica, solar e eólica (SANTOS, 2021). Como outros países do mundo, o Brasil deve se adaptar a um novo padrão global, reduzindo o uso de combustíveis fósseis e causando menor impacto ao meio ambiente.

O petróleo é uma *commodity* e seu preço é determinado pela oferta e demanda por óleo no mercado mundial. Ou seja, o preço do barril de petróleo é dado pela combinação entre aqueles que desejam vender e aqueles que desejam comprar. Além disso, depende também de fatores geográficos e políticos. O West Texas Intermediate (WTI) e Brent Crude (Brent) são as duas principais classificações comerciais de óleo bruto. Estima-se que 60% do petróleo mundial é cotado em termos do petróleo Brent e são explorados de reservas offshore (REIS, 2018).

Muitas empresas do setor de petróleo – como Petrobras, ExxonMobil, BP e Equinor – estão investindo no mercado de energias renováveis (RIO OIL AND GÁS, 2020). Assim, recursos provenientes da exploração e produção do petróleo devem financiar, pelo menos em parte, a transição mundial para as novas energias.

2 OBJETIVO

O objetivo do trabalho é identificar padrões e relações entre o preço mensal médio do petróleo Brent e da energia elétrica no Brasil nos últimos 10 anos por meio de testes estatísticos.

2.1 Organização do trabalho

O trabalho foi organizado da seguinte forma: revisão bibliográfica abordando preço do petróleo e da energia elétrica, apresentação dos testes estatísticos utilizados, elaboração da metodologia utilizada e, finalmente, os resultados e principais conclusões.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

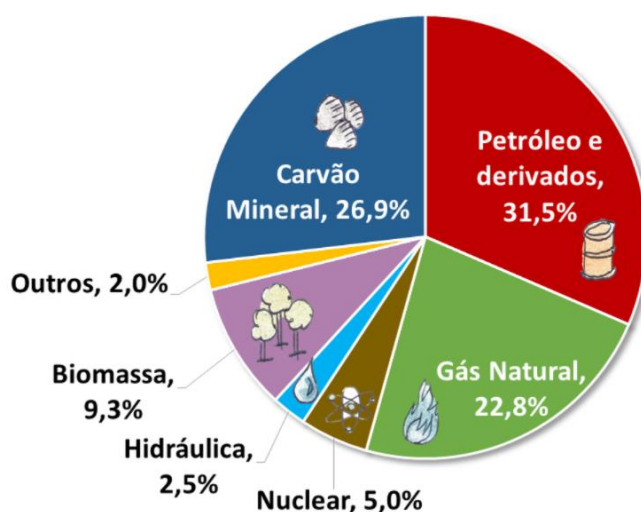
3.1 Panorama geral do Petróleo no mundo e no Brasil

O petróleo é uma fonte de energia primária, em geral de baixa substitutibilidade. Tais características, somadas às diversas formas de aplicação do produto e à amplitude de consumo de seus derivados, como gasolina e diesel, o tornam uma fonte energética fundamental para a economia global (CANELAS, 2017). Devido a tal importância, se tornou um elemento de influência nas relações geopolíticas contemporâneas, desde quando assumiu o posto de matéria prima básica da sociedade industrial e o elemento fundamental para o funcionamento da economia moderna.

Podemos classificar o petróleo como uma *commodity*. A palavra *commodity*, em inglês, significa mercadoria. Portanto, *commodities* são produtos que funcionam como matérias-primas e possuem baixo nível de industrialização, ou seja, sua principal característica é ser pouco processado (RICO, 2018; TORO, 2019; XP, 2019).

De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), em 2018, os derivados do petróleo correspondiam a 31,5% da matriz energética do mundo seguido por 26,9% do carvão mineral, 22,8% do gás natural, 9,3% da biomassa, 5,0% da energia nuclear, 2,2 da energia hidráulica, 2% de outras fontes renováveis, conforme a Figura 1.

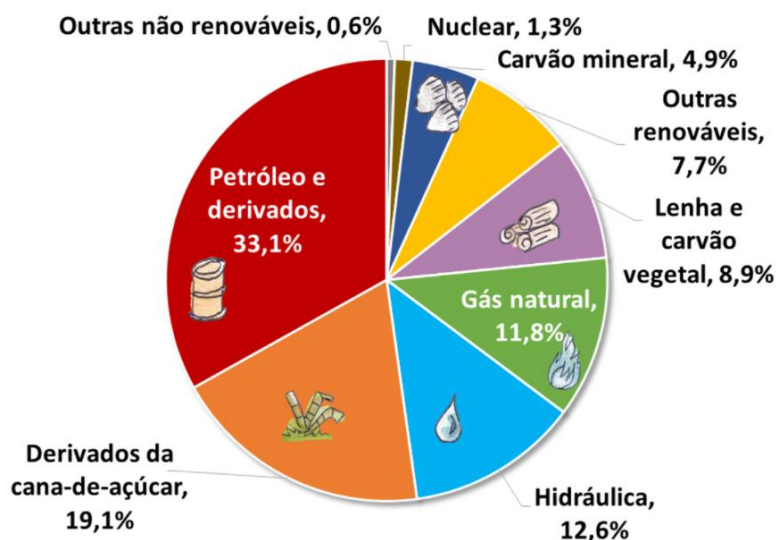
Figura 1 - Matriz energética mundial 2018



Fonte: EPE (2020)

Isso mostra que as nações possuem uma grande dependência desse bem mineral e de outras fontes não renováveis como o gás natural e o carvão. Já no Brasil, não é muito diferente o panorama das principais fontes. Segundo o Balanço Energético Nacional (BEN, 2021a), o percentual de petróleo é um pouco mais alto, totalizando 33,1% da matriz, valor este que chega a ser superior a soma da segunda e da terceira fonte de energia mais utilizadas pelo país, álcool e hidráulica, que correspondem a 19,1% e 12,6%, respectivamente, conforme a figura 2.

Figura 2 - Matriz energética brasileira



Fonte: BEN (2021a)

3.2 Panorama econômico do Petróleo

O petróleo se apresenta como uma matéria prima de suma importância devido a dependência tanto mundial quanto brasileira para a produção de seus combustíveis. Dessa forma, em momentos de instabilidade global, o petróleo proporciona grande preocupação e apresenta elevada volatilidade em seu preço. Na pandemia de COVID-19, por exemplo, países importadores e exportadores da *commodity* foram impactados macroeconomicamente, como na inflação.

Esse destaque que o petróleo possui afeta não só no quesito energético como também no mercado financeiro por influenciar diretamente nas bolsas de valores quando há mudanças mais bruscas tanto no seu volume quanto no seu preço. Os preços das ações, tanto em setores ligados diretamente à matéria prima, como transportes e logística, quanto em setores menos dependentes, como tecnologia da informação e bancos, são afetados pela variação do preço do petróleo.

Em 1983, o barril de petróleo começou a ser negociado de diversas maneiras de acordo com suas características de densidade, mas as duas principais são, atualmente: o tipo Brent e o WTI (West Texas Intermediate) (IPEA, 2016). O petróleo Brent pode ser classificado como leve do tipo doce, ou seja, contém menos de 0,5% de enxofre em sua composição e cerca de dois terços do mundo utiliza essa

precificação como referência nas negociações. Já o petróleo WTI é classificado como um óleo mais pesado e doce, porém com concentrações ainda menores de enxofre. (REIS, 2021). Apesar de grande parte do globo utilizar o tipo Brent, os Estados Unidos optaram por utilizar o WTI devido à produção de petróleo, principalmente, do Texas como modelo de preço para as negociações.

As negociações desses tipos de petróleo são realizadas em dois grandes mercados, o NYMEX (New York Mercantile Exchange), onde é negociado o petróleo WTI (West Texas Intermediate), e o IPE (International Petroleum Exchange), em Londres, onde é negociado o petróleo do tipo Brent. As cotações destes dois petróleos diferem, em média, aproximadamente entre 2 ou 3 dólares por barril em favor do WTI devido as menores concentrações de enxofre, isto é, mais fácil de ser refinado (FERREIRA et al, 2017).

A OPEP atua como figura controladora de grande parte da produção e exportação do Brent, atuando significativamente na determinação do preço do barril. Como foi visto, o petróleo é importante para as economias de todo o mundo e, por isso, a OPEP tem sido considerado uma força geopolítica líder, atuando em influenciando a economia de diversos países (GRANT, 2019). Assim, a cotação do barril de petróleo depende da interação entre a oferta e demanda por óleo bruto nas bolsas de valores.

Vale ressaltar que tanto o Brent como o WTI, assim como outros produtos, têm seus preços determinados pela lei da oferta e demanda. Aumento na oferta, gera uma queda no preço do produto, enquanto a sua diminuição gera um aumento. Em relação a demanda, o contrário é verdadeiro. Já um aumento da demanda gera um aumento do preço, e uma queda na demanda gera uma baixa no preço, como citado por CARCANHOLO (2017), ao enunciar os conceitos de Adam Smith.

3.2.1 Preço do barril de petróleo Brent

A determinação do preço do petróleo tipo Brent é um mecanismo complexo que abrange uma série de indicadores como o *Dated Brent* e o *Brent Forwards*. O *Dated Brent* é o mais utilizado e representa o preço “spot” de um carregamento de petróleo que chegará em terra entre 10 e 25 dias. As negociações de *Dated Brent* são realizadas em “*Price Reporting Agencies*” (PRA), por exemplo, a Argus Media e a

Platts, que estimam e anunciam os preços a partir das informações de negociações físicas e do mercado financeiro.

Para entender como é determinado o preço do *Dated Brent*, primeiro é de suma importância entender o preço do *Brent forward*. Este, por sua vez, é um contrato “*Over The Counter*” (OTC), ou seja, somente as partes envolvidas na negociação sabem de fato dos termos. Os compradores são notificados 25 dias antes das datas de entrega dos barris. Esse tipo de contrato não especifica um dia exato, mas sim o mês de entrega dos barris (PLATTS, 2012). Dessa forma, as PRAs estimam três preços do *Brent forward* cobrindo um período de três meses no futuro (DUNN E HOLLOWAY, 2012).

Definindo os dois preços de Brent, as PRAs avaliam os preços dos “*contract-for-difference*” (CFD), ou seja, é um mecanismo que utiliza a diferença entre o preço futuro e o preço datado. Logo, esses CFDs são trocas, ou swaps, de curto prazo entre o preço “flutuante” (ou incerto) do *Dated Brent*, quando há o carregamento, e um preço fixo em uma data futura (preço do *Brent forward*). Esse mecanismo é utilizado para proteger, ou *hedgear* a operação, contra uma especulação sobre os movimentos no mercado Brent. Tomando como base as estimativas do CFD de oito semanas no futuro com as estimativas de *Brent forward*, fazendo com que as PRAs gerem um conjunto de preços de *Dated Brent* de até oito semanas no futuro – conhecida como a curva de *Dated Brent*. A média desse conjunto de preços é conhecido “*North Sea Dated Strip*” (DUNN E HOLLOWAY, 2012). Dessa forma, é possível apresentar a figura 3:

3.2.3 Comparação entre o preço do Brent e do WTI (2000 – 2021)

Figura 4 – Comparação entre o preço do barril Brent e WTI



Fonte: Adaptado Trading Economics (2021)

Ao analisar a Figura 4, podemos observar que o comportamento dos preços do Brent e do WTI atuam de maneira semelhante. Isso se deve a oferta e demanda que a *commodity* em si é afetada, sofrendo também com fatores geopolíticos, apesar de serem determinados de maneiras diferentes, como já descrito anteriormente.

Além disso, podemos notar que em momentos de crise, o preço da *commodity* sofre movimentos extrema volatilidade, como em 2008, devido à crise no setor imobiliário dos Estados Unidos que afetou tanto o mercado financeiro quanto o preço das *commodities*, e 2020, com a pandemia de Covid-19 que paralisou as economias devido ao *lockdown*.

3.3 Energia Elétrica no Brasil e no mundo

A energia elétrica é capacidade de trabalho de uma corrente elétrica. Sua geração é feita por turbinas ou geradores que transformam a energia química e mecânica em elétrica. É baseada na produção de tensões elétricas entre dois pontos que permitem o estabelecimento de correntes elétricas. Sua origem pode vir tanto de hidráulica, quanto solar, eólica, biomassa, derivados do petróleo e outros.

A energia hidráulica é produzida através da força dos movimentos das águas que giram turbinas e transformam energia cinética em energia elétrica. Alguns fatores influenciam para a geração dessa energia, como: a vazão do rio, quantidade de água disponível no local abrangendo a sazonalidade, topografia e outros. Além disso, caso algum fator seja limitante, há a criação artificial para a possibilidade de geração (ANEEL, 2005).

