

SYDNEY HASHIMOTO OKU

**RELAÇÃO ENTRE O PREÇO DO PETRÓLEO E DAS ENERGIAS
RENOVÁVEIS**

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

SANTOS

2020

SYDNEY HASHIMOTO OKU

**RELAÇÃO ENTRE O PREÇO DO PETRÓLEO E DAS ENERGIAS
RENOVÁVEIS**

**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 Econômica

Orientadora: Prof. Dra.Regina Meyer Branski

SANTOS

2020

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

Oku, Sydney Hashimoto RELAÇÃO ENTRE O PREÇO DO PETRÓLEO E DAS ENERGIASRENOVÁVEIS / S. H. Oku -- São Paulo, 2020. 74 p.
Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de SãoPaulo. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo.
1.Preço do petróleo 2.Preço das energias renováveis 3.Teste de Correlação Cruzada 4.Teste de Causalidade de Granger I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo II.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço aos meus pais e às minhas tias, que sempre se esforçaram para que eu tivesse uma educação de primeira linha. Agradeço ao meu irmão, que sempre que podia tirava minhas dúvidas durante a escola e a faculdade. Agradeço aos professores do Colégio Santa Maria que contribuíram com minha formação durante o ensino fundamental e médio. Agradeço aos professores do Anglo Vestibulares da unidade Tamandaré que me fizeram ver o quanto a área de exatas é fascinante. Agradeço a minha orientadora, Regina Branski, que mesmo com as dificuldades neste ano conseguiu encontrar tempo para me orientar neste trabalho. Agradeço a todos os funcionários da Escola Politécnica do campus de Santos que propiciaram o funcionamento da faculdade durante minha formação.

RESUMO

O petróleo é a fonte de energia mais utilizada em todo o mundo. Apesar disso, sua utilização vem sendo questionada devido a poluição e aos impactos ambientais que sua exploração e produção causam. Grandes empresas do setor petróleo vêm acompanhando essas mudanças e expandindo suas atividades para atuar também no segmento de energias renováveis. O objetivo do trabalho foi identificar padrões e relações existentes entre o preço do petróleo e de quatro energias renováveis – eólica, hidrelétrica, solar e bioenergia – nos últimos vinte anos. O trabalho foi desenvolvido por meio testes estatísticos de Correlação Cruzada e Causalidade de Granger. O teste de Correlação Cruzada mostra a estrutura de dependência entre duas séries temporais. O teste de Causalidade de Granger identifica uma relação de precedência temporal entre as duas variáveis. O teste de Correlação Cruzada mostrou que as energias renováveis têm correlação do tipo médio a forte com o preço do petróleo. Já o teste de Causalidade de Granger indicou bicausalidade somente entre os preços da energia hidrelétrica e do petróleo. Essa bicausalidade pode ser explicada pelo fato da energia hidrelétrica ser a energia renovável mais utilizada no mundo mas, também, por ser uma forte substituta dos combustíveis fósseis para uso em veículos, concorrendo assim diretamente com o petróleo.

Palavras-chave: Preço do petróleo; Preço das energias renováveis; Energia eólica; Energia hidrelétrica; Energia solar; Bioenergia; Teste de Correlação Cruzada; Teste de Causalidade de Granger.

ABSTRACT

Oil is the most widely used energy source worldwide. Despite this, its use has been questioned due to pollution and the environmental impacts that its exploration and production cause. Large companies in the oil sector have been following these changes and expanding their activities to also operate in the renewable energy segment. The objective of the work was to identify patterns and relationships that exist between the price of oil and four renewable energies - wind, hydroelectric, solar and bioenergy - in the last twenty years. The work was developed by means of statistical tests of Cross Correlation and Granger Causality. The Cross Correlation test shows the dependency structure between the series. The Granger Causality Test identifies a temporal precedence relation between the two variables. The results showed, for the Cross Correlation, that renewable energies obtained medium to strong correlations and, for Granger's Causality, only hydroelectric energy and oil obtained bicausality. Thus, it can be concluded that a possible reason for this bicausality is due to the fact that hydropower is the most used renewable energy in the world, competing directly with oil.

Keywords: oil price, renewable energy price, wind energy, hydroelectric energy, solar energy, bioenergy, Cross Correlation, Granger Causality.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema de um reservatório de petróleo, destacando as rochas selante (capeadora), geradora e reservatório.....	12
Figura 2: Fluxograma de como são realizados os cálculos para o <i>Dated Brent</i>	16
Figura 3: Fluxograma do cálculo do Dated Brent quando o Brent forwards não possui liquidez suficiente.....	17
Figura 4: Preços da commodity Brent e WTI de 2000 a 2020.....	18
Figura 5: Flutuação do preço do petróleo ao longo do tempo relacionado à eventos geopolíticos.	19
Figura 6: Geração de energia eólica onshore e offshore no mundo (em GWh). ...	24
Figura 7: Preços (LCOE) da energia eólica onshore em alguns países no mundo.	25
Figura 8: Total de energia primária consumida no Brasil em 2017.	26
Figura 9: Quantidade de energia elétrica renovável gerada no mundo (em GWh) dividida por tipos.	27
Figura 10: Preços (LCOE) da energia hidrelétrica em alguns países/continentes no mundo.	28
Figura 11: Preços (LCOE) da energia hidrelétrica em alguns países/continentes no mundo.	29
Figura 12: Geração de energia solar PV e CSB no mundo (em GWh).	31
Figura 13: Matriz elétrica brasileira.	32
Figura 14: Preço LCOE da energia solar PV em diversos países no mundo.	33

Figura 15: Preço LCOE da energia solar CSP no mundo (classificado em horas de estocagem, tipo e capacidade em MW).	33
Figura 16: Geração de energia elétrica por bioenergia no mundo (em GWh).	34
Figura 17: Preços LCOE de bioenergia no mundo.	35
Figura 18: Exemplos de séries temporais X e Y, verificando sua causalidade.	39
Figura 19: Fluxograma da metodologia do trabalho.	42
Figura 20: Série temporal do preço do Brent.	47
Figura 21: Séries temporais do preço das energias renováveis, sendo: a) Energia Eólica Onshore; b) Energia Solar Fotovoltaica; c) Energia Hidrelétrica e d) Bioenergia.	50
Figura 22: Série temporal da taxa de variação dos preços do Brent.	53
Figura 23: Série temporal da taxa de variação / primeira derivada dos preços das energias renováveis, sendo: a) Eólica; b) Solar; c) Hidrelétrica e d) Bioenergia. ...	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Premissas para cálculos da LCOE (IRENA, 2019).....	23
Tabela 2: Preços médios anuais do barril de petróleo Brent (2000 a julho de 2020).	46
Tabela 3: Preço médio mundial da energia eólica onshore (2000-2018)	47
Tabela 4: Preço médio mundial da energia solar fotovoltaica (2010-2018).....	48
Tabela 5: Preço médio mundial da energia hidrelétrica (2010-2018)	48
Tabela 6: Preço médio mundial da bioenergia (2010-2018).....	49
Tabela 7: Média, mediana, variância e desvio padrão das séries temporais do Brent e das energias renováveis.	49
Tabela 8: Compatibilização do período temporal dos preços Brent e energias renováveis	50
Tabela 9: Coeficientes de Correlação Cruzada entre o preço do petróleo e o preço das energias renováveis	51
Tabela 10: Teste de Dickey-Fuller para as energias renováveis e o petróleo Brent.	54
Tabela 11: Valores-p do teste de Causalidade de Granger para Brent, energia eólica, energia solar, energia hidrelétrica e bioenergia.	55

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	Objetivo.....	11
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
2.1	Determinação do Preço do petróleo.....	12
2.1.1	Preço do petróleo tipo Brent	14
2.1.2	Preço do petróleo tipo WTI	17
2.1.3	Comparação entre Brent x WTI (2000-2020).....	18
2.2	Energias Renováveis	19
2.2.1	Preço das energias renováveis.....	20
2.2.2	Eólica	23
2.2.3	Hidrelétrica.....	25
2.2.4	Solar	29
2.2.5	Bioenergia.....	34
3	METODOLOGIA	36
3.1	Teste de Correlação Cruzada.....	36
3.2	Teste de Causalidade de Granger	38
3.3	Etapas para o desenvolvimento do trabalho	41
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
4.1	Preços do petróleo e das energias renováveis	46
4.1	Teste de Correlação Cruzada.....	51
4.2	Teste de Causalidade de Granger	52
4.2.1	Teste de Dickey-Fuller	52
4.2.2	Teste de Causalidade de Granger	55
5	CONCLUSÃO	57
	APÊNDICE A – INFORMAÇÕES ADICIONAIS: PETRÓLEO.....	66
	APÊNDICE B - ORGANIZAÇÃO DOS PAÍSES EXPORTADORES DE	
	PETRÓLEO.....	67

APÊNDICE C - PAÍSES COM AS MAIORES RESERVAS DE PETRÓLEO.....	67
APÊNDICE D – RESERVAS PROVADAS	69
APÊNDICE E – GRÁFICO: TIPOS DE PETRÓLEO	70
APÊNDICE F – POLUIÇÃO GERADA PELO PETRÓLEO	70
APÊNDICE G – O FUTURO DO PETRÓLEO	71
APÊNDICE H - CORRELAÇÃO DE PEARSON.....	72
APÊNDICE I - CRONOGRAMA DE TRABALHO.....	76

1 INTRODUÇÃO

O petróleo é a fonte de energia mais utilizada em todo o mundo e com grande importância econômica para os países produtores como o Brasil. A partir do petróleo bruto é possível obter diversos produtos, entre eles gás de petróleo, gás liquefeito de petróleo (GLP), nafta, gasolina, querosene, óleo diesel, entre outros. Esses produtos são utilizados como bens finais ou como insumos para outras cadeias produtivas como química e petroquímica.