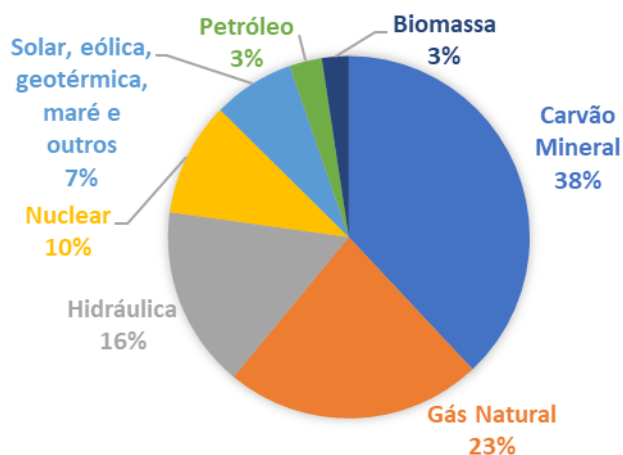
A biomassa é definida como toda matéria orgânica, vegetal ou animal que pode servir como geradora de energia (SOUSA, 2015). Esta energia gerada a partir da biomassa é uma forma indireta da energia solar, assim como a energia hidráulica. No que diz respeito a biomassa, por meio da fotossíntese, a energia proveniente do sol é convertida em energia química, que em seguida é transformada em energia elétrica, sendo assim chamada de bioenergia. A biomassa pode servir como matéria prima “moderna” para biocombustíveis líquidos ou “tradicional” para combustão de biomassa em forma de madeira ou carvão.

A energia eólica pode ser explicada como a energia cinética formada nas massas de ar em movimento. Seu aproveitamento energético é feito por meio da conversão da energia cinética de translação em energia cinética de rotação. Para a produção de energia elétrica, são utilizadas turbinas eólicas, também conhecidas como aerogeradores, e para a realização de trabalhos mecânicos, cata-ventos de diversos tipos (ALVES, 2006).

A energia solar é definida como a energia gerada através da conversão da radiação solar em eletricidade. É comum esse tipo de energia em painéis instalados em grandes terrenos ou casas para geração de energia e não, necessariamente utiliza linhas de transmissão para isso.

No mundo, majoritariamente, a maior geração de energia elétrica, segundo a *International Energy Agency* (IEA, 2021), vem do carvão, seguido do gás natural e hidráulica, conforme a figura 5.

Figura 5 - Matriz elétrica mundial

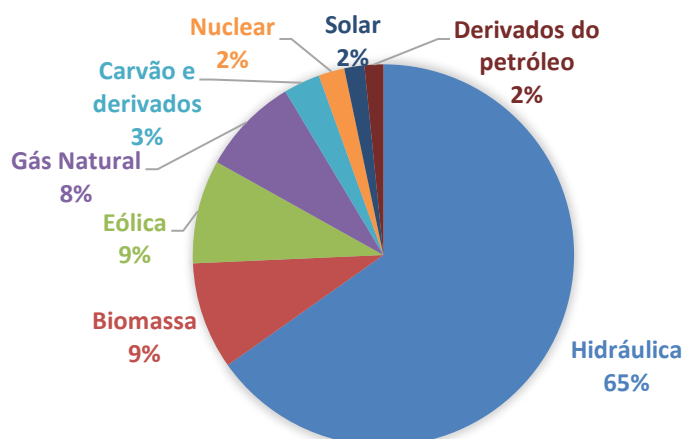


Fonte: Adaptado IEA (2021)

Vale ressaltar que mais da metade da produção mundial tem como base energias não renováveis e nocivas a camada de ozônio, agravando o efeito estufa. Porém, com o Tratado de Paris, firmado em 2015, acordou que as nações participantes, inclusive o Brasil, tem o compromisso de que a temperatura terrestre aumente até 2 °C em relação à temperatura global antes da indústria. Devido a isso, novas alternativas energéticas estão sendo desenvolvidas para que seja mitigado a produção de gases e incentivado a produção de energias renováveis.

No Brasil, a matriz elétrica é em sua maioria renovável, composta principalmente por usinas hidrelétricas, seguida por biomassa e energia eólica, conforme a figura 6.

Figura 6 - Matriz energética brasileira



Fonte: Adaptado BEN (2021)

Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2021), cerca de 82,9% da energia elétrica produzida no Brasil vem de fontes renováveis.

O potencial energético do Brasil é uma das suas maiores riquezas, devido à grande disponibilidade hídrica, o que fornece a de geração de energia renovável (ABBUD E TANCREDI, 2020).

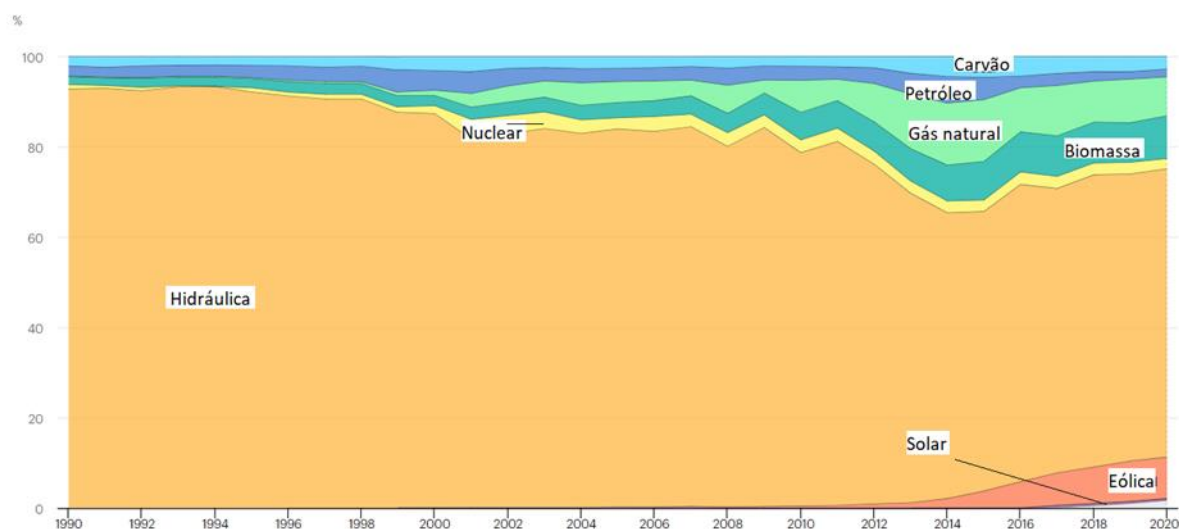
Além disso, cerca de 86% da energia eólica produzida no país provém da região Nordeste e na parte *onshore*. Os investimentos em energia eólica estão em constante crescimento no Brasil (AMANCIO, 2016)

Com relação à energia solar, já que apresenta altos níveis de radiação solar. A irradiação média anual varia entre 1200 e 2400 KWh/m²/ano, enquanto na Alemanha fica entre 900 e 1250 KWh/m²/ano (USGS, 2021). Além disso, há uma perspectiva de aumento da produção de 2% para 2,9% até o fim de 2021 (ANEEL, 2021).

O Brasil possui um terreno fértil para expandir a produção de energia de biomassa devido à extensas áreas cultiváveis e condições climáticas favoráveis ao longo de todo o ano. O recurso com maior potencial de aproveitamento no país é o bagaço de cana-de-açúcar (LOPES et al. 2019)

Na figura 7, podemos observar a evolução da geração dos tipos de energia elétrica no Brasil e o grande crescimento na última década de energia solar e eólica, dado que o país está investindo nessas energias renováveis e diversificando ainda mais sua matriz energética.

Figura 7 – Evolução da matriz energética brasileira desde 1990 até 2020



Fonte: IEA (2021)

3.3.1 Composição da tarifa da energia elétrica

Segundo a Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica (ABRADEE, 2018), a tarifa de energia elétrica nada mais é do que o preço cobrado por unidade de energia (R\$/kWh). Esse preço da energia considera os custos incorridos desde a geração até sua disponibilização aos consumidores, residenciais ou industriais, abrangendo investimentos realizados na rede e a sua operação diária. Além destes custos, o Brasil cobra os encargos e os impostos relacionados ao sistema.

Resumidamente, a tarifa de energia é constituída por:

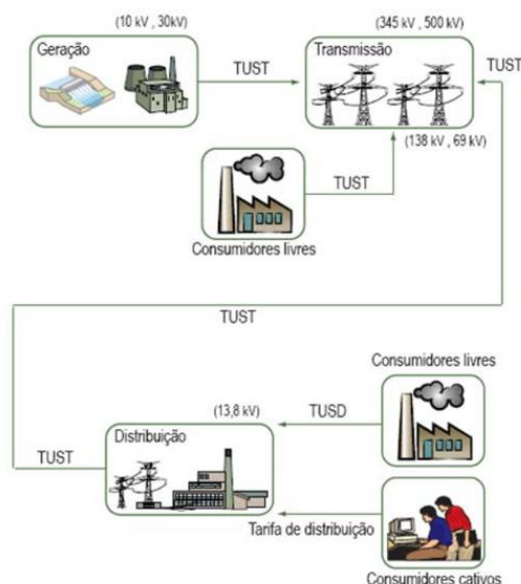
- Custos com a aquisição de energia elétrica;
- Custos relativos ao uso do sistema de distribuição;
- Custos relativos ao uso do sistema de transmissão;
- Perdas técnicas e não técnicas;
- Encargos diversos e impostos.

Os custos com a aquisição de energia são aqueles que originam de contratação de montantes de energia por meio de leilões regulados. A empresa distribuidora realiza a compra de uma quantidade de energia que considera suficiente para atender o mercado cativo. Esses custos são chamados de Tarifa de Energia (TE) e são totalmente repassados aos consumidores.

Os custos relativos ao uso do sistema de distribuição estão inseridos na Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição (TUSD). As despesas englobam custos de operação e manutenção das redes de distribuição.

Os custos relativos ao uso do sistema de transmissão são arrecadados como Tarifa de Uso do Sistema de Transmissão (TUST). Na figura 8, está representada pelas setas para onde vão os recursos arrecadados pelas TUST e TUSD (ABRADEE, 2018).

Figura 8 - Fluxograma dos recursos das TUST e TUSD



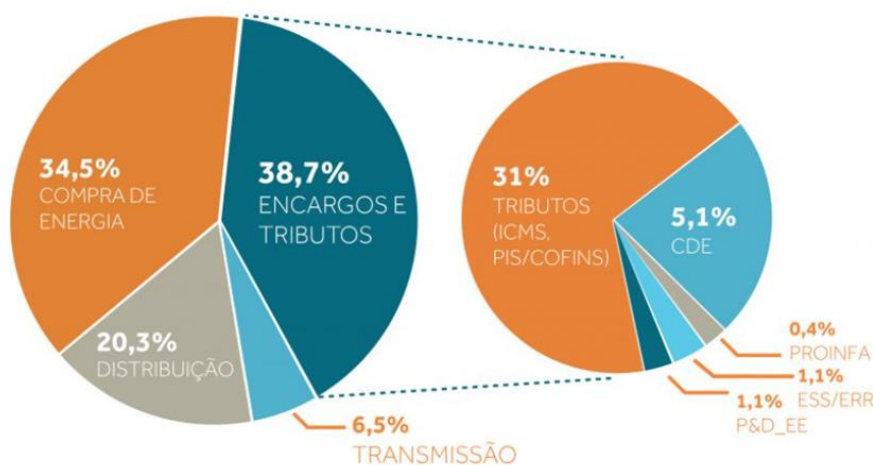
Fonte: ABRADÉE (2018)

Os custos relativos às perdas elétricas podem ser divididos em dois tipos: perdas técnicas e não técnicas. Primeiramente, as perdas técnicas são aquelas que estão presentes em qualquer circuito elétrico, por exemplo, quando a corrente elétrica atravessa o fio e, devido a resistência, há o aquecimento. Dessa forma, todos os consumidores pagam pelas perdas técnicas por conta do seu próprio consumo. Já as perdas não técnicas são aquelas que danificam o circuito por ações externas, como roubo de fiação ou rompimento de cabeamento (ANEEL, 2008).

Os tributos da energia elétrica recolhidos pelo Governos são: PIS/PASEP, COFINS e ICMS. Dentre os impostos citados, o ICMS pode variar de estado para estado e representar, aproximadamente, 30% da conta de luz.

Com isso, podemos apresentar a figura 9 que traz o percentual de cada tarifa cobrada na conta de luz. Nota-se que a maior fatia do pagamento da conta do brasileiro provém de impostos, seguido do próprio consumo, custos de distribuição e transmissão.

Figura 9 - Composição tarifária média do Brasil



Fonte: ABRADEE (2018)

3.4 Métodos estatísticos

3.4.1 Teste de Correlação Cruzada

No campo da estatística e da matemática, correlação é a uma medida entre duas ou mais variáveis que se relacionam de forma causal ou não causal. Podemos citar como exemplo uma correlação entre o gasto de conta de luz com o número de pessoas de uma casa, como também, entre o consumo de café com o risco de suicídio. O fato de serem relacionadas não necessariamente há uma relação de causalidade.

A Correlação Cruzada é a correlação entre dois conjuntos de dados temporais x_t e y_t , separadas por t unidades de tempo (a correlação entre $y_{t+\tau}$ e x_t) e que podem apresentar uma relação de direção e força.

Segundo OTTO (2017), a Correlação Cruzada pode ser calculada como na Equação (1):

$$r_{xy}(\tau) = \frac{\sum_{t=1}^{n-|\tau|} x_t y_{t+\tau}}{\sqrt{\sum_{t=1}^n x_t^2 \sum_{t=1}^n y_t^2}} \quad (1)$$

Em que:

r_{xy} : Coeficiente de Correlação Cruzada;

x_t e y_t : Variáveis analisadas para a correlação, num determinado tempo t ;

τ : Tempo de defasagem.

O tempo de defasagem é o quanto uma variável está imediatamente atrasada ou adiantada em relação a outra. O Coeficientes de Correlação Cruzada pode variar entre -1 e 1.

- Quando o valor de “r” é 1, podemos afirmar que há uma correlação positiva perfeita, isto é, os valores de Y aumentam na mesma proporção que os valores de X aumentam, ou seja, são variáveis diretamente proporcionais.
- Quando o valor de “r” é -1, podemos afirmar que há uma correlação negativa perfeita, isto é, os valores de Y aumentam ou diminuem na mesma proporção que os valores de X diminuem ou aumentam, ou seja, as variáveis podem ser chamadas de inversamente proporcionais.
- Quando o valor é igual a zero, indica que não há relação linear entre as variáveis.

Segundo PENN (2018) caso haja correlação entre os dados, é possível aplicar o teste de Causalidade de Granger. Caso negativo, não há necessidade de verificar causalidade, pois causalidade sem correlação só pode ocorrer caso a base de dados possua apenas 1 dado ou tiver sido adulterada.

3.4.2 Teste de Causalidade de Granger

O teste de causalidade mais famoso da literatura foi criado pelo economista Clive Granger e assume que o futuro não pode causar o passado ou o presente. Por exemplo, se um evento B ocorre depois do evento A, logo o evento B é impossível ocasionar A. Além disso, caso o evento B ocorra antes de A, não significa que A causou B. De modo geral, “o que temos são duas séries temporais A e B e estaríamos interessados em saber se A precede B, ou B precede A, ou se A e B ocorrem simultaneamente” (CARNEIRO, 1997).

Podemos ainda dizer que “X é Granger causa de Y”, ou seja, o valor X no passado melhora a previsão de Y no futuro, ou ainda, que “X não é Granger causa de Y”, isto é, não podemos afirmar que o valor X no passado aperfeiçoa uma previsão de valor Y no futuro.

Em termos matemáticos, o teste estima as regressões das equações (2) e (3), retiradas de GRANGER (1969).

$$X_t = \sum_{j=1}^m a_j X_{t-j} + \sum_{j=1}^m b_j Y_{t-j} + u_{1t} \quad (2)$$

$$Y_t = \sum_{j=1}^m c_j X_{t-j} + \sum_{j=1}^m d_j Y_{t-j} + u_{2t} \quad (3)$$

Em que:

a_j, b_j, c_j e d_j : Coeficientes das regressões

u_{1t} e u_{2t} : Resíduos que são assumidos como não-correlacionados.

A Equação (2) demonstra que os valores de X estão correlacionados aos valores passados do próprio X, ao mesmo tempo que são valores defasados para Y. Já a equação (3) mostra o mesmo comportamento para Y. Na maioria das vezes, X e Y são representadas como taxas de variação, já que dificilmente é possível encontrar séries temporais estacionárias para essas análises (CARNEIRO, 1997).

Podemos a seguinte situação para exemplificar a taxa de variação: supondo uma série X discreta com $x(1) = 4$, $x(2) = 8$ e $x(3) = 16$, a taxa de variação seria a

diferença entre esses intervalos, ou seja, $Dx(1) = x(2) - x(1) = 8 - 4 = 4$, e $Dx(2) = x(3) - x(2) = 16 - 8 = 8$. Para séries contínuas, é possível utilizar a primeira derivada para verificar a taxa de variação.

Para a escolha do número das defasagens, um dos testes mais conhecidos na literatura, é o de Schwarz (1978) que consiste em minimizar as defasagens a partir da equação (4).

$$S_c = \ln \vartheta^2 + m \cdot \ln n \quad (4)$$

Em que:

ϑ^2 : estimativa de máxima verossimilhança de σ^2 (soma dos quadrados dos resíduos das equações 2 e 3);

m : número de defasagens

n : número de observações.

De maneira geral, esse teste gera um modelo de regressão com diversas defasagens e aos poucos são reduzidas essas defasagens até que se encontre um valor de m que minimize S_c (CARNEIRO, 1997).

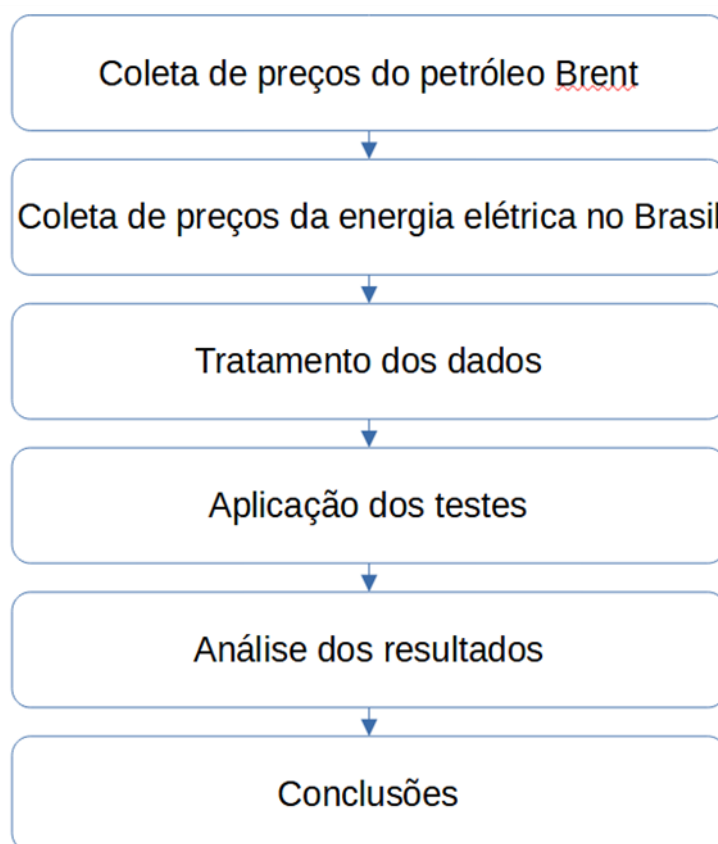
Assim, após estimar as regressões das equações (2) e (3), podemos observar 4 casos distintos que são definidos (CARNEIRO, 1997; GUJARATI e PORTER, 2011):

- Causalidade unilateral de Y para X: quando a soma dos coeficientes a_j de (2) é diferente de zero ($\sum a_j \neq 0$), e quando o conjunto de coeficientes d_j de (3) for igual a zero ($\sum d_j = 0$).
- Causalidade unilateral de X para Y: quando a soma dos coeficientes a_j de (3) é igual a zero ($\sum a_j = 0$), e quando o conjunto de coeficientes d_j de (2) for diferente de zero ($\sum d_j \neq 0$).
- Bicausalidade ou simultaneidade: quando a soma dos coeficientes de X e Y forem diferentes de zero em ambas as regressões ($\sum a_j \neq 0$, $\sum b_j \neq 0$, $\sum c_j \neq 0$ e $\sum d_j \neq 0$).
- Independência: quando a soma dos coeficientes de X e Y forem iguais a zero em ambas as regressões ($\sum a_j = 0$, $\sum b_j = 0$, $\sum c_j = 0$ e $\sum d_j = 0$).

4 METODOLOGIA

Para desenvolvimento do trabalho, foram utilizados dois testes estatísticos: Correlação Cruzada e Causalidade de Granger. Esses testes são aplicados na literatura para análise de séries temporais. Na figura 10 é apresentado o fluxograma que mostra as etapas desenvolvidas no trabalho.

Figura 10 – Etapas desenvolvidas



Fonte: Autoria própria (2021)

Inicialmente, foi realizada a coleta de dados dos preços médios mensais do petróleo tipo Brent nos últimos 10 anos, de julho de 2011 até junho de 2021 (*Indexmundi*, 2021). Vale ressaltar a proximidade entre os preços do barril tipo Brent e o WTI, porém optou-se pelos preços do Brent, pois é a cotação utilizada pela Petrobras, maior empresa exploradora de petróleo do Brasil, para negociar a *commodity*.

Os preços médios mensais da energia elétrica no Brasil foram obtidos no site do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEADATA, 2021) e abrangeu o período de julho de 2011 até junho de 2021.

Para o tratamento de dados foi feita conversão de unidades das séries coletadas para se chegar a uma unidade em comum. O preço do petróleo tinha como unidade de medida R\$/barril, e o da energia elétrica R\$/kWh. Os dados do petróleo foram transformados de R\$/barril para R\$/kWh utilizando a unidade de conversão proposta pelo Manual Metodológico do Balanço Energético Nacional (BEN, 2021b). Segundo o Manual, 1 barril equivale igual a $1,65 \cdot 10^3$ kWh.

Já com relação ao preço da energia elétrica, os dados brutos foram extraídos com a unidade de medida R\$/MWh. Com isso, houve apenas a conversão de R\$/MWh para R\$/kWh, dado que 1 M (mega) é igual a 10^6 e 1 k (kilo) é igual a 10^3 .

Após essa etapa, os dados foram deflacionados utilizando como deflator o Índice Geral de Preços – Mercado (IGP-M) calculado pela Fundação Getúlio Vargas (FGV) e disponibilizado pelo IPEADATA (2021). Deflacionar é aplicar um deflator a uma série e transformar valores nominais (preços correntes) em valores reais (preços constantes) (Ipea, 2017). Dessa forma é possível comparar valores entre períodos eliminando o efeito da inflação. O mês utilizado como mês-base foi junho de 2021. Esse índice foi escolhido como deflator porque é utilizado para reajuste de algumas tarifas públicas, entre elas a energia elétrica.

Segundo o Banco Central do Brasil (2021), para deflacionar um valor basta multiplicar o valor a ser corrigido pelo fator acumulado do índice de referência, ou seja, produtório dos índices mensais de $(IGP-M/100) + 1$. Por exemplo, para se deflacionar um valor de junho de 2011 para os dias de hoje, calculamos o produtório de índices mensais de IGP-M até o mês atual e o multiplicamos pelo valor nominal de junho de 2011.

Após o tratamento dos dados, foram plotados gráficos para uma análise visual inicial, observando a existência de padrões ou relações entre os dados. Em seguida foram calculadas medidas estatísticas como a média, mediana, variância e desvios padrão.

Finalmente, foram aplicados os testes de Correlação Cruzada e de Causalidade de Granger. Para o Teste de Correlação Cruzada foi utilizado o pacote de Excel: *Miscellaneous Time Series Topics – Cross Correlations* (Zaiontz, [s.d.]). Foi adotado o critério de Mukaka (2012) para determinar a existência de associação (força e direção) entre os dados (Tabela 1):

Tabela 1 - Critérios de correlação

Intervalo de R	Tipo de Correlação
0.9 a 1	Correlação positiva muito forte
0.7 a 0.89	Correlação positiva forte
0.4 a 0.69	Correlação positiva moderada
0.2 a 0.39	Correlação positiva fraca
0.01 a 0.19	Correlação positiva bem fraca
0	Sem Correlação
-0.19 a -0.01	Correlação negativa bem fraca
-0.39 a -0.2	Correlação negativa fraca
-0.69 a -0.4	Correlação negativa moderada
-0.89 a -0.7	Correlação negativa forte
-1 a -0.9	Correlação negativa muito forte

Fonte: Mukaka (2012)

Para aplicação do Teste de Correlação de Granger foi utilizado o pacote de Excel: *Miscellaneous Time Series Topics - Granger Causality* (Zaiontz, [s.d.]). Antes da aplicação do teste, é necessário verificar se a série temporal é estacionária. Para avaliar essa condição, utilizou-se o teste de Dickey-Fuller aumentado. Com isso o trabalho conclui seu objetivo, analisando os resultados para identificar padrões e relações entre preço do petróleo e da energia elétrica.

5 RESULTADOS

5.1 Preços do petróleo e da energia elétrica

Inicialmente foram coletados dados dos preços mensais do petróleo Brent de julho de 2011 até junho de 2021. Além disso, foram coletados os dados da energia elétrica no Brasil para o mesmo período. Por fim, para deflacionar os dados (mês-base junho de 2021), foi coletado o IGP-M também do mesmo período. A base de dados mensal completa está disponível no apêndice. Na tabela a seguir são apresentadas as médias anuais dos preços coletados como ilustração de como os dados foram trabalhados.

Tabela 2 - Preços Anuais Médios da Energia Elétrica, do Petróleo Brent e IGP-M (2011 a 2021)

Data	Energia Elétrica (R\$/MWh)	Brent (R\$/Barril)	IGP-M
07.2011 - 06.2012	286,57	200,36	0,42
07.2012 - 06.2013	276,58	222,15	0,51
07.2013 - 06.2014	256,64	250,34	0,51
07.2014 - 06.2015	329,69	192,39	0,46
07.2015 - 06.2016	422,19	159,62	0,97
07.2016 - 06.2017	411,35	161,24	-0,06
07.2017 - 06.2018	439,04	212,26	0,56
07.2018 - 06.2019	501,37	265,38	0,53
07.2019 - 06.2020	514,12	223,49	0,59
07.2020 - 06.2021	535,10	290,97	2,59

Fonte: Adaptado IndexMundi (2021) e Ipeadata (2021)

Em seguida, os preços foram convertidos para a mesma unidade (R\$/kWh), para a energia elétrica foi estabelecida a conversão 1 MWh = 10^3 kWh e para o preço do petróleo Brent 1 barril = $1,65 \cdot 10^3$ kWh, conforme mencionado na metodologia, obtendo-se a tabela 3.