Apesar da sua importância econômica, a utilização do petróleo vem sendo questionada devido a poluição e aos grandes impactos ambientais que sua exploração e produção causam. Em 2018, o Banco Mundial parou de financiar negócios de petróleo e gás para focar em projetos de energias renováveis (Romanzoti, 2017). Outro questionamento importante está relacionado ao tempo que o petróleo irá durar, já que muitas reservas estão se esgotando, sendo necessário ir para alto mar para explorar e produzir o óleo. Portanto, é comum a busca por possíveis alternativas para substituir o petróleo.

Uma alternativa ao petróleo é a utilização de fontes de energia renováveis. Essas energias limpas vêm de recursos naturais e são inesgotáveis, como: vento, chuva, sol, bioenergia, energia geotérmica, marés, entre outras. As energias renováveis causam menos poluição e menos conflitos dentro e fora dos países. Entretanto, muitas dessas energias dependem da localização geográfica além de fatores como clima e sazonalidade.

Muitas das grandes empresas do setor de petróleo, como Petrobras, ExxonMobil, BP e Equinor, estão mudando suas mentalidades e buscando um posicionamento no mercado de energias renováveis (PortalSolar, 2018) e até oferecendo cursos de pós-graduação nessa área (CanalEnergia, 2018). Assim, um pensamento que vem ganhando força nos últimos anos seria usar os recursos provenientes do petróleo para financiar a transição mundial para as energias renováveis.

A questão ainda é muito recente e é necessário aprofundar estudos nessa direção. O preço do petróleo é volátil pois depende de fatores geopolíticos assim como da oferta e demanda de óleo no mercado mundial. Assim, é importante compreender as relações existentes entre os preços do petróleo e das energias renováveis e, ainda, se as energias renováveis podem ser afetadas pelas frequentes oscilações do preço do petróleo.

1.1 Objetivo

O objetivo do trabalho é identificar padrões e relações existentes entre o preço do petróleo e das energias renováveis nos últimos vinte anos. O trabalho será desenvolvido por meio dos testes estatísticos de Correlação Cruzada e Causalidade de Granger aplicadas ao preço do petróleo e ao preço das seguintes energias renováveis: eólica, hidrelétrica, solar e bioenergia. O teste de Correlação Cruzada mostra a estrutura de dependência entre as séries. O teste de Causalidade de Granger identifica uma relação de precedência temporal entre as duas variáveis. A compreensão dos padrões e relações existentes contribui para que os tomadores de decisão definam melhor suas estratégias e operem de modo mais eficiente.

Objetivos Específicos

Serão desenvolvidas as seguintes etapas.

1. Revisão bibliográfica buscando artigos e afins que possam contribuir com o objetivo do trabalho
2. Levantamento dos dados do preço do petróleo e das energias renováveis estudadas nos últimos vinte anos.
3. Representação gráfica das séries temporais e análise descritiva dos dados.
4. Aplicação dos testes estatísticos de Correlação Cruzada e Causalidade de Granger.
5. Análise dos resultados e principais conclusões.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Determinação do Preço do petróleo

O petróleo é formado devido ao acúmulo de material orgânico em condições específicas de temperatura e pressão em ambientes anaeróbicos, ou seja, sem oxigênio presente. No entanto, isso não é o suficiente para afirmar que o petróleo irá ser formado, já que também é necessário que a matéria orgânica fique em isolamento no subsolo de bacias sedimentares, sofrendo transformações por um grande período de tempo, geralmente milhares de anos. Também é importante ressaltar que normalmente é necessário uma rocha reservatória (rocha porosa), coberta por uma rocha selante, para armazenar a migração de óleo da rocha geradora (que possui matéria orgânica), como pode ser visto na Figura 1. Portanto, para ocorrer a formação do petróleo é necessária uma série de eventos que devem ser respeitados. Para maiores informações sobre o petróleo e sua composição, verificar os Apêndices de A à G.

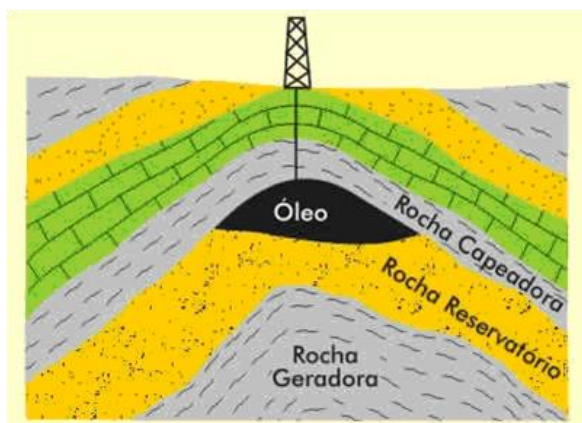


Figura 1: Esquema de um reservatório de petróleo, destacando as rochas selante (capeadora), geradora e reservatório.

Fonte: Teixeira *et al.* (2000).

O preço do petróleo é extremamente volátil e depende do ritmo do mercado das compras e vendas mundiais. Existem provas recentes de como o preço do petróleo pode ser afetado, seja por pandemias mundiais como o coronavírus

(COVID-19) (Gandra, 2020), seja por questões geopolíticas entre nações produtoras. Enquanto Arábia Saudita recomendava diminuir a produção de petróleo para que os preços dos barris fossem menos afetados pelo avanço do COVID-19, a Rússia queria esperar para entender como a pandemia iria afetar a economia mundial (BBC, 2020). O conflito entre esses dois grandes produtores fez com que o preço do barril de petróleo caísse, em março de 2020, a US\$26,98/barril para o Brent e US\$22,63/barril para o WTI (Reuters, 2020), sendo que, em janeiro do mesmo ano o preço estava por volta de US\$70/barril (G1, 2020).

O petróleo é 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 processada (Rico, 2018; Toro, 2019; XP, 2019).

Existem vários tipos de petróleo, mas dois são os mais comuns: Brent e WTI (*West Texas Intermediate*). O petróleo Brent é classificado como um petróleo leve do tipo doce (que possui pouca concentração de enxofre). Ele geralmente é o mais utilizado e cerca de dois terços de toda a precificação do petróleo usa o Brent como referência. É importante destacar que esse tipo de petróleo normalmente é produzido no Mar do Norte. O petróleo WTI também é classificado como um petróleo leve do tipo doce (para mais informações, verificar Apêndice D). Ele é um pouco mais leve do que o Brent e possui uma quantidade de enxofre ligeiramente menor. Apesar de serem parecidos, os Estados Unidos não se identificaram com o tipo Brent e usam o WTI como seu modelo de preço.

No geral, a cotação do petróleo WTI é ligeiramente inferior à cotação do Brent. Ambos possuem correlação, já que suas flutuações são semelhantes ao longo do tempo. Um fator que explica o porquê de existirem duas cotações de petróleo semelhantes é o fato de existirem possíveis conflitos geopolíticos, sendo o tipo Brent mais afetado do que o WTI, já que o WTI é também influenciado pelos acontecimentos internos dos EUA (Grant, 2019).

O preço do barril de petróleo é determinado nos mercados financeiros, sobretudo na Bolsa de Nova Iorque para o petróleo do tipo WTI e em Londres para o Tipo Brent. A OPEP controla parte importante da produção e exportação do Brent, exercendo influência sobre a determinação do preço. O petróleo é importante para as economias de todo o mundo e, por isso, a OPEP tem sido considerado uma força geopolítica líder (Grant, 2019). Assim, a cotação do barril de petróleo depende da interação entre a oferta e demanda por óleo bruto nas bolsas de valores.