Tabela 3 - Média anual dos preços do petróleo Brent e da energia elétrica convertidos

Data	Energia Elétrica (R\$/kWh)	Brent (R\$/kWh)	IGP-M
07.2011 - 06.2012	0,287	0,121	0,42
07.2012 - 06.2013	0,277	0,135	0,51
07.2013 - 06.2014	0,257	0,152	0,51
07.2014 - 06.2015	0,330	0,117	0,46
07.2015 - 06.2016	0,422	0,097	0,97
07.2016 - 06.2017	0,411	0,098	-0,06
07.2017 - 06.2018	0,439	0,129	0,56
07.2018 - 06.2019	0,501	0,161	0,53
07.2019 - 06.2020	0,514	0,135	0,59
07.2020 - 06.2021	0,535	0,176	2,59

Fonte: Autoria própria (2021)

Após a conversão, os preços passaram por um processo de deflação pelo IGP-M, adotando como mês-base junho de 2021. Os resultados estão na tabela 4.

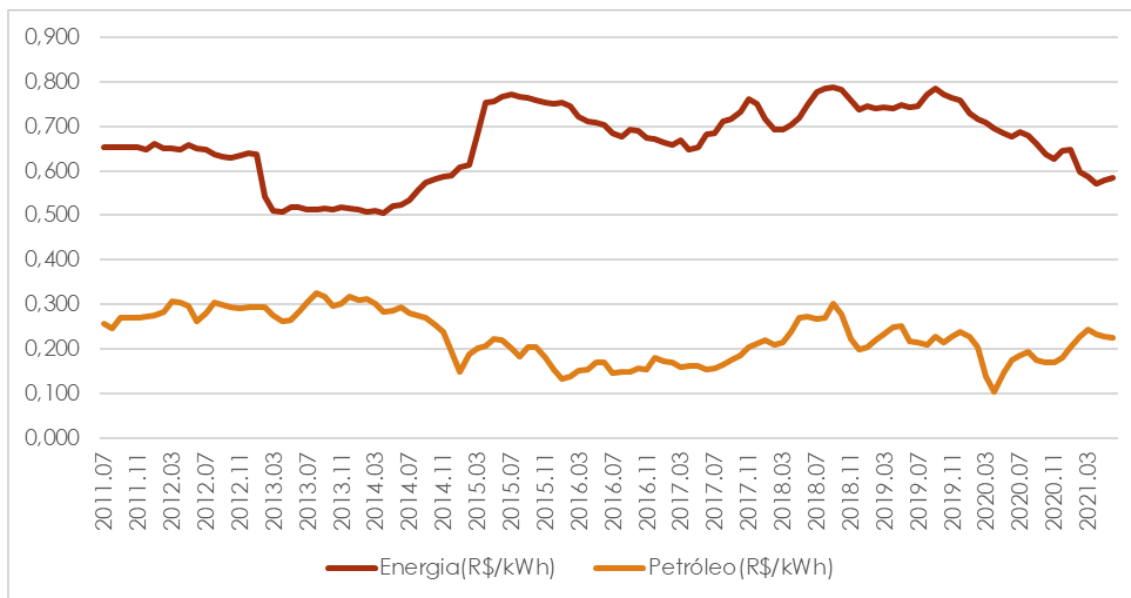
Tabela 4 - Preço Anual Médio do Brent e da Energia Elétrica deflacionados pelo IGP-M (mês base junho de 2021)

Data	Energia Elétrica (R\$/kWh)	Brent (R\$/kWh)	IGP-M
07.2011 - 06.2012	0,653	0,276	0,42
07.2012 - 06.2013	0,652	0,278	0,51
07.2013 - 06.2014	0,651	0,283	0,51
07.2014 - 06.2015	0,649	0,285	0,46
07.2015 - 06.2016	0,647	0,287	0,97
07.2016 - 06.2017	0,646	0,289	-0,06
07.2017 - 06.2018	0,645	0,291	0,56
07.2018 - 06.2019	0,643	0,292	0,53
07.2019 - 06.2020	0,634	0,293	0,59
07.2020 - 06.2021	0,622	0,290	2,59

Fonte: Autoria própria (2021)

Com os dados tratados, elaborou-se a Figura 11 com o objetivo de, inicialmente, realizar uma análise visual.

Figura 11 - Comparação Preço da Energia elétrica e do Petróleo Brent (R\$/kWh)



Fonte: Autoria própria (2021)

A Figura 11 mostra graficamente os preços médios mensais dos últimos 10 anos do petróleo Brent e o da energia elétrica no Brasil. Nota-se, primeiramente, que o preço da energia elétrica é maior que o petróleo Brent em todos os momentos da série, isso porque a energia elétrica já está em seu estado pronto para consumo, enquanto o petróleo Brent ainda passará por um processo de refinamento. O gráfico mostra a ocorrência tanto de sazonalidade quanto de eventos inesperados, por exemplo, com o início do *lockdown* em 2020, devido a pandemia de coronavírus, nota-se uma queda do preço do barril de petróleo, por conta da diminuição de demanda, e uma alta da energia elétrica, com o aumento da demanda. Com isso, observa-se que em alguns pontos do gráfico, quando o preço de uma série sobe, o da outra cai. Isso pode indicar uma correlação negativa que será averiguada no teste de correlação cruzada.

5.2 Teste de Correlação Cruzada

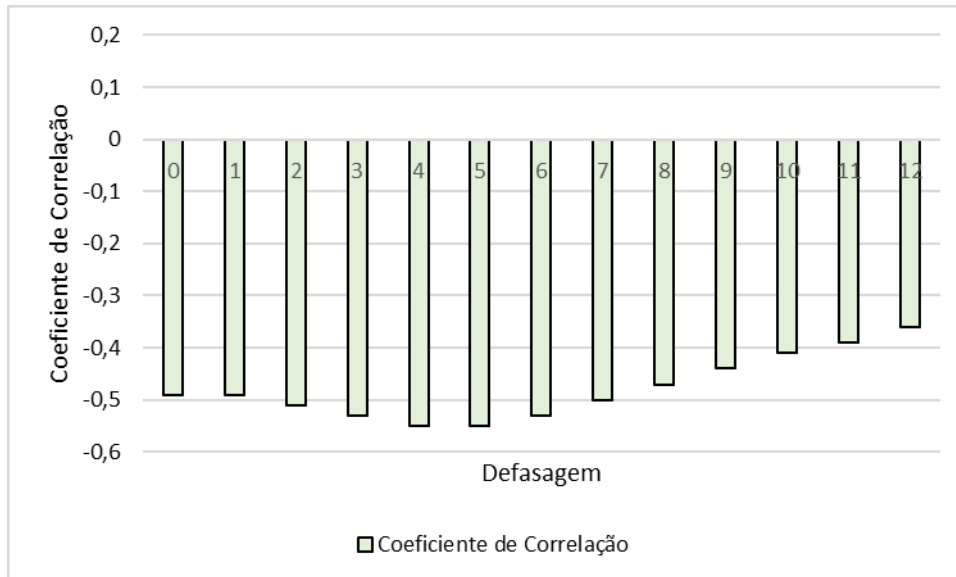
O teste de correlação cruzada foi realizado utilizando o pacote Excel: *Miscellaneous Time Series Topics – Cross Correlations* (Zaiontz, [s.d.]). Na tabela 5, estão exibidos os resultados obtidos e na figura X estão representados graficamente.

Tabela 5 - Coeficientes de correlação cruzada entre os preços do petróleo Brent e da energia elétrica

Defasagem	Correlação
0	-0,49
1	-0,49
2	-0,51
3	-0,53
4	-0,55
5	-0,55
6	-0,53
7	-0,50
8	-0,47
9	-0,44
10	-0,41
11	-0,39
12	-0,36
Média	-0,48
Correlação	Negativa Moderada

Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 12 – Correlograma do Coeficiente de Correlação Cruzada pela defasagem



Fonte: Autoria própria (2021)

No teste, utilizou-se um total de 12 defasagens comparando o preço do petróleo Brent com o da energia elétrica. Com isso, gerou-se 12 Coeficientes de Correlação que variaram entre -0,55 e -0,36. Consultando a Tabela 1, observamos que entre 0 e 10 defasagens, a correlação é negativa moderada e, a partir disso, a correlação passa a ser negativa e fraca. Isto é, a associação entre as duas séries, no intervalo de 0 e

10 defasagens, tem força média com direção inversa, ou seja, quando uma aumenta a outra diminui e vice-versa e acima desse valor, a força passa a ser fraca, porém com mesma direção.

Como os valores obtidos possuem, em grande parte, força moderada, segundo MUKAKA (2012), podemos partir para uma análise de Causalidade de Granger, pois como há uma correlação entre as séries, há a possibilidade de uma série predizer a outra (PENN, 2018).

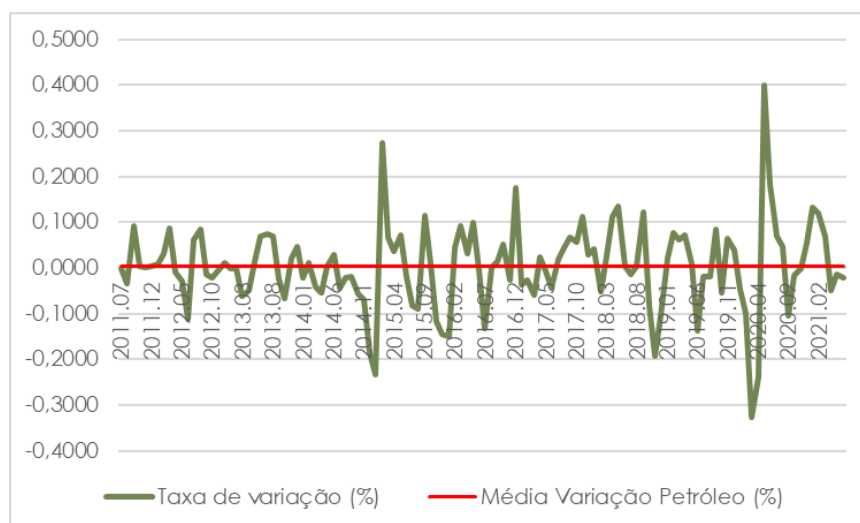
5.3 Teste de Causalidade de Granger

Para aplicar o teste de Causalidade de Granger é preciso que a série temporal seja estacionária. A estacionariedade foi verificada utilizando o Teste de Dickey-Fuller aumentado.

5.3.1 Teste de Dickey-Fuller aumentado

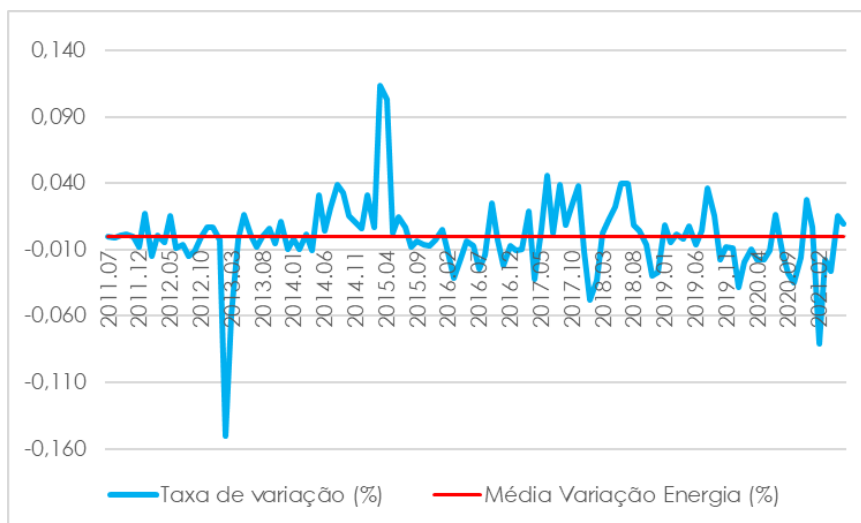
A definição de uma série estacionária é ter a média constante durante o tempo, ou seja, não existe tendências de alta ou de baixa. Para garantir a estacionariedade de ambas as séries, foi calculou-se uma taxa de variação mensal em cada uma das séries de preços. Dessa forma, obteve-se as figuras 13 e 14.

Figura 13 - Taxa de variação dos preços do petróleo Brent



Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 14 - Taxa de variação dos preços da energia elétrica



Fonte: Autoria própria (2021)

Analisando visualmente as figuras 13 e 14, podemos notar que as variações em torno da média do preço da energia elétrica são menores do que as variações da série do petróleo Brent. Numa primeira análise, ambas as séries parecem ser estacionárias.

Em uma segunda análise, agora estatística, o teste de Dickey-Fuller aumentado utiliza a seguinte equação de regressão linear:

$$\Delta y_t = a_0 + a_1 y_{t-1} + \varepsilon_t \quad (5)$$

Δy_t : Diferença da taxa de variação da série ao longo do tempo

a_0 e a_1 : Constantes

y_{t-1} : Taxa de variação defasada em 1.

ε_t : Erro

Inicialmente, estabelecemos duas hipóteses do teste, nas quais:

- $H_0: a_1 = 0$; (Não estacionário)
- $H_1: a_1 < 0$; (Estacionário)

Para rejeitar a hipótese nula e confirmar a estacionariedade das séries, devemos calcular os valores t da regressão linear e compará-los com a Tabela 6. Como o teste é unicaudal, devemos encontrar um valor de t inferior aos valores críticos para termos evidências suficientes para rejeitar H_0 , e consequentemente, aceitar a hipótese de estacionariedade.

Tabela 6 – Valores críticos de Dickey-Fuller

Valores críticos para a distribuição t de Dickey-Fuller				
	Sem tendência		Com tendência	
Tamanho da amostra	99%	95%	99%	95%
$T = 25$	-3,75	-3	-4,38	-3,6
$T = 50$	-3,58	-2,93	-4,15	-3,5
$T = 100$	-3,51	-2,89	-4,04	-3,45
$T = 250$	-3,46	-2,88	-3,99	-3,43
$T = 500$	-3,44	-2,87	-3,98	-3,42
$T = \infty$	-3,43	-2,86	-3,96	-3,41

Fonte: Fuller (1976)

Calculando o valor t da regressão linear para o preço do petróleo Brent e da energia elétrica com auxílio do Excel, utilizando um nível de confiança de 95%, obteve-se os seguintes valores:

Tabela 7 – Valores t do preço do petróleo e da energia elétrica

Valores t de Dickey - Fuller	
Brent	-8,399
Energia Elétrica	-7,088

Fonte: Autoria própria

Em seguida, comparamos os dados obtidos com a Tabela 6. O tamanho da amostra estudada é de 120 meses (10 anos) e nível de confiança de 95%. Como utilizamos a taxa de variação, não há tendência. Com isso, o valor crítico está entre -2,89 e -2,88. Como os valores obtidos são menores do que o intervalo crítico, rejeitamos a hipótese nula e, portanto, aceitamos que as séries temporais de preços do petróleo Brent e da energia elétrica são estacionárias. Com isso, podemos seguir para o teste de Causalidade de Granger.

5.3.2 Teste de Causalidade de Granger

Após a confirmação da estacionaridade das séries, o Teste de Causalidade de Granger busca fornecer evidências de que uma série X no passado possa auxiliar na previsão de outra série Y, ou que uma série Y no passado possa ajudar na previsão uma outra série X.

Inicialmente, adotamos nossas hipóteses. Como buscamos avaliar a causalidade que pode ocorrer do preço do petróleo Brent na energia elétrica e a possível causalidade do preço da energia elétrica no preço do petróleo Brent, teremos dois pares de hipóteses:

1ª Situação:

- H_0 : Petróleo Brent não é Granger causa da energia elétrica
- H_1 : Petróleo Brent é Granger causa da energia elétrica

2ª Situação:

- H_0 : Energia elétrica não é Granger causa do petróleo Brent
- H_1 : Energia elétrica é Granger causa do petróleo Brent

Para o teste, assume-se que a confiança de α é igual a 0,05, já que é comumente utilizado na literatura. Para rejeitar H_0 , devemos calcular os valores-p com diversas defasagens para cada situação. Se algum valor for menor que α , rejeitamos a hipótese nula e aceitamos a hipótese alternativa H_1 .

Os resultados obtidos de valor-p estão apresentados nas tabelas 8 e 9. A primeira mostra os resultados para causalidade do petróleo Brent sobre a energia elétrica, já a segunda os valores-p para causalidade da energia elétrica sobre o petróleo Brent.

Tabela 8 - Valor-p: Preço do petróleo Brent causa preço energia elétrica

Defasagens	Petróleo → Energia
1	0,38
2	0,26
3	0,37
4	0,32

Fonte: Autoria própria (2021)

Tabela 9 - Valor-p: Preço da energia elétrica causa preço do petróleo Brent

Defasagens	Energia → Petróleo
1	0,27
2	0,07
3	0,16
4	0,23

Fonte: Autoria própria (2021)

Comparando os valores de cada defasagem com α , nenhum dos valores-p encontrados é menor que 0,05, portanto, falhamos em rejeitar a hipótese H_0 . Consequentemente, aceitamos que o preço do petróleo Brent não é Granger causa da energia elétrica e o preço da energia elétrica não é Granger causa do petróleo Brent. Logo, não há causalidade no sentido de Granger entre o preço do petróleo Brent e o preço da energia elétrica.

Um ponto interessante é que se o teste de Granger abordasse um coeficiente de segurança de 0,10, com defasagem de 2, negaríamos a hipótese H_0 da 2ª situação e poderíamos concluir que a energia elétrica é Granger causa do preço do petróleo Brent unilateralmente.

A não existência de causalidade entre os preços pode ser explicada de algumas formas, entre elas que a parcela de petróleo na matriz energética brasileira é de apenas 2% (Figura 6) e, portanto, eventuais mudanças no preço do petróleo não causam flutuações consideráveis no preço futuro da energia elétrica. Além disso, podemos citar que a energia elétrica brasileira não causa alterações no preço futuro do petróleo, dado que fatores como sazonalidade local não influenciam no preço da *commodity* que é majoritariamente importada de outros países.

6 CONCLUSÃO

As discussões ambientais sobre crescimento sustentável nas últimas décadas tem se intensificado e vem promovendo mudanças nas matrizes energéticas no mundo, dado que as mudanças climáticas devido a ação do ser humano alcançou um ponto jamais visto. Uma alternativa de mitigar a poluição ao meio ambiental é migrar a utilização das energias não renováveis, como o petróleo e seus derivados, para energias renováveis menos poluentes, como a hidrúca e eólica.

O teste de Correlação Cruzada mostrou que há uma correlação moderada negativa entre as séries temporais estudadas, ou seja, em boa parte das séries, ao passo que o preço do Brent subia, o preço da energia elétrica descia. O mesmo vale para a situação em que o preço da energia elétrica subia, o preço do Brent descia.

O teste de Causalidade de Granger necessitou, inicialmente, comprovar que as séries são estacionárias por meio do teste de Dickey-Fuller aumentado. Após a confirmação, o teste de Causalidade de Granger mostrou que não há evidências estatísticas que apontem para Granger de uma série temporal para outra.

Uma possível justificativa que demonstre essa falta de causalidade é a baixa representatividade do petróleo na matriz elétrica brasileira, ou seja, com as variações do preço da *commodity*, não há previsibilidade do preço da energia elétrica no Brasil.

Para desenvolvimento de trabalhos futuros, incentiva-se o levantamento de séries temporais dos preços das energias renováveis no Brasil individualmente, como solar, eólica, e biomassa dado o potencial que o país possui em gerar essas energias e poder diversificar sua matriz elétrica.

REFERÊNCIAS

ABBUD, Omar Alves; TANCREDI, Márcio. **Transformações recentes da matriz brasileira de geração de energia elétrica – causas e impactos principais**. 2010 Disponível em: <<http://www12.senado.gov.br/publicacoes/estudos-legislativos/tipos-de-estudos/textos-para-discussao/td-69-transformacoes-recen-tes-da-matriz-brasileira-de-geracao-de-energia--eletrica-causas-e-impactos-principais>>. Acesso em 10 nov. 2021

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (Brasil)- ANEEL. 2º Ed. Brasília-DF: **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 2008 Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/atlas3ed.pdf>>

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (Brasil)- ANEEL. 2º Ed. Brasília-DF: **Atlas de energia elétrica do Brasil: Energia Hidráulica**. 2005 P. Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/04-Energia_Hidraulica\(2\).pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/04-Energia_Hidraulica(2).pdf)> Acesso em 18 out. 2021

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (Brasil)- ANEEL. **Entenda como a matriz elétrica brasileira está mudando**. 2021. Disponível em: <<https://www.gov.br/pt-br/noticias/energia-minerais-e-combustiveis/2021/08/entenda-como-a-matriz-eletrica-brasileira-esta-mudando>> Acesso em 01 nov. 2021

ALVES, Jose Jakson Amancio. **Potencial eólico na direção predominante do vento no Nordeste do Brasil**. Campina Grande. Departamento de Ciências Atmosféricas, Universidade Federal da Paraíba, Dissertação (Mestrado em Meteorologia), 125pp. 2006.

AMANCIO, Jose Jakson Alves. **Estimativa da Potência, Perspectiva e Sustentabilidade da Energia Eólica no Estado do Ceará**. Campina Grande. Universidade Federal de Campina Grande. Centro de Tecnologia e Recursos Naturais. Pós-Graduação em Recursos Naturais. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) 163p, 2016

Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica (ABRADEE). **Tarifas de energia**. 2018. Disponível em: <<https://www.abradee.org.br/setor-de-distribuicao/tarifas-de-energia/>> Acesso em 10 nov. 2021.

Banco Central do Brasil. **Metodologia da Correção pelos Índices**. 2021 Disponível em: <<https://www3.bcb.gov.br/CALCIDADAOPublico/metodologiaCorrigirIndice.do?method=metodologiaCorrigirIndice>> Acesso em 10 nov. 2021

BEN, Balanço Energético Nacional, **Relatório Síntese**. 2021a Disponível em <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2021>> Acesso em 15 jul. 2021

BEN, Balanço Energético Nacional, **Manual Metodológico**. 2021b. Acesso em 10 nov. 2021.

CANELAS, De Souza A. L. **Evolução da importância econômica da indústria de petróleo e gás natural no Brasil: contribuição a variáveis macroeconômicas.** Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, 2007.

CARCANHOLO, R. A. Oferta e demanda e o valor em Marx. In: Revista da SEP, n. 20, 2007.

CARNEIRO, F.G. **A Metodologia dos Testes de Causalidade em Economia.** Universidade de Brasília. 1997. Disponível em: <<http://www.angelfire.com/id/SergioDaSilva/causal.pdf>> Acesso em 03 jul. 2021

DUNN, S; HOLLOWAY, J. **The Pricing of Crude Oil.** 2012 Disponível em: <<https://www.semanticscholar.org/paper/The-Pricing-Of-Crude-Oil-Dunn-Holloway/389a6aabe95a334d0d9eed72a6942b1e04b0a96f>> Acesso em 19 jul. 2021

EPE, Empresa de Pesquisa Energética, **Matriz Energética e Elétrica.** 2020 Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>> Acesso em 10 jul. 2021.

FEREIRA, R.; COSTA, R.; MAIA, S. F. **Análise Da Volatilidade Do Preço Do Petróleo Em Um Contexto De Crise.** Revista Economia e Desenvolvimento, v. 15, n. 2, p. 184–197, 2017.

FULLER, W. A. (1976). **Introduction to Statistical Time Series.** New York:.. ISBN 0-471-28715-6.

GUJARATI, D. N. E D. C. PORTER, **ECONOMETRIA BÁSICA** v.8, 2011

GRANGER, C.W.J. **Investigating causal relations by econometric models and cross-spectral models,** *Econometrica*, (1969) 34, 541-51.

GRANT, M. **Brent Crude vs. West Texas Intermediate: The Differences.** 2019. Disponível em: <<https://www.investopedia.com/ask/answers/052615/what-difference-between-brent-crude-and-west-texas-intermediate.asp>> Acesso em 30 jun. 2021.

INDEXMUNDI. **Crude Oil (petroleum); Dated Brent Monthly Price.** 2021 Disponível em: <<https://www.indexmundi.com/commodities/?commodity=crude-oil-brent>> Acesso em 09 ago. 2021

International Energy Agency (IEA). **Data and Statistics.** 2021. Disponível em: <<https://www.iea.org/data-and-statistics/databrowser?country=WORLD&fuel=Energy%20supply&indicator=ElecGenByFuel>> Acesso em 20 out. 2021

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (IPEA). **"Os limites do preço do petróleo."** 2017 Disponível em <https://www.ipea.gov.br/desafios/index.php?option=com_content&view=article&id=3261&catid=28&Itemid=39> – Acesso em 10 jun. 2021

Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEADATA). **Energia elétrica referente ao consumo: tarifa média por Megawatts-hora (MWh)**. 2021 Disponível em: <<http://www.ipeadata.gov.br/Default.aspx>>. Acesso em 10 nov. 2021.

Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEADATA). **Índice geral de preços do mercado (IGP-M)**. 2021 Disponível em: <<http://www.ipeadata.gov.br/Default.aspx>>. Acesso em 10 nov. 2021.

LOPES, K., MARTINS, E., MIRANDA., **A Potencialidade Energética da Biomassa no Brasil, 2019**. RDSD v.5 n.1 (2019) p.94-106.

MUKAKA M. M.. "Statistics corner: A guide to appropriate use of correlation coefficient in medical research". **Malawi medical journal : the journal of Medical Association of Malawi**, 24(3), 69–71, 2012

OTTO, M. **Chemometrics - Statistics and Computer Application in Analytical Chemistry (3rd Edition)**. John Wiley & Sons. ISBN 978-3-527-34097-2, 2017.

PENN, C.S. **Can Causation Exist Without Correlation? Yes!** 2018. Disponível em: <<https://www.christopherspenn.com/2018/08/can-causation-exist-without-correlation/>> Acesso em 03 jul. 2021.

PETROBRAS. **"Pré-Sal."** 2018 Disponível em: <<https://petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/areas-de-atuacao/exploracao-e-producao-de-petroleo-e-gas/pre-sal/>> Acesso em 10 jul. 2021.

PLATTS. **Dated Brent: The Pricing Benchmark for Asia – Pacific Sweet Crude Oil**. 2012 Acesso em 20 nov.2021.

REIS, T. **Cotação do petróleo: entenda como funciona o preço dessa commodity**, 2018. Disponível em: <<https://www.sunoo.com.br/artigos/cotacao-do-petroleo/>> Acesso em 20 out. 2021.