O petróleo pode ser comercializado em dois mercados: no *spot market* ou no *futures market*. O primeiro se baseia na compra e venda à vista do barril, sendo entregue imediatamente. O segundo se baseia numa compra de papéis que darão direito aos barris em um momento no futuro. No *futures market* existem dois tipos de compradores: os produtores e consumidores de petróleo e os que compram esses papéis como um investimento. Os primeiros buscam se proteger da volatilidade do mercado travando os preços, enquanto os outros analisam o mercado para saber a hora certa de vender esses papéis (NRCAN, 2020).

As precificações das *commodities* Brent e WTI são dadas de maneira diferente, visto que elas estão em estruturas financeiras diferentes. Para isso, serão utilizadas as explicações que Dunn e Holloway (2012) utilizaram no artigo “The Pricing of Crude Oil”.

2.1.1 Preço do petróleo tipo Brent

O mecanismo para determinar o preço do petróleo tipo Brent é complexo e envolve um grande número indicadores como o Dated Brent, ICE Brent Futures e o Brent Forwards. O Dated Brent é o mais comum e representa o preço de um carregamento de petróleo que irá chegar em terra entre 10 a 25 dias. No entanto, poucas negociações físicas de Dated Brent são precificadas e, dessa forma, não são diretamente observáveis. Nessas circunstâncias são utilizadas as “Price

Reporting Agencies” (PRA) – entre elas a Platts e a Argus Media - que estabelecem e reportam os preços a partir das informações das negociações físicas e do mercado financeiro.

Para a avaliação do preço do Dated Brent é necessário começar pelo preço do Brent forward. Este, por sua vez, é um contrato “*over the counter*” (OTC), ou seja, somente as partes envolvidas sabem dos termos. Esse contrato especifica um determinado mês para entrega (mas não define um dia exato). Assim, as PRAs estimam três preços do *Brent forward* cobrindo um período de três meses no futuro.

Dando continuidade no processo de precificação do Brent, as PRAs estimam os preços dos “*contract-for-difference*” (CFD). Os CFDs são *swaps*¹ financeiros de curto prazo entre o preço volátil do *Dated Brent*, no momento do carregamento, e um preço fixo em uma data futura (preço do *Brent forward*). Eles são usados para proteger contra, ou especular sobre, movimentos no mercado Brent. Utilizando-se de estimativas do CFD de oito semanas no futuro e combinando-as com a estimativa do segundo mês do *Brent forward*, as PRAs conseguem produzir um conjunto de preços de *Dated Brent* de até oito semanas no futuro – essa é a curva de *Dated Brent*. A média desse conjunto é chamada de “*North Sea Dated Strip*”. Com isso e combinando informações, é possível encontrar o preço de cada tipo de petróleo Brent (Brent, Forties, Oseberg e Ekofisk), sendo que o mais barato entre eles se torna a cotação diária do *Dated Brent* (geralmente é utilizado o preço do petróleo Forties por ele ter a menor qualidade dentre os Brent). Um fluxograma das etapas para o cálculo do *Dated Brent* é apresentado na Figura 2.

¹ É uma operação em que há troca de posições quanto ao risco e à rentabilidade, entre investidores. O contrato de troca pode ter como objeto moedas, commodities ou ativos financeiros

Fluxograma para cálculo do *Dated Brent*

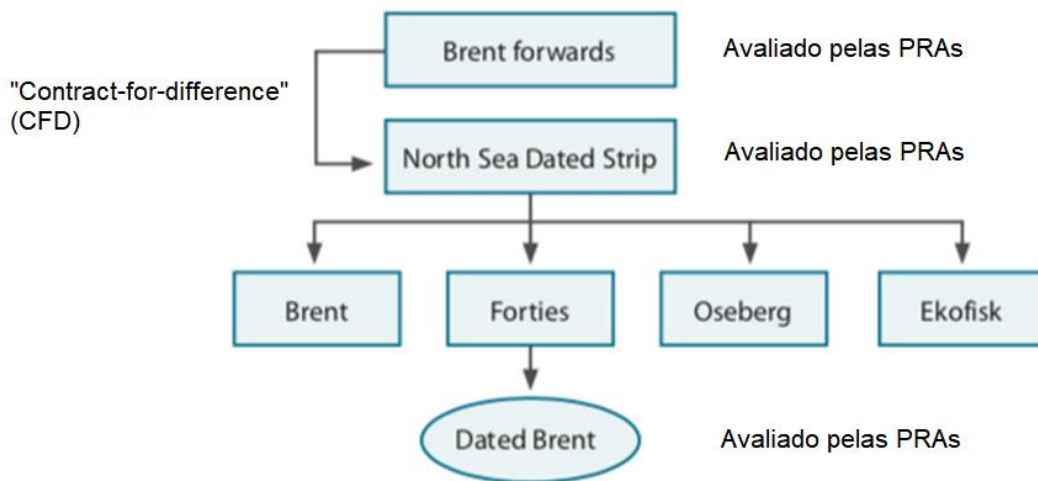


Figura 2: Fluxograma de como são realizados os cálculos para o *Dated Brent*.

Fonte: Adaptado de Dunn e Holloway (2012).

Muitas vezes, no entanto, o mercado do Brent *forward* não possui liquidez suficiente para usar seu preço como ponto de partida dos cálculos. Nesse caso, é utilizado o mercado futuro, combinando o preço do Intercontinental Exchange Brent futures (ICE Brent futures) com o “*exchange of futures for physicals*” (EFPs). O contrato do ICE Brent futures especifica a entrega de 1000 barris de petróleo do tipo Brent numa determinada data futura. O contrato é fechado em dinheiro com a opção de entrega por um contrato EFP. Enquanto os contratos futuros são altamente padronizados e negociados em bolsas, os EFPs são contratos mais flexíveis que permitem que os negociantes escolham o local da entrega, o parceiro comercial e os valores envolvidos. Com o preço do Brent forward calculado, é possível determinar o preço do *Dated Brent* como mostrado anteriormente. Na Figura 3 é apresentado um fluxograma para o cálculo quando o *Brent forwards* não possui liquidez suficiente.

Cálculo do preço *Dated Brent* para um *Brent forwards* sem liquidez

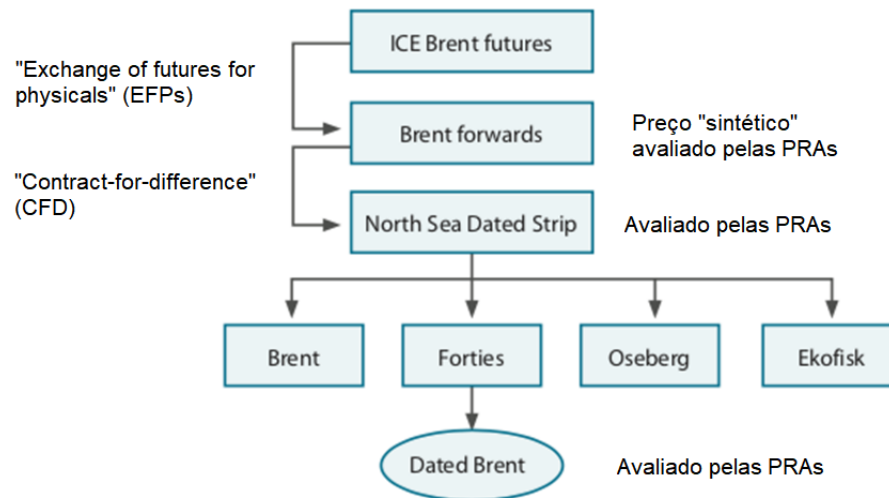


Figura 3: Fluxograma do cálculo do Dated Brent quando o Brent forwards não possui liquidez suficiente.

Fonte: Adaptado de Dunn e Holloway (2012).

2.1.2 Preço do petróleo tipo WTI

A cotação da *commodity* WTI é mais simples que a do Brent. Isto porque depende apenas de um instrumento: o “New York Mercantile Exchange (NYMEX) Light Sweet Oil futures contract”². Isso reflete a liquidez do *future market* para o WTI que, desde a sua origem em 1983, praticamente substituiu o *forward market*.