RICO. **Oil Pricing**. 2020. Disponível em: <<https://www.nrcan.gc.ca/our-natural-resources/energy-sources-distribution/clean-fossil-fuels/crude-oil/oil-pricing/18087>> Acesso em 30 jun. 2021

RIO OIL AND GAS. **Indústria de óleo e gás vive caminho da transição energética. 2020**. Disponível em: <<https://www.rioilgas.com.br/noticias/industria-de-oleo-e-gas-vive-caminho-da-transicao-energetica/>>. Acesso em 28 out. 2021

SANTOS, L. **Qual é o tamanho do potencial energético do Brasil?**. 2021. Disponível em: <<https://cfa.org.br/qual-e-o-tamanho-do-potencial-energetico-do-brasil/>>. Acesso em 29 dez. 2021

SOUZA, V. H. A. de. **Aspectos sustentáveis da biomassa como recurso energético**. 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.15202/19811896.2015v20n40p105>>. Acesso em 13 Ago. 2021

SCHWARZ, G. **Estimating the dimension of a model**. Annals of Statistics 6 (2), 1978. Disponível em: <https://projecteuclid.org/download/pdf_1/euclid.aos/1176344136> Acesso em 19 jul. 2021.

TORO. **Commodities – o que são commodities?** 2019. Disponível em: <<https://blog.toroinvestimentos.com.br/commodities-o-que-sao>> Acesso em 30 jun. 2021.

TRADING ECONOMICS. **Brent Crude Oil**, 2021. Disponível em: <<https://tradingeconomics.com/commodity/crude-oil>>. Acesso em 10 ago. 2021

U.S. Geological Survey (USGS). **Mineral Commodity Summaries**, 2021 Disponível em: <<https://www.usgs.gov/centers/nmic/mineral-commodity-summaries>>. Acesso em 20 out. 2021

XP. **Commodities: O que são e como funcionam (Guia Completo)**. 2019. Disponível em: <<https://blog.xpi.com.br/commodities/>> Acesso em 30 jun. 2021.

ZAINOTZ, C. **Real Statistics**. [s.d.]. Disponível em: <<https://www.real-statistics.com>> Acesso em 09 set. 2021

APÊNDICE A - CRONOGRAMA DO TRABALHO

Tabela 10 – Cronograma de progresso

Atividade	Data
Definição do Orientador	ABRIL
Formulário Padrão de Anuência de orientador	MAIO
Análise Crítica de dois trabalhos científicos ou técnicos	MAIO
Entrega do Trabalho Escrito – versão parcial	JUNHO
Revisão Bibliográfica e Metodologia	JULHO
Entrega do Trabalho Escrito – versão final	JULHO
Pesquisa dos preços e aplicação dos testes estatísticos	SETEMBRO
Análise crítica do trabalho feito	OUTUBRO
Conclusão das análises	OUTUBRO
Revisão do trabalho final	NOVEMBRO
Preparação da apresentação final	NOVEMBRO
Entrega da Versão Final do TCC	NOVEMBRO

Fonte: Autoria própria

APÊNDICE B - BASE DE DADOS

Tabela 11 - Base de dados do preço do petróleo Brent

Data	Preço Bruto (R\$/Barril)	Preço Convertido (R\$/kWh)	IGP-M	Preço Deflacionado (R\$/kWh)	Taxa de variação (%)
2011.07	182,10	0,110	-0,12	0,256	0,00%
2011.08	175,65	0,106	0,44	0,247	-3,43%
2011.09	192,73	0,117	0,65	0,270	9,24%
2011.10	194,83	0,118	0,53	0,271	0,44%
2011.11	196,03	0,119	0,5	0,271	0,09%
2011.12	197,60	0,120	-0,12	0,272	0,30%
2012.01	199,16	0,121	0,25	0,274	0,91%
2012.02	205,84	0,125	-0,06	0,283	3,10%
2012.03	223,65	0,136	0,43	0,308	8,72%
2012.04	222,89	0,135	0,85	0,305	-0,77%
2012.05	218,10	0,132	1,02	0,296	-2,97%
2012.06	195,75	0,119	0,66	0,263	-11,15%
2012.07	209,30	0,127	1,34	0,280	6,22%
2012.08	230,08	0,139	1,43	0,303	8,47%
2012.09	229,99	0,139	0,97	0,299	-1,45%
2012.10	227,37	0,138	0,02	0,293	-2,09%
2012.11	225,83	0,137	-0,03	0,291	-0,70%
2012.12	228,51	0,138	0,68	0,294	1,22%
2013.01	229,62	0,139	0,34	0,294	-0,19%
2013.02	229,92	0,139	0,29	0,293	-0,21%
2013.03	216,46	0,131	0,21	0,275	-6,13%
2013.04	206,07	0,125	0,15	0,261	-5,00%
2013.05	209,07	0,127	0	0,265	1,30%
2013.06	223,62	0,136	0,75	0,283	6,96%
2013.07	242,13	0,147	0,26	0,304	7,47%
2013.08	259,47	0,157	0,15	0,325	6,88%
2013.09	253,75	0,154	1,5	0,318	-2,35%
2013.10	240,23	0,146	0,86	0,296	-6,73%
2013.11	247,37	0,150	0,29	0,302	2,09%
2013.12	259,62	0,157	0,6	0,316	4,65%
2014.01	255,83	0,155	0,48	0,310	-2,05%
2014.02	260,12	0,158	0,38	0,314	1,19%
2014.03	250,45	0,152	1,67	0,301	-4,08%
2014.04	240,89	0,146	0,78	0,285	-5,40%
2014.05	243,66	0,148	-0,13	0,286	0,37%
2014.06	250,52	0,152	-0,74	0,294	2,95%
2014.07	237,66	0,144	-0,61	0,281	-4,43%
2014.08	231,29	0,140	-0,27	0,275	-2,08%
2014.09	226,53	0,137	0,2	0,270	-1,79%
2014.10	213,85	0,130	0,28	0,255	-5,79%
2014.11	199,74	0,121	0,98	0,237	-6,86%

Data	Preço Bruto (R\$/Barril)	Preço Convertido (R\$/kWh)	IGP-M	Preço Deflacionado (R\$/kWh)	Taxa de variação (%)
2014.12	164,10	0,099	0,62	0,193	-18,64%
2015.01	126,59	0,077	0,76	0,148	-23,33%
2015.02	162,46	0,098	0,27	0,188	27,37%
2015.03	173,65	0,105	0,98	0,201	6,60%
2015.04	181,61	0,110	1,17	0,208	3,57%
2015.05	197,02	0,119	0,41	0,223	7,23%
2015.06	194,22	0,118	0,67	0,219	-1,82%
2015.07	179,61	0,109	0,69	0,201	-8,14%
2015.08	164,57	0,100	0,28	0,183	-9,00%
2015.09	183,81	0,111	0,95	0,204	11,38%
2015.10	186,97	0,113	1,89	0,205	0,76%
2015.11	168,12	0,102	1,52	0,181	-11,75%
2015.12	145,93	0,088	0,49	0,155	-14,50%
2016.01	124,61	0,076	1,14	0,132	-15,03%
2016.02	131,75	0,080	1,29	0,138	4,54%
2016.03	145,59	0,088	0,51	0,150	9,10%
2016.04	150,82	0,091	0,33	0,155	3,07%
2016.05	166,37	0,101	0,82	0,170	9,95%
2016.06	167,30	0,101	1,69	0,170	-0,26%
2016.07	147,64	0,089	0,18	0,147	-13,22%
2016.08	147,97	0,090	0,15	0,147	0,04%
2016.09	150,38	0,091	0,2	0,150	1,48%
2016.10	158,58	0,096	0,16	0,157	5,24%
2016.11	154,64	0,094	-0,03	0,153	-2,64%
2016.12	181,79	0,110	0,54	0,180	17,59%
2017.01	175,91	0,107	0,64	0,173	-3,75%
2017.02	172,32	0,104	0,08	0,169	-2,66%
2017.03	162,30	0,098	0,01	0,159	-5,89%
2017.04	166,04	0,101	-1,1	0,163	2,29%
2017.05	162,98	0,099	-0,93	0,161	-0,75%
2017.06	154,32	0,094	-0,67	0,154	-4,42%
2017.07	156,19	0,095	-0,72	0,157	1,89%
2017.08	161,76	0,098	0,1	0,164	4,32%
2017.09	172,77	0,105	0,47	0,175	6,70%
2017.10	183,35	0,111	0,2	0,185	5,63%
2017.11	204,15	0,124	0,52	0,205	11,12%
2017.12	211,19	0,128	0,89	0,211	2,91%
2018.01	222,08	0,135	0,76	0,220	4,23%
2018.02	211,99	0,128	0,07	0,209	-5,26%
2018.03	217,82	0,132	0,64	0,214	2,68%
2018.04	244,04	0,148	0,57	0,238	11,32%
2018.05	278,36	0,169	1,38	0,270	13,42%
2018.06	283,46	0,172	1,87	0,272	0,45%
2018.07	284,69	0,173	0,51	0,268	-1,41%
2018.08	287,34	0,174	0,7	0,269	0,42%

Data	Preço Bruto (R\$/Barril)	Preço Convertido (R\$/kWh)	IGP-M	Preço Deflacionado (R\$/kWh)	Taxa de variação (%)
2018.09	324,53	0,197	1,52	0,302	12,16%
2018.10	302,39	0,183	0,89	0,277	-8,22%
2018.11	246,60	0,149	-0,49	0,224	-19,17%
2018.12	219,45	0,133	-1,08	0,200	-10,57%
2019.01	221,65	0,134	0,01	0,204	2,11%
2019.02	238,73	0,145	0,88	0,220	7,70%
2019.03	255,41	0,155	1,26	0,233	6,05%
2019.04	277,36	0,168	0,92	0,250	7,24%
2019.05	282,12	0,171	0,45	0,252	0,79%
2019.06	244,23	0,148	0,8	0,217	-13,82%
2019.07	241,75	0,147	0,4	0,213	-1,80%
2019.08	238,15	0,144	-0,67	0,209	-1,88%
2019.09	256,74	0,156	-0,01	0,227	8,53%
2019.10	242,74	0,147	0,68	0,215	-5,44%
2019.11	260,11	0,158	0,3	0,229	6,43%
2019.12	271,15	0,164	2,09	0,238	3,93%
2020.01	263,77	0,160	0,48	0,227	-4,71%
2020.02	238,80	0,145	-0,04	0,204	-9,90%
2020.03	161,05	0,098	1,24	0,138	-32,53%
2020.04	124,29	0,075	0,8	0,105	-23,77%
2020.05	175,31	0,106	0,28	0,147	39,93%
2020.06	208,06	0,126	1,56	0,174	18,35%
2020.07	225,85	0,137	2,23	0,186	6,88%
2020.08	241,69	0,146	2,74	0,195	4,68%
2020.09	222,08	0,135	4,34	0,174	-10,56%
2020.10	227,65	0,138	3,23	0,171	-1,76%
2020.11	234,83	0,142	3,28	0,171	-0,07%
2020.12	255,76	0,155	0,96	0,180	5,45%
2021.01	292,37	0,177	2,58	0,204	13,23%
2021.02	335,57	0,203	2,53	0,228	11,89%
2021.03	368,03	0,223	2,94	0,244	6,97%
2021.04	360,22	0,218	1,51	0,232	-4,92%
2021.05	360,31	0,218	4,1	0,229	-1,46%
2021.06	367,27	0,223	0,6	0,224	-2,08%

Fonte: Indexmundi (2021)

Tabela 12 - Base de dados do preço da energia elétrica

Série temporal mensal - Energia elétrica					
Data	Preço Bruto (R\$/MWh)	Preço Convertido (R\$/kWh)	IGP-M	Preço Deflacionado (R\$/kWh)	Taxa de variação (%)
2011.07	281,60	0,282	-0,12	0,653	0,00%
2011.08	281,00	0,281	0,44	0,652	-0,09%
2011.09	282,46	0,282	0,65	0,652	0,08%
2011.10	284,88	0,285	0,53	0,654	0,21%
2011.11	286,33	0,286	0,5	0,654	-0,02%
2011.12	285,60	0,286	-0,12	0,649	-0,75%
2012.01	290,30	0,290	0,25	0,660	1,77%
2012.02	286,65	0,287	-0,06	0,650	-1,50%
2012.03	286,61	0,287	0,43	0,651	0,05%
2012.04	286,44	0,286	0,85	0,647	-0,49%
2012.05	293,34	0,293	1,02	0,657	1,55%
2012.06	293,68	0,294	0,66	0,652	-0,89%
2012.07	293,84	0,294	1,34	0,648	-0,60%
2012.08	293,34	0,293	1,43	0,638	-1,49%
2012.09	294,11	0,294	0,97	0,631	-1,15%
2012.10	296,87	0,297	0,02	0,630	-0,03%
2012.11	298,86	0,299	-0,03	0,634	0,65%
2012.12	300,76	0,301	0,68	0,639	0,67%
2013.01	302,11	0,302	0,34	0,637	-0,23%
2013.02	257,56	0,258	0,29	0,541	-15,04%
2013.03	243,11	0,243	0,21	0,510	-5,88%
2013.04	243,18	0,243	0,15	0,509	-0,18%
2013.05	247,56	0,248	0	0,517	1,65%
2013.06	247,71	0,248	0,75	0,517	0,06%
2013.07	247,56	0,248	0,26	0,513	-0,80%
2013.08	248,28	0,248	0,15	0,513	0,03%
2013.09	250,14	0,250	1,5	0,516	0,60%
2013.10	252,59	0,253	0,86	0,514	-0,51%
2013.11	257,64	0,258	0,29	0,520	1,13%
2013.12	255,89	0,256	0,6	0,515	-0,97%
2014.01	256,96	0,257	0,48	0,514	-0,18%
2014.02	255,81	0,256	0,38	0,509	-0,92%
2014.03	257,24	0,257	1,67	0,510	0,18%
2014.04	258,81	0,259	0,78	0,504	-1,04%
2014.05	268,94	0,269	-0,13	0,520	3,11%
2014.06	269,83	0,270	-0,74	0,523	0,46%
2014.07	273,61	0,274	-0,61	0,534	2,16%
2014.08	282,44	0,282	-0,27	0,554	3,86%
2014.09	290,90	0,291	0,2	0,573	3,27%
2014.10	295,91	0,296	0,28	0,581	1,52%
2014.11	299,87	0,300	0,98	0,587	1,06%
2014.12	304,54	0,305	0,62	0,591	0,57%
2015.01	316,04	0,316	0,76	0,609	3,14%
2015.02	320,58	0,321	0,27	0,613	0,67%
2015.03	357,85	0,358	0,98	0,683	11,33%

Data	Preço Bruto (R\$/MWh)	Preço Convertido (R\$/kWh)	IGP-M	Preço Deflacionado (R\$/kWh)	Taxa de variação (%)
2015.04	398,57	0,399	1,17	0,753	10,30%
2015.05	404,18	0,404	0,41	0,755	0,23%
2015.06	411,77	0,412	0,67	0,766	1,46%
2015.07	417,50	0,418	0,69	0,772	0,72%
2015.08	417,13	0,417	0,28	0,766	-0,77%
2015.09	416,82	0,417	0,95	0,763	-0,35%
2015.10	418,10	0,418	1,89	0,758	-0,64%
2015.11	422,88	0,423	1,52	0,752	-0,73%
2015.12	428,12	0,428	0,49	0,750	-0,28%
2016.01	432,49	0,432	1,14	0,754	0,53%
2016.02	431,99	0,432	1,29	0,745	-1,24%
2016.03	423,89	0,424	0,51	0,722	-3,12%
2016.04	419,01	0,419	0,33	0,710	-1,65%
2016.05	418,97	0,419	0,82	0,707	-0,34%
2016.06	419,43	0,419	1,69	0,702	-0,70%
2016.07	416,09	0,416	0,18	0,685	-2,44%
2016.08	410,94	0,411	0,15	0,675	-1,42%
2016.09	421,76	0,422	0,2	0,692	2,48%
2016.10	421,53	0,422	0,16	0,690	-0,25%
2016.11	412,92	0,413	-0,03	0,675	-2,20%
2016.12	410,04	0,410	0,54	0,671	-0,67%
2017.01	407,87	0,408	0,64	0,664	-1,06%
2017.02	406,43	0,406	0,08	0,657	-0,99%
2017.03	414,41	0,414	0,01	0,669	1,88%
2017.04	401,23	0,401	-1,1	0,648	-3,19%
2017.05	399,24	0,399	-0,93	0,652	0,61%
2017.06	413,75	0,414	-0,67	0,682	4,61%
2017.07	411,97	0,412	-0,72	0,684	0,24%
2017.08	424,82	0,425	0,1	0,710	3,87%
2017.09	428,95	0,429	0,47	0,716	0,87%
2017.10	440,75	0,441	0,2	0,733	2,27%
2017.11	458,47	0,458	0,52	0,761	3,81%
2017.12	455,46	0,455	0,89	0,752	-1,17%
2018.01	437,34	0,437	0,76	0,715	-4,83%
2018.02	426,19	0,426	0,07	0,692	-3,28%
2018.03	427,48	0,427	0,64	0,694	0,23%
2018.04	436,12	0,436	0,57	0,703	1,37%
2018.05	448,34	0,448	1,38	0,719	2,22%
2018.06	472,62	0,473	1,87	0,747	3,98%
2018.07	500,70	0,501	0,51	0,777	4,00%
2018.08	507,61	0,508	0,7	0,784	0,87%
2018.09	513,42	0,513	1,52	0,787	0,44%
2018.10	517,95	0,518	0,89	0,782	-0,63%
2018.11	507,01	0,507	-0,49	0,759	-2,98%
2018.12	490,73	0,491	-1,08	0,738	-2,73%
2019.01	489,75	0,490	0,01	0,745	0,89%
2019.02	487,44	0,487	0,88	0,741	-0,48%
2019.03	492,41	0,492	1,26	0,742	0,14%

Data	Preço Bruto (R\$/MWh)	Preço Convertido (R\$/kWh)	IGP-M	Preço Deflacionado (R\$/kWh)	Taxa de variação (%)
2019.04	497,65	0,498	0,92	0,741	-0,19%
2019.05	506,27	0,506	0,45	0,747	0,80%
2019.06	505,47	0,505	0,8	0,742	-0,61%
2019.07	511,58	0,512	0,4	0,745	0,41%
2019.08	532,43	0,532	-0,67	0,773	3,66%
2019.09	537,23	0,537	-0,01	0,785	1,58%
2019.10	527,81	0,528	0,68	0,771	-1,74%
2019.11	527,09	0,527	0,3	0,765	-0,81%
2019.12	523,93	0,524	2,09	0,758	-0,90%
2020.01	514,56	0,515	0,48	0,729	-3,80%
2020.02	507,30	0,507	-0,04	0,716	-1,88%
2020.03	502,38	0,502	1,24	0,709	-0,93%
2020.04	499,55	0,500	0,8	0,696	-1,78%
2020.05	494,78	0,495	0,28	0,684	-1,74%
2020.06	490,81	0,491	1,56	0,677	-1,08%
2020.07	506,53	0,507	2,23	0,688	1,62%
2020.08	511,38	0,511	2,74	0,679	-1,24%
2020.09	510,73	0,511	4,34	0,660	-2,79%
2020.10	514,16	0,514	3,23	0,637	-3,52%
2020.11	522,23	0,522	3,28	0,627	-1,61%
2020.12	554,39	0,554	0,96	0,644	2,79%
2021.01	563,78	0,564	2,58	0,649	0,73%
2021.02	531,48	0,531	2,53	0,596	-8,10%
2021.03	535,27	0,535	2,94	0,586	-1,77%
2021.04	536,76	0,537	1,51	0,571	-2,59%
2021.05	553,23	0,553	4,1	0,579	1,54%
2021.06	581,27	0,581	0,6	0,585	0,93%

Fonte: IPEADATA(2021)

ANEXO A – ARTIGO SÍNTESE

Universidade de São Paulo

Engenharia de Petróleo – Escola Politécnica

Número: 9008602USP

Data: 26/11/2021



Relação entre o preço do petróleo e da energia elétrica no Brasil

Gustavo Borges Feitosa

Orientador: Prof. Regina Meyer Branski

Artigo Sumário referente à disciplina PMI3349 – Trabalho de Conclusão de Curso II

Este artigo foi preparado como requisito para completar o curso de Engenharia de Petróleo na Escola Politécnica da USP.

Template versão 2021v01.

Resumo

O objetivo do trabalho é identificar padrões e relações entre o preço médio mensal do petróleo Brent e da energia elétrica no Brasil entre os anos de 2011 e 2021. Após o levantamento dos dados foram aplicados os seguintes testes estatísticos: Correlação Cruzada e Causalidade de Granger. O primeiro observa se há uma relação de força e direção entre os preços ao longo do tempo. Já o segundo teste mostra se um preço pode interferir no futuro de outro de alguma maneira. A Correlação Cruzada indicou existir direção negativa e força moderada entre os preços. Já a Causalidade de Granger indicou que não há causalidade no sentido de Granger entre o preço do petróleo e o preço da energia elétrica, nem entre o preço da energia elétrica e o do petróleo.

Abstract

The objective of the work is to identify patterns and relationships between the monthly average price of Brent oil and electricity in Brazil between the years 2011 and 2021. After collecting the data, the following statistical tests were applied: Cross Correlation and Causality of Granger. The first looks at whether there is a relationship of strength and direction between prices over time. The second test shows whether one price can interfere in the future of another in any way. The Cross Correlation indicated that there is a negative direction and moderate strength between prices. Granger's Causality, on the other hand, indicated that there is no causality in Granger's sense between the price of oil and the price of electricity, nor between the price of electricity and that of oil.

Introdução

O petróleo é a fonte de energia predominante na atualidade e, desde os primórdios da história moderna, assume um papel fundamental na produção de combustíveis, tais como diesel e gasolina. Devido ao crescimento da demanda ao longo dos séculos, o petróleo se mostrou um recurso estratégico para as nações, trazendo influência e poder para aqueles que o possuem. Muitos conflitos e guerras ao longo da história foram causados por ser tão cobiçado e pela dependência mundial por esse bem mineral.

O Brasil, por conta das descobertas do pré-sal em 2006, tornou-se o sétimo maior

produtor de petróleo do mundo (PETROBRAS, 2018), e vem aumentando ainda mais sua produção. Ao mesmo tempo, tem grande potencial para geração de energias renováveis como hidroelétrica, solar e eólica. Como outros países do mundo, o Brasil deve se adaptar a um novo padrão global, reduzindo o uso de combustíveis fósseis e causando menor impacto ao meio ambiente.

O petróleo é uma commodity e seu preço é determinado pela oferta e demanda por óleo no mercado mundial. Ou seja, o preço do barril de petróleo é dado pela combinação entre aqueles que desejam vender e aqueles que desejam comprar. Além disso, depende também de fatores geográficos e políticos. O West Texas Intermediate (WTI) e Brent Crude (Brent) são as duas principais classificações comerciais de óleo bruto. Estima-se que 60% do petróleo mundial é cotado em termos do petróleo Brent e são explorados de reservas offshore (REIS, 2018).

Muitas empresas do setor de petróleo – como Petrobras, ExxonMobil, BP e Equinor – estão investindo no mercado de energias renováveis (RIO OIL AND GAS, 2020). Assim, recursos provenientes da exploração e produção do petróleo devem financiar, pelo menos em parte, a transição mundial para as novas energias.

Metodologia

Inicialmente, foi realizada a coleta de dados dos preços médios mensais do petróleo tipo Brent nos últimos 10 anos, de julho de 2011 até junho de 2021 (INDEXMUNDI, 2021). Vale ressaltar a proximidade entre os preços do barril tipo Brent e o WTI, porém optou-se pelos preços do Brent, pois é a cotação utilizada pela Petrobras, maior empresa exploradora de petróleo do Brasil, para negociar a commodity.

Os preços médios mensais da energia elétrica no Brasil foram obtidos no site do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEADATA, 2021) e abrangeu o período de julho de 2011 até junho de 2021.

Para o tratamento de dados foi feita conversão de unidades das séries coletadas para se chegar a uma unidade em comum. O preço do petróleo tinha como unidade de medida R\$/barril, e o da energia elétrica R\$/kWh. Os dados do petróleo foram transformados de R\$/barril para R\$/kWh utilizando a unidade de conversão proposta pelo Manual Metodológico do Balanço Energético Nacional (BEN, 2021b). Segundo o Manual, 1 barril equivale igual à $1,65 \cdot 10^3$ kWh.

Já com relação ao preço da energia elétrica, os dados brutos foram extraídos com a unidade de medida R\$/MWh. Com isso, houve apenas a conversão de R\$/MWh para R\$/kWh, dado que:

$$1 \text{ M (mega)} = 10^6 \quad \text{e} \quad 1 \text{ k (kilo)} = 10^3$$

Após essa etapa, os dados foram deflacionados utilizando como deflator o Índice Geral de Preços – Mercado (IGP-M) calculado pela Fundação Getúlio Vargas (FGV) e disponibilizado pelo IPEADATA (2021). Deflacionar é aplicar um deflator a uma série e transformar valores nominais (preços correntes) em valores reais (preços constantes) (IPEA, 2017). Dessa forma é possível comparar valores entre períodos eliminando o efeito da inflação. O mês utilizado como mês-base foi junho de 2021. Esse índice foi escolhido como deflator porque é utilizado para reajuste de algumas tarifas públicas, entre elas a energia elétrica.

Segundo o Banco Central do Brasil (2021), para deflacionar um valor basta multiplicar o valor a ser corrigido pelo fator acumulado do índice de referência, ou seja, produto dos índices mensais de $(IGP-M/100) + 1$. Por exemplo, para se deflacionar um valor de junho de 2011 para os dias de hoje, calculamos o produto de índices mensais de IGP-M até o mês atual e o multiplicamos pelo valor nominal de junho de 2011.

Após o tratamento dos dados, foram plotados gráficos para uma análise visual inicial, observando a existência de padrões ou relações entre os dados. Em seguida foram calculadas

medidas estatísticas como a média, mediana, variância e desvios padrão.