Com a ausência de um *forward market*, o preço físico *spot* avaliado dos PRAs para o WTI é determinado de forma diferente do Dated Brent. O preço *spot* do WTI relatado pelos PRAs é normalmente o preço mais recente e representativo do NYMEX WTI no primeiro mês (contrato mais próximo do vencimento) em um

² Este é o principal contrato do WTI. A ICE também oferece um contrato futuro de WTI liquidado em dinheiro, embora o interesse em aberto neste contrato seja muito menor do que no contrato NYMEX.

período imediatamente anterior ao tempo de estimativa do preço (que varia entre os PRAs). No vencimento do contrato, o preço informado dos PRAs reflete o novo preço futuro do primeiro mês mais o *cash roll* (custo de ocorrer um contrato futuro da NYMEX para o próximo mês sem entregá-lo).

2.1.3 Comparação entre Brent x WTI (2000-2020)

De acordo com as Figuras 4 e 5 é possível perceber o comportamento semelhante dos preços do petróleo tipo Brent e do WTI. Isso porque, embora sejam determinados de forma diferentes, respondem aos mesmos estímulos de oferta e demanda e são afetados pelos mesmos fatores geopolíticos.

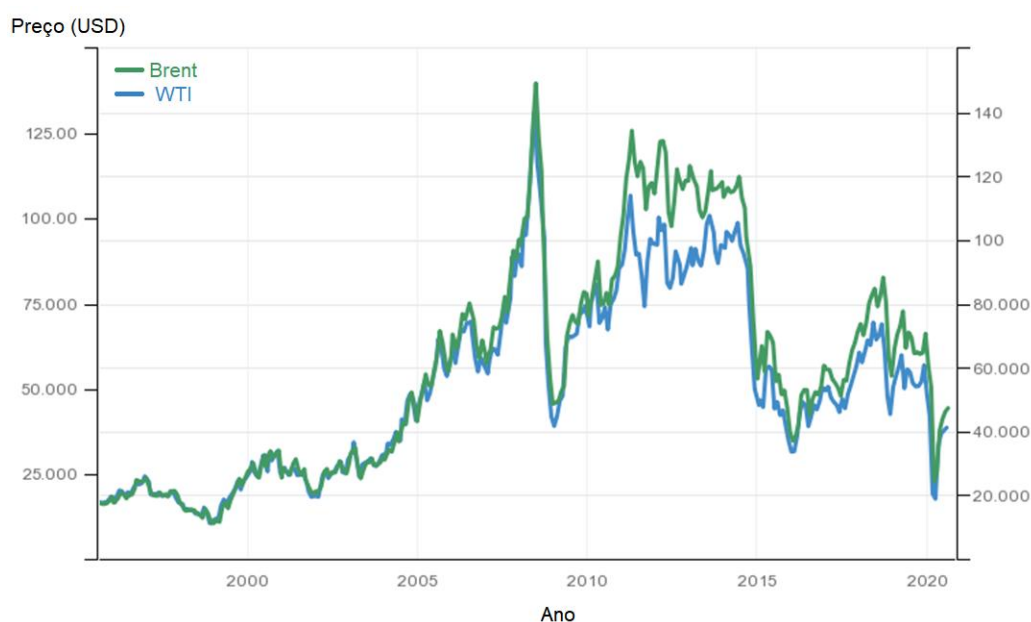


Figura 4: Preços da commodity Brent e WTI de 2000 a 2020.

Fonte: Adaptado de Trading Economics (2020a).

Ao se tratar de crises mundiais, é possível observar que afetam, de forma geral, o preço das *commodities*. Nas crises mundiais de 2008, 2010 e 2020 é possível notar que houve grandes flutuações nos preços. De modo geral, pelos

gráficos, pode-se afirmar que o preço das *commodities* é demasiadamente volátil, já que, considerando um período curto de 2008 para 2020, foi visto o preço do petróleo cair de 140 dólares para quase 20 dólares o barril.

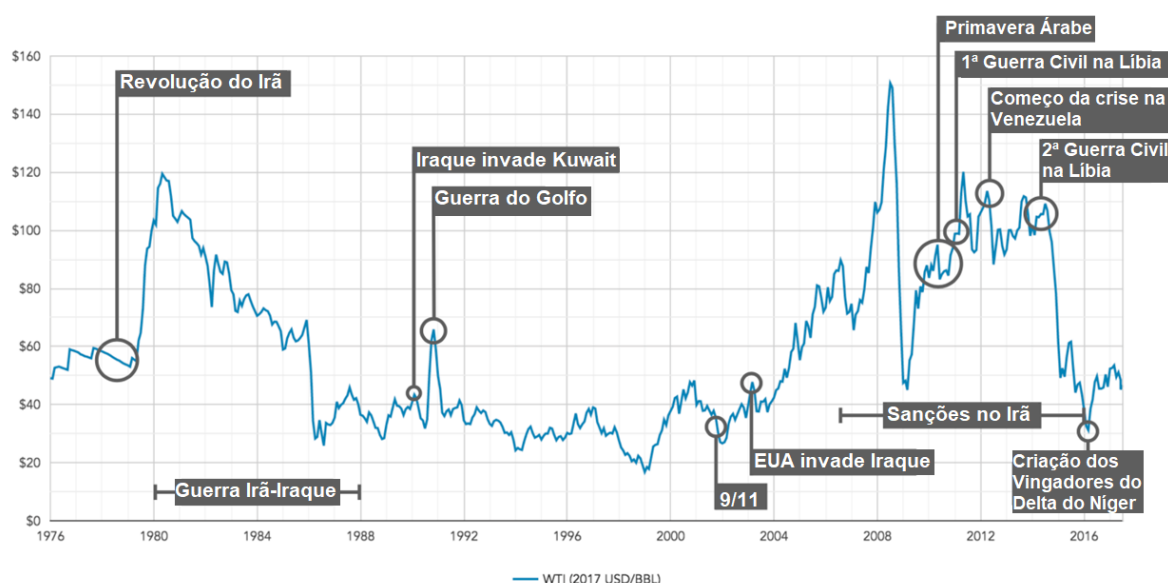


Figura 5: Flutuação do preço do petróleo ao longo do tempo relacionado à eventos geopolíticos.

Fonte: Adaptado de OilSandsMagazine (2017).

2.2 Energias Renováveis

As energias renováveis são coletadas de fontes renováveis, que devem ser naturalmente reabastecidas numa escala de tempo de um ciclo de vida humana (Ellaban *et al.*, 2014), ou seja, aproximadamente 79 anos (Arias e Xu, 2019). Em linhas gerais, pode-se resumir que essas energias são geradas a partir da absorção de energias naturais, transformando-as em energia elétrica. Os tipos mais comuns de energia renováveis são a eólica, hidrelétrica, solar e bioenergia, que serão tratadas nesse trabalho.

É importante ressaltar o fato de que, apesar de chamarem as energias renováveis de energias limpas, elas não são totalmente limpas. Para entender isso

basta lembrar o impacto causado pela instalação dos equipamentos necessários para a geração da energia. Tomando uma usina hidrelétrica como exemplo, é necessário fazer barragens para conter a água para girar uma turbina, ou seja, toda essa instalação gera um impacto na fauna e flora ao redor. Um outro exemplo seria das usinas eólicas, que geram uma grande poluição ambiental, pelo fato dos caminhões transportarem equipamentos grandes para essas usinas, e também poluição sonora, pois o barulho que a instalação faz é demasiado, podendo afetar a fauna local.

Para que os países consigam realizar uma transição para energias sustentáveis no futuro, uma organização intergovernamental chamada International Renewable Energy Agency (IRENA) foi criada. Ela serve como a principal plataforma para cooperação internacional, centro de excelência, e um repositório de política, tecnologia, recursos e conhecimento financeiro de energias renováveis. Com um mandato de países ao redor do mundo, a IRENA incentiva os governos a adotarem políticas facilitadoras para investimentos em energia renovável, fornece ferramentas práticas e consultoria política para acelerar a implantação de energia renovável, ao mesmo tempo que facilita o compartilhamento de conhecimento e a transferência de tecnologia para fornecer energia limpa e sustentável para o crescimento da população no mundo.

2.2.1 Preço das energias renováveis

Para realizar o cálculo de preços das energias renováveis é necessário adotar um método e listar todas as hipóteses para criar um cenário em que este método possa ser aplicado. No geral, o cálculo para quantificar o preço de uma energia renovável é igual para qualquer energia desse tipo, ou seja, por exemplo, os cálculos envolvidos para estimar o preço da energia solar e hidrelétrica seriam os mesmos. No entanto, fatores como localização, impostos, subsídios governamentais podem fazer com que os preços divirjam substancialmente entre

países. Por isso, para essa explicação, será adotado a metodologia de preço utilizada pela IRENA (IRENA, 2019).

A análise de preços pode ser muito detalhada, no entanto a IRENA utiliza uma abordagem simplificada que foca nas métricas de preço mais importantes, mas, ao mesmo tempo, os dados necessitam ser de qualidade e disponíveis. Isso faz com que a confiabilidade na análise seja melhor, facilitando comparações de preços por países ou regiões com tecnologia semelhante, sendo possível identificar os fatores chave para as diferenças de preço.

Como hipóteses para estimar o preço das energias renováveis, a IRENA utiliza a perspectiva de um investidor privado, exclui qualquer incentivo ou subsídio governamental e não leva em conta os benefícios que as energias renováveis podem trazer ao ambiente. Além disso, um ponto importante para destacar é que os dados que a IRENA utiliza as vezes não são a média dos preços de mercado, mas indicadores de preços, ou seja, estimativas pesquisadas dos preços de venda de diferentes mercados.

O rápido crescimento dos mercados de fontes renováveis a partir de uma pequena base significa que o mercado de tecnologias de geração de energia renovável às vezes não é bem equilibrado. Como resultado, os preços podem subir acima dos custos de produção no curto prazo (se a oferta não estiver se expandindo tão rapidamente quanto a demanda), enquanto em tempos de excesso de oferta, podem ocorrer perdas e os preços podem estar abaixo dos custos de produção.

A abordagem para o cálculo dos preços das energias renováveis é baseado num fluxo de caixa descontado (DFC), em que os fluxos de entrada e saída de dinheiro são levados para uma base comum (anual, mensal ou semestral), sempre levando em consideração o valor do dinheiro em relação ao tempo, ou seja, taxas de juros e inflação.

Dado o intenso volume em capital na maioria das tecnologias de geração de energia renovável e o fato de os custos serem relativamente baixos, o custo

médio ponderado de capital (WACC) usado para avaliar o projeto possui um impacto crítico no preço final. Assim, o preço final se dá pelo Custo Nivelado da Energia (LCOE), que é o preço da eletricidade necessário em que a receita é igual ao custo, incluindo um retorno sobre o capital investido igual ao WACC.

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{I_t + M_t + F_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}} \quad (1)$$

Em que:

- $LCOE$: custo nivelado de energia médio de geração de energia elétrica;
- I_t : Gasto em investimentos no ano t ;
- M_t : Gasto em operações e manutenções no ano t ;
- F_t : Gasto em combustível no ano t ;
- E_t : Geração de energia no ano t ;
- r : Taxa de desconto (WACC);
- n : Vida econômica.

As análises nos relatórios da IRENA levam em consideração um WACC de projeto de 7.5% na China e nos países da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OECD)³, pois os custos de empréstimos são relativamente baixos e as políticas regulatórias e econômicas são estáveis, tendendo a reduzir o risco de projetos de energia renovável. Para o resto do mundo, o WACC assumido é de 10%. A Tabela 1 apresenta esses dados de maneira resumida.

³ Países membros da OECD: Alemanha, Austrália, Áustria, Bélgica, Canadá, Chile, Coréia, Dinamarca, Eslovênia, Espanha, Estados Unidos, Estônia, Finlândia, França, Grécia, Hungria, Irlanda, Islândia, Israel, Itália, Japão, Letônia, Luxemburgo, México, Noruega, Nova Zelândia, Países Baixos, Peru, Polônia, Portugal e Reino Unido.

Tabela 1: Premissas para cálculos da LCOE (IRENA, 2019).

Energia Renovável	Vida econômica (em anos)	Custo Médio Ponderado de Capital (WACC)	
		OECD e China	Resto do mundo
Eólica	25	7.5%	10%
Solar Fotovoltáica	25		
Solar Concentrada	25		
Hidrelétrica	30		
Biomassa	20		
Geotérmica	25		

Fonte: Adaptado de IRENA (2019).

2.2.2 Eólica

A energia eólica é baseada na produção de energia elétrica devido à energia cinética do vento. Em linhas gerais, o vento se choca com as pás das turbinas eólicas, fazendo com que elas girem e transformem energia cinética em energia rotacional. Essas turbinas são conectadas com um gerador, fazendo com que essa energia rotacional vire energia elétrica devido ao eletromagnetismo. A quantidade de energia que pode ser obtida pelo vento depende do tamanho da turbina e do comprimento de suas pás. A energia elétrica final é proporcional às dimensões do rotor do gerador e ao cubo da velocidade do vento (IRENA, 2020d).

É importante comentar que só é possível realizar a produção de energia eólica em áreas abertas e que possuem muito vento. Caso isso não exista, é possível que a quantidade de energia produzida não compense o valor inicial investido. Atualmente, no Brasil, o Nordeste produz cerca de 86% da energia eólica no país (Braskem, 2019).

O preço (LCOE) médio global dos projetos eólicos *onshore* em 2018 foi de US\$0.056/kWh, sendo 13% menor que 2017 e 35% menor que 2010, quando era US\$0.085/kWh, ou seja, é possível perceber que ao longo dos anos o preço da energia eólica foi declinando, como pode ser visto na Figura 7. Os preços das

energias eólicas terrestres estão abaixo da média da faixa de preços dos combustíveis fósseis, estes que variam entre US\$0.049/kWh e US\$0.174/kWh, dependendo do combustível ou do país (IRENA, 2019).

Apesar de sua contribuição ainda ser pequena, é importante comentar que existem usinas de energia eólica *offshore*, ou seja, usinas em alto mar. Isso se deve porque existem muitas áreas que possuem ventos fortes, mas se localizam em regiões remotas marítimas. Esse tipo de usina apresenta sinais promissores, aumentando sua capacidade a cada ano, como pode ser visto na Figura 6.

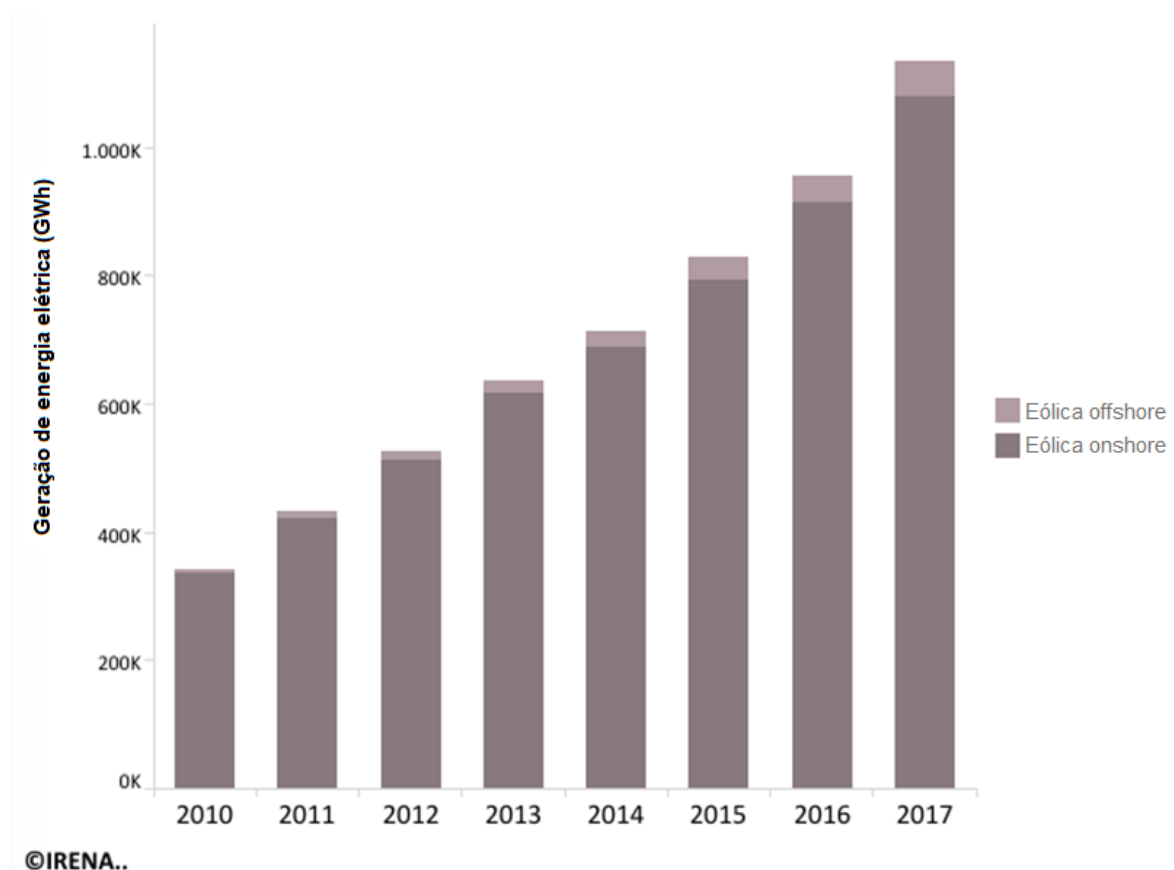


Figura 6: Geração de energia eólica onshore e offshore no mundo (em GWh).