Finalmente, foram aplicados os testes de Correlação Cruzada e de Causalidade de Granger. Para o Teste de Correlação Cruzada foi utilizado o pacote de Excel: Miscellaneous Time Series Topics – Cross Correlations (Zaiontz, [s.d.]). Foi adotado o critério de Mukaka (2012) para determinar a existência de associação (força e direção) entre os dados (Tabela 1):

Tabela 13 - Critérios de correlação

Intervalo de R	Tipo de Correlação
0.9 a 1	Correlação positiva muito forte
0.7 a 0.89	Correlação positiva forte
0.4 a 0.69	Correlação positiva moderada
0.2 a 0.39	Correlação positiva fraca
0.01 a 0.19	Correlação positiva bem fraca
0	Sem Correlação
-0.19 a -0.01	Correlação negativa bem fraca
-0.39 a -0.2	Correlação negativa fraca
-0.69 a -0.4	Correlação negativa moderada
-0.89 a -0.7	Correlação negativa forte
-1 a -0.9	Correlação negativa muito forte

Fonte: Mukaka (2012)

Para aplicação do Teste de Correlação de Granger foi utilizado o pacote de Excel: Miscellaneous Time Series Topics - Granger Causality (Zaiontz, [s.d.]). Antes da aplicação do teste, é necessário verificar se a série temporal é estacionária. Para avaliar essa condição, utilizou-se o teste de Dickey-Fuller aumentado. Com isso o trabalho conclui seu objetivo, analisando os resultados para identificar padrões e relações entre preço do petróleo e da energia elétrica.

Resultados

Preços do petróleo e da energia elétrica

Inicialmente foram coletados dados dos preços mensais do petróleo Brent de julho de 2011 até junho de 2021. Além disso, foram coletados os dados da energia elétrica no Brasil para o mesmo período. Por fim, para deflacionar os dados (mês-base junho de 2021), foi coletado o IGP-M também do mesmo período. Em seguida, os preços foram convertidos para a mesma unidade (R\$/kWh), para a energia elétrica foi estabelecida a conversão 1 MWh = 10^3 kWh e para o preço do petróleo Brent 1 barril = $1,65 \cdot 10^3$ kWh.

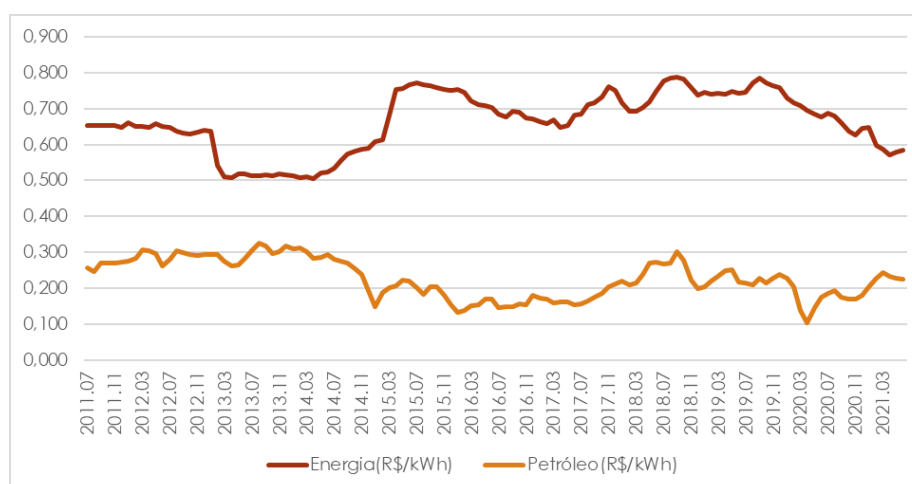
Após a conversão para uma mesma base, os preços passaram por um processo de deflação pelo IGP-M, adotando como mês-base junho de 2021, resultando na tabela 2.

Tabela 14 - Média anual dos preços do petróleo Brent e da energia elétrica convertidos

Data	Energia Elétrica (R\$/kWh)	Brent (R\$/kWh)	IGP-M
07.2011 - 06.2012	0,653	0,276	0,42
07.2012 - 06.2013	0,652	0,278	0,51
07.2013 - 06.2014	0,651	0,283	0,51
07.2014 - 06.2015	0,649	0,285	0,46
07.2015 - 06.2016	0,647	0,287	0,97
07.2016 - 06.2017	0,646	0,289	-0,06
07.2017 - 06.2018	0,645	0,291	0,56
07.2018 - 06.2019	0,643	0,292	0,53
07.2019 - 06.2020	0,634	0,293	0,59
07.2020 - 06.2021	0,622	0,290	2,59

Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 15 - Comparação Preço da Energia elétrica e do Petróleo Brent (R\$/kWh)



Fonte: Autoria própria (2021)

A Figura 1 mostra graficamente os preços médios mensais dos últimos 10 anos do petróleo Brent e o da energia elétrica no Brasil. Nota-se, primeiramente, que o preço da energia elétrica é maior que o petróleo Brent em todos os momentos da série, isso porque a energia elétrica já está em seu estado pronto para consumo, enquanto o petróleo Brent ainda passará por um processo de refinamento. O gráfico mostra a ocorrência tanto de sazonalidade quanto de eventos inesperados, por exemplo, com o início do lockdown em 2020, devido a pandemia de coronavírus, nota-se uma queda do preço do barril de petróleo, por conta da diminuição de demanda, e uma alta da energia elétrica, com o aumento da demanda. Com isso, observa-se que em alguns pontos do gráfico, quando o preço de uma série sobe, o da outra cai. Isso pode indicar uma correlação negativa que será averiguada no teste de correlação cruzada.

Teste de Correlação Cruzada

O teste de correlação cruzada foi realizado utilizando o pacote Excel: Miscellaneous Time Series Topics – Cross Correlations (Zaiontz, [s.d.]). Na tabela 3, estão exibidos os resultados obtidos.

Tabela 15 - Coeficientes de correlação cruzada entre os preços do petróleo Brent e da energia elétrica

Defasagem	Correlação
0	-0,49
1	-0,49
2	-0,51
3	-0,53
4	-0,55
5	-0,55
6	-0,53
7	-0,50
8	-0,47
9	-0,44
10	-0,41
11	-0,39
12	-0,36
Média	-0,48
Correlação	Negativa Moderada

Fonte: Autoria própria (2021)

No teste, utilizou-se um total de 12 defasagens comparando o preço do petróleo Brent com o da energia elétrica. Com isso, gerou-se 12 Coeficientes de Correlação que variaram entre -0,55 e -0,36. Consultando a Tabela 1, observamos que entre 0 e 10 defasagens, a correlação é negativa moderada e, a partir disso, a correlação passa a ser negativa e fraca. Isto é, a associação entre as duas séries, no intervalo de 0 e 10 defasagens, tem força média com direção inversa, ou seja, quando uma aumenta a outra diminui e vice-versa e acima desse valor, a força passa a ser fraca, porém com mesma direção.

Teste de Causalidade de Granger

Inicialmente, utilizou-se o Teste de Dickey-Fuller aumentado para saber se o preço do petróleo Brent e da energia elétrica representam uma série estacionária. O teste obteve resultado positivo e então, entramos no Teste de Causalidade de Granger.

Como buscamos avaliar a causalidade que pode ocorrer do preço do petróleo Brent na energia elétrica e a possível causalidade do preço da energia elétrica no preço do petróleo Brent, teremos dois pares de hipóteses:

1ª Situação:

- H_0 : Petróleo Brent não é Granger causa da energia elétrica
- H_1 : Petróleo Brent é Granger causa da energia elétrica

2ª Situação:

- H_0 : Energia elétrica não é Granger causa do petróleo Brent
- H_1 : Energia elétrica é Granger causa do petróleo Brent

Para o teste, assume-se que a confiança de α é igual a 0,05, já que é comumente utilizado na literatura. Para rejeitar H_0 , devemos calcular os valores-p com diversas defasagens para cada situação. Se algum valor for menor que α , rejeitamos a hipótese nula e aceitamos a hipótese alternativa H_1 .

Os resultados obtidos de valor-p estão apresentados nas tabelas 4 e 5. A primeira mostra os resultados para causalidade do petróleo Brent sobre a energia elétrica, já a segunda os valores-p para causalidade da energia elétrica sobre o petróleo Brent.

Tabela 4 - Valor-p: Preço do petróleo Brent causa preço energia elétrica

Defasagens	Petróleo → Energia
1	0,38
2	0,26
3	0,37
4	0,32

Fonte: Autoria própria (2021)

Tabela 5 - Valor-p: Preço da energia elétrica causa preço do petróleo Brent

Defasagens	Energia → Petróleo
1	0,27
2	0,07
3	0,16
4	0,23

Fonte: Autoria própria (2021)

Comparando os valores de cada defasagem com α , nenhum dos valores-p encontrados é menor que 0,05, portanto, falhamos em rejeitar a hipótese H_0 . Consequentemente, aceitamos que o preço do petróleo Brent não é Granger causa da energia elétrica e o preço da energia elétrica não é Granger causa do petróleo Brent. Logo, não há causalidade no sentido de Granger entre o preço do petróleo Brent e o preço da energia elétrica.

Um ponto interessante é que se o teste de Granger abordasse um coeficiente de segurança de 0,10, com defasagem de 2, negaríamos a hipótese H_0 da 2ª situação e poderíamos concluir que a energia elétrica é Granger causa do preço do petróleo Brent unilateralmente.

A não existência de causalidade entre os preços pode ser explicada de algumas formas, entre elas que a parcela de petróleo na matriz energética brasileira é de apenas 2% e, portanto, eventuais mudanças no preço do petróleo não causam flutuações consideráveis no preço futuro da energia elétrica. Além disso, podemos citar que a energia elétrica brasileira não causa alterações no preço futuro do petróleo, dado que fatores como sazonalidade local não influenciam no preço da commodity que é majoritariamente importada de outros países.

Conclusão

Para identificar eventuais relações entre o preço da energia elétrica no Brasil e o preço do petróleo Brent, utilizou-se os testes de Correlação Cruzada e o de Causalidade de Granger.

O teste de Correlação Cruzada mostrou que há uma correlação moderada negativa entre as séries temporais estudadas, ou seja, em boa parte das séries, ao passo que o preço do Brent subia, o preço da energia elétrica descia. Isso vale para a situação em que o preço da energia elétrica subia, o preço do Brent descia.

O teste de Causalidade de Granger necessitou, inicialmente, comprovar que as séries são estacionárias por meio do teste de Dickey-Fuller aumentado. Após a confirmação, o teste de Causalidade de Granger mostrou que não há causalidade entre o preço do petróleo Brent e da energia elétrica.

Uma possível justificativa que demonstre essa falta de causalidade é a baixa representatividade do petróleo na matriz elétrica brasileira, ou seja, com as variações do preço da commodity, não há previsibilidade do preço da energia elétrica no Brasil.

Para desenvolvimento de trabalhos futuros, incentiva-se o levantamento de séries temporais dos preços das energias renováveis no Brasil individualmente, como solar, eólica, e biomassa, dado o potencial que o país possui em gerar essas energias e poder diversificar sua matriz elétrica. Com esse tipo de abordagem, possivelmente, poderíamos identificar alguma relação de Causalidade de Granger que não

Referências

Banco Central do Brasil. **Metodologia da Correção pelos Índices**. 2021 Disponível em: <https://www3.bcb.gov.br/CALCIDADAO/publico/metodologiaCorrigirIndice.do?method=metodologiaCorrigirIndice> Acesso em 10 nov. 2021

BEN, Balanço Energético Nacional, **Manual Metodológico**. 2021b. Acesso em 10 nov. 2021.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (IPEA). **"Os limites do preço do petróleo."** 2017 Disponível em https://www.ipea.gov.br/desafios/index.php?option=com_content&view=article&id=3261&catid=28&Itemid=39. – Acesso em 10 jun. 2021

Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipeadata). **Energia elétrica referente ao consumo: tarifa média por Megawatts-hora (MWh)**. 2021 Disponível em: <http://www.ipeadata.gov.br/Default.aspx>. Acesso em 10 nov. 2021.

Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipeadata). **Índice geral de preços do mercado (IGP-M)**. 2021 Disponível em: <http://www.ipeadata.gov.br/Default.aspx>. Acesso em 10 nov. 2021.

Indexmundi. **Crude Oil (petroleum); Dated Brent Monthly Price**. 2021 Disponível em: <https://www.indexmundi.com/commodities/?commodity=crude-oil-brent> Acesso em 09 ago. 2021

MUKAKA M. M.. **"Statistics corner: A guide to appropriate use of correlation coefficient in medical research"**. Malawi medical journal : the journal of Medical Association of Malawi, 24(3), 69–71, 2012

Petrobras. **"Pré-Sal."** 2018 Disponível em: <https://petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/areas-de-atuacao/exploracao-e-producao-de-petroleo-e-gas/pre-sal/> Acesso em 10 jul. 2021.

REIS, T. **Cotação do petróleo: entenda como funciona o preço dessa commodity**, 2018. Disponível em: <https://www.sun0.com.br/artigos/cotacao-do-petroleo/> Acesso em 20 out. 2021.

RIO OIL AND GAS. **Indústria de óleo e gás vive caminho da transição energética**. 2020. Disponível em: <https://www.riooilgas.com.br/noticias/industria-de-oleo-e-gas-vive-caminho-da-transicao-energetica/>. Acesso em 28 out. 2021

ZAINOTZ, C. **Real Statistics**. [s.d.]. Disponível em: <https://www.real-statistics.com> Acesso em 09 set. 2021