Fonte: Adaptado de IRENA (2020d).

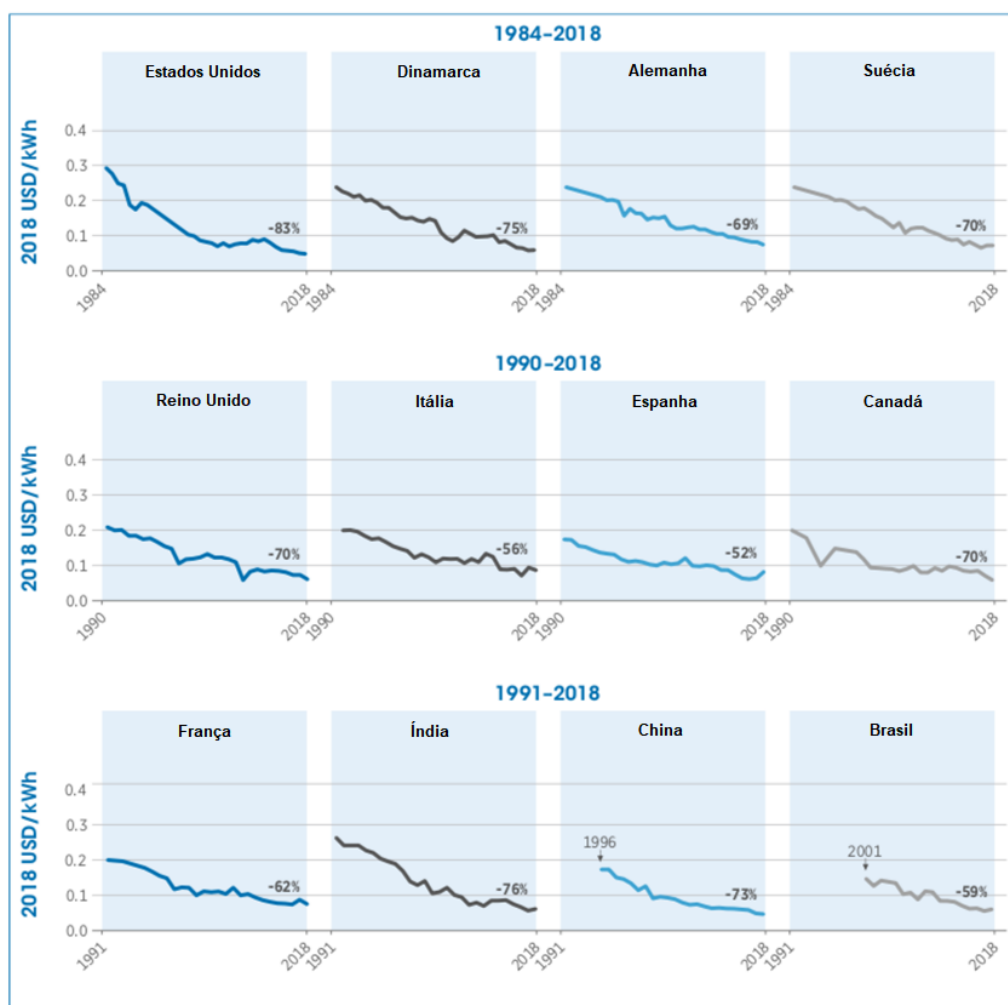


Figura 7: Preços (LCOE) da energia eólica onshore em alguns países no mundo.

Fonte: Adaptado de IRENA (2019).

2.2.3 Hidrelétrica

O princípio da energia hidrelétrica é utilizar o fluxo de água para girar as pás das turbinas e fazê-las funcionar. As plantas hidrelétricas consistem em dois tipos de configurações: as que possuem barragens e reservatórios, e as que não possuem. As plantas com barragem e grandes reservatórios podem estocar água por longos períodos para conseguir abastecer os picos de demanda de eletricidade. Pode-se também realizar pequenas barragens para diferentes

propósitos, como por exemplo, usos diurnos e noturnos, períodos de seca, etc. Plantas sem barragens produzem energia numa escala menor, pois operam sem interferir no fluxo do rio. Apesar da produção ser menor, elas são consideradas opções ambientalmente amigáveis (IRENA, 2020b).

A produção de energia hidrelétrica só é possível em locais que haja grandes volumes de água. Caso contrário, o investimento inicial para a construção das plantas pode não compensar o retorno futuro. No Brasil o potencial hidrelétrico é enorme e, também, é a maior fonte de energia renovável no país, sendo necessário ser considerado a parte nas estatísticas. Como pode ser visto na Figura 8, em 2017 as hidrelétricas tinham contribuição em 28% da energia total consumida no Brasil. (EIA, 2019). Vale ressaltar que esse percentual alto na matriz energética do Brasil não é exceção, pois a energia hidrelétrica é a energia renovável mais produzida no mundo, como pode ser visto na Figura 9.

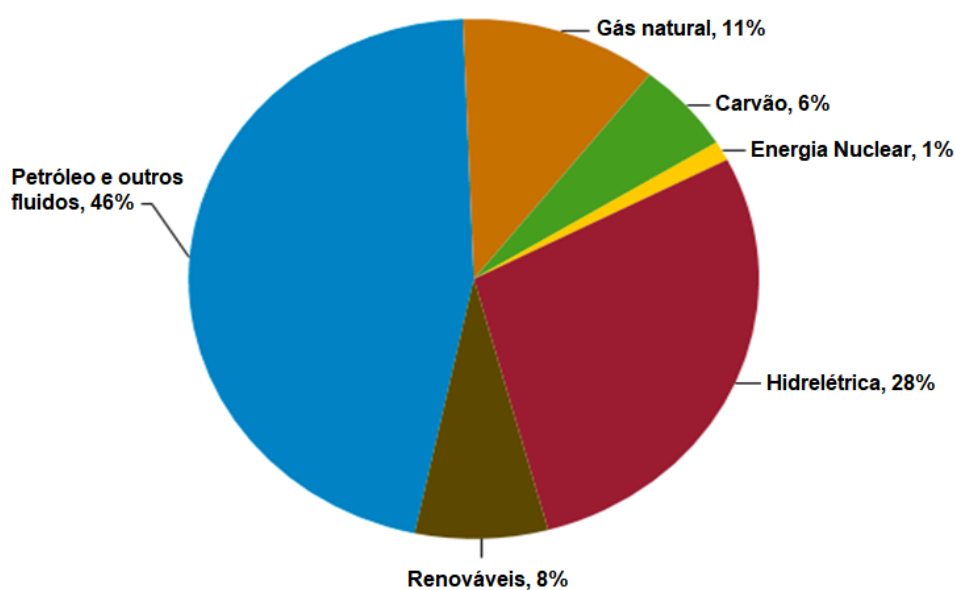


Figura 8: Total de energia primária consumida no Brasil em 2017.

Fonte: Adaptado de EIA (2019).

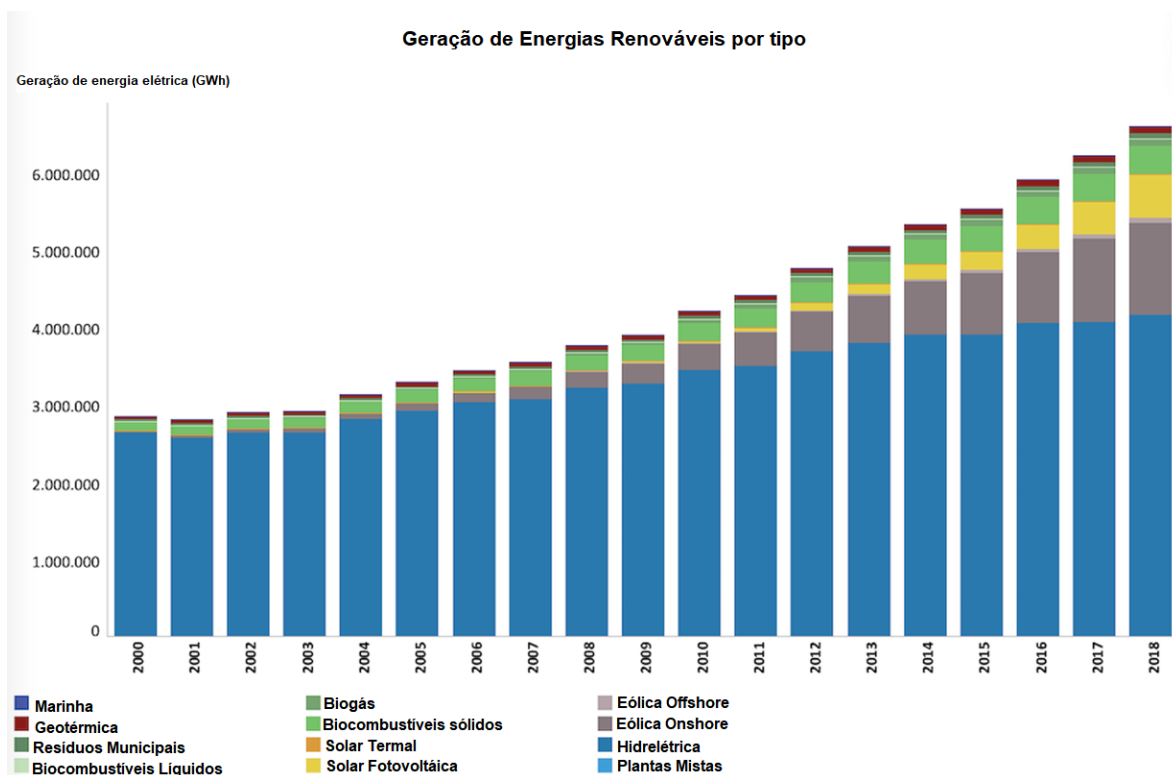


Figura 9: Quantidade de energia elétrica renovável gerada no mundo (em GWh) dividida por tipos.

Fonte: IRENA, 2020e.

O preço médio (LCOE) global das hidrelétricas em 2018 foi de US\$0.047/kWh, sendo 11% menor do que em 2017, mas 29% maior do que em 2010, como pode ser visto nas Figuras 10 e 11. Especula-se que esse aumento em relação à 2010 ocorreu devido ao aumento do custo instalado nos países conhecidos como “Other Asia”, que são os países da Ásia com exceção da China, Japão e Índia. No entanto, até hoje não se sabe exatamente sobre os fatos que fizeram com que isso ocorresse, já que é difícil identificá-los (IRENA, 2019). No geral, é possível afirmar que, apesar desse aumento no preço nos últimos anos, o custo da energia hidrelétrica ainda está num nível abaixo da faixa de custos dos combustíveis fósseis (entre US\$0.049/kWh e US\$0.174/kWh).

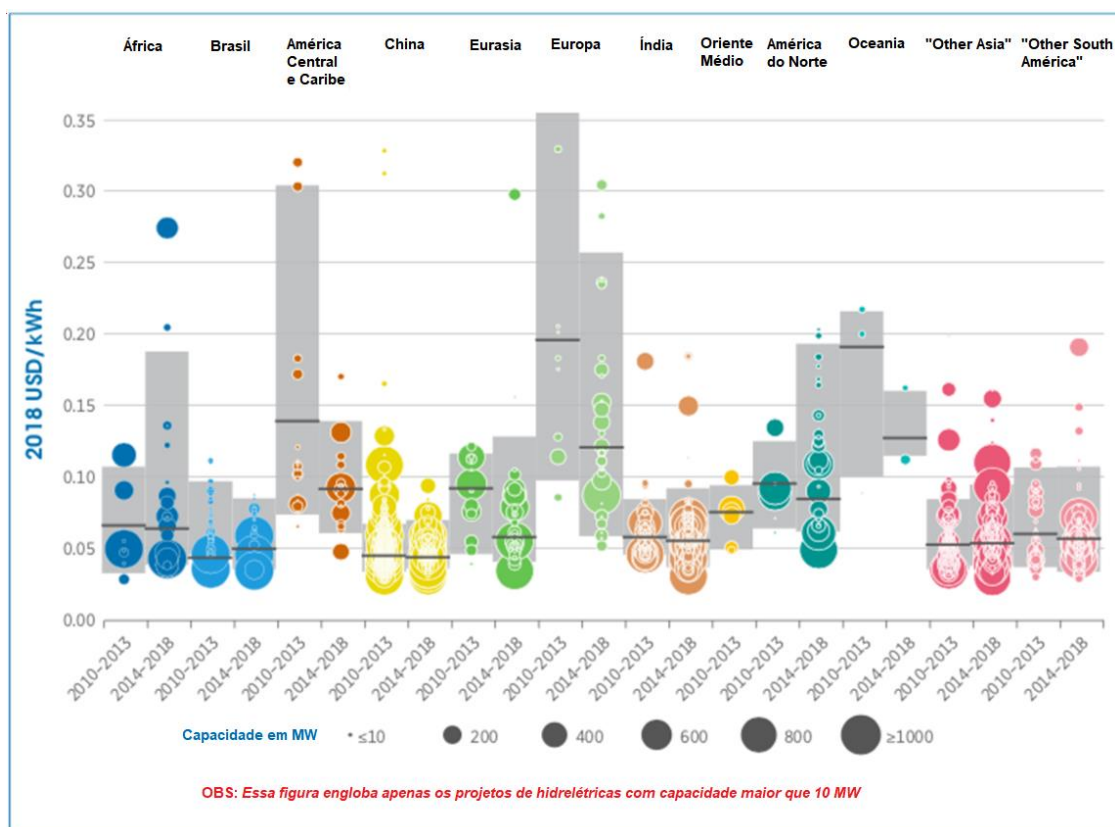


Figura 10: Preços (LCOE) da energia hidrelétrica em alguns países/continentes no mundo.

Fonte: Adaptado de IRENA (2019).

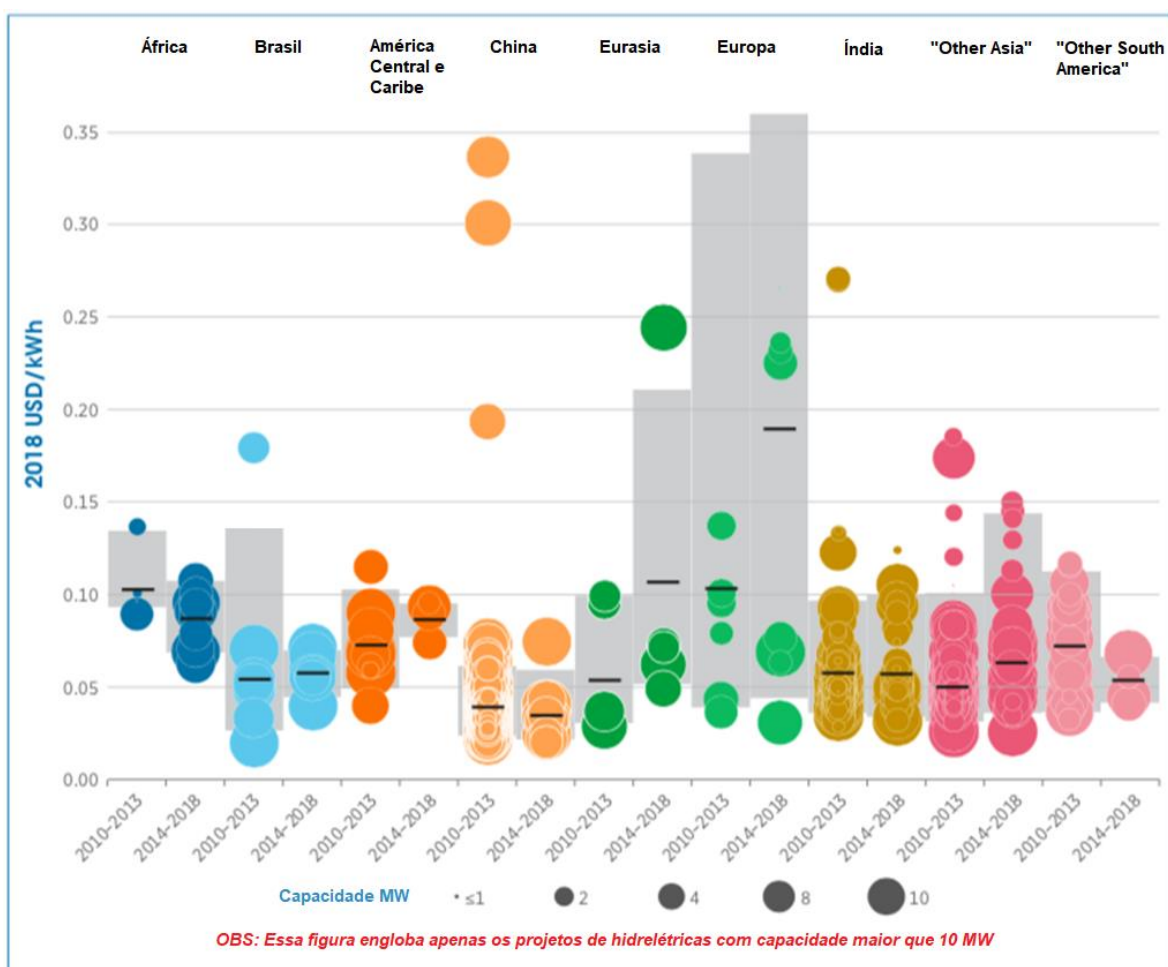


Figura 11: Preços (LCOE) da energia hidrelétrica em alguns países/continentes no mundo.

Fonte: Adaptado de IRENA (2019).

2.2.4 Solar

A energia pode ser aproveitada diretamente do Sol, mesmo em climas nublados. A energia solar é utilizada no mundo inteiro e é popular por gerar eletricidade e aquecer ou dessalinizar a água. Esse tipo de energia pode ser gerada de duas formas: por células solares fotovoltaicas (PV) ou por energia solar concentrada (CSP).

As células fotovoltaicas são dispositivos eletrônicos que convertem a luz do sol em eletricidade. Exemplos mais comuns são os painéis instalados em calculadoras ou em residências. Instalações de células fotovoltaicas podem ser combinadas para fornecer energia numa escala comercial, ou serem arranjadas em configurações menores para uso pessoal. O custo para produzir células fotovoltaicas caiu drasticamente na última década, fazendo com que elas se tornassem mais acessíveis e baratas, sendo o tipo de energia solar mais produzida no mundo, como pode ser visto na Figura 12. Os painéis solares, atualmente, possuem uma vida de aproximadamente 30 anos (IRENA, 2020c).

A energia solar concentrada, também conhecida como energia solar termal, utiliza espelhos para concentrar os raios solares. Esses raios aquecem um fluido até sua evaporação, fazendo com que esse vapor gire uma turbina e gere eletricidade. A CSP é usada gerar eletricidade em larga escala nas usinas. Uma das principais vantagens de uma usina de CSP sobre uma usina fotovoltaica solar é que ela pode ser equipada com certos materiais (sais fundidos⁴) nos quais o calor é armazenado, permitindo que a eletricidade seja gerada após o pôr do Sol (IRENA, 2020c).

⁴ Os sais fundidos são sólidos à temperatura ambiente e pressão atmosférica, mas mudam para um líquido quando a energia térmica é transferida para o meio de armazenamento. Na maioria dos sistemas de armazenamento de energia de sal fundido, estes sais são mantidos como líquido durante todo o processo de armazenamento de energia.

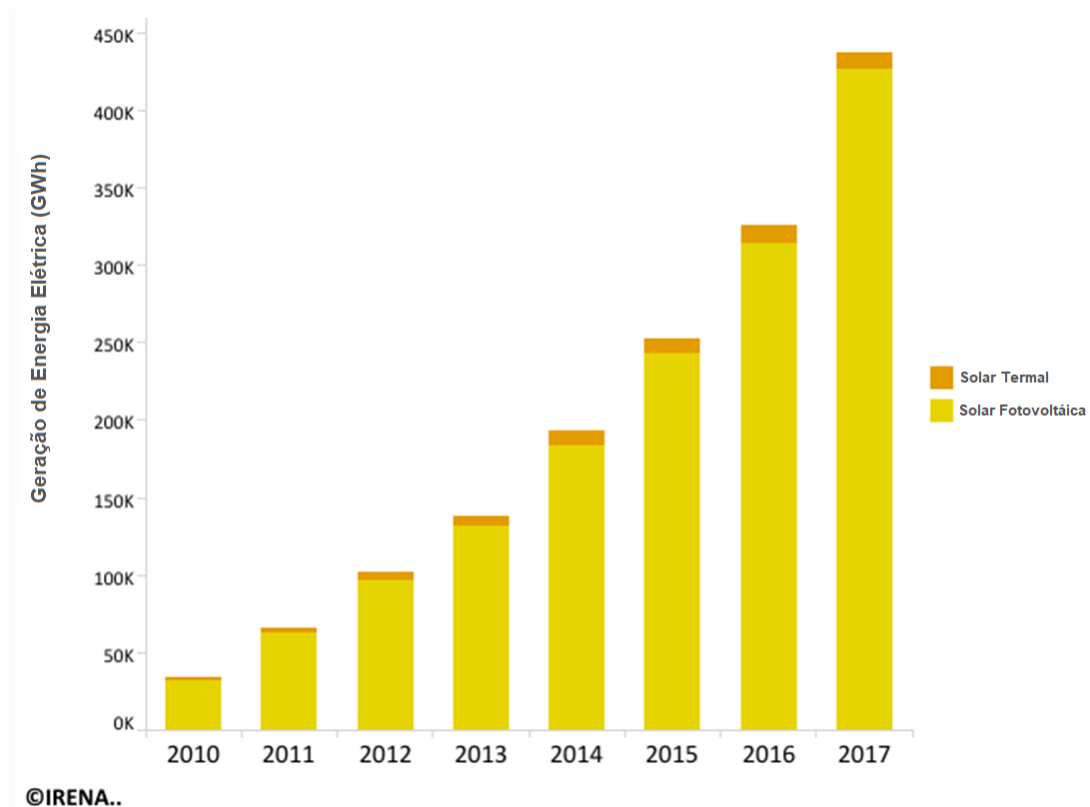


Figura 12: Geração de energia solar PV e CSB no mundo (em GWh).

Fonte: Adaptado de IRENA (2020c).

“O mercado de energia solar no Brasil cresceu amplamente em 2019, principalmente em virtude da porcentagem de 1,2% de sistemas fotovoltaicos encontrados na matriz energética brasileira. O Brasil possui 2,4 GW de potência instalada e tem crescido em até 44% por meio do uso da geração distribuída” (Portalsolar, 2020). Atualmente, no Brasil, a energia solar fotovoltaica possui contribuição de 1.5% na matriz energética (ABSOLAR, 2020), como pode ser visto na Figura 13.

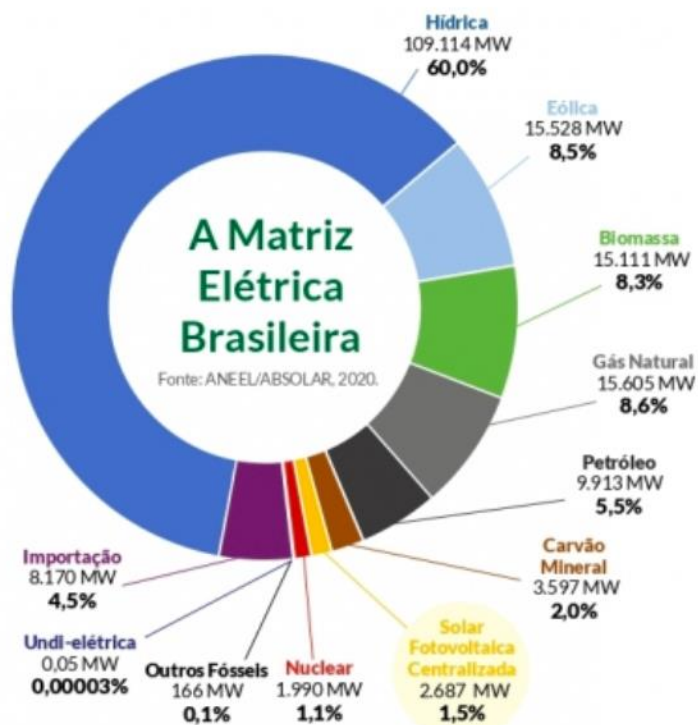


Figura 13: Matriz elétrica brasileira.

Fonte: ABSOLAR (2020).

O declínio do custo da energia solar PV continua ao longo dos últimos anos, chegando a um LCOE médio global de US\$0.085/kWh em 2018. Isso faz com que o custo da energia PV, entre 2010 e 2018, tenha sido reduzido cerca de 77%. A queda no preço da CSP também ocorreu ao longo dos últimos anos. Em 2018, foram encomendados cerca de 0.5 GW de CSP (predominantemente na China, Marrocos e África do Sul). O LCOE médio global de CSP em 2018 foi de US\$0.185/kWh, sendo 46% menor que em 2010 (IRENA, 2019). Na Figura 14 é possível ver o preço da energia PV de 2010 a 2018 em alguns países do mundo e, na Figura 15, é possível ver a média do preço de 2010 a 2018 da energia CSP no mundo.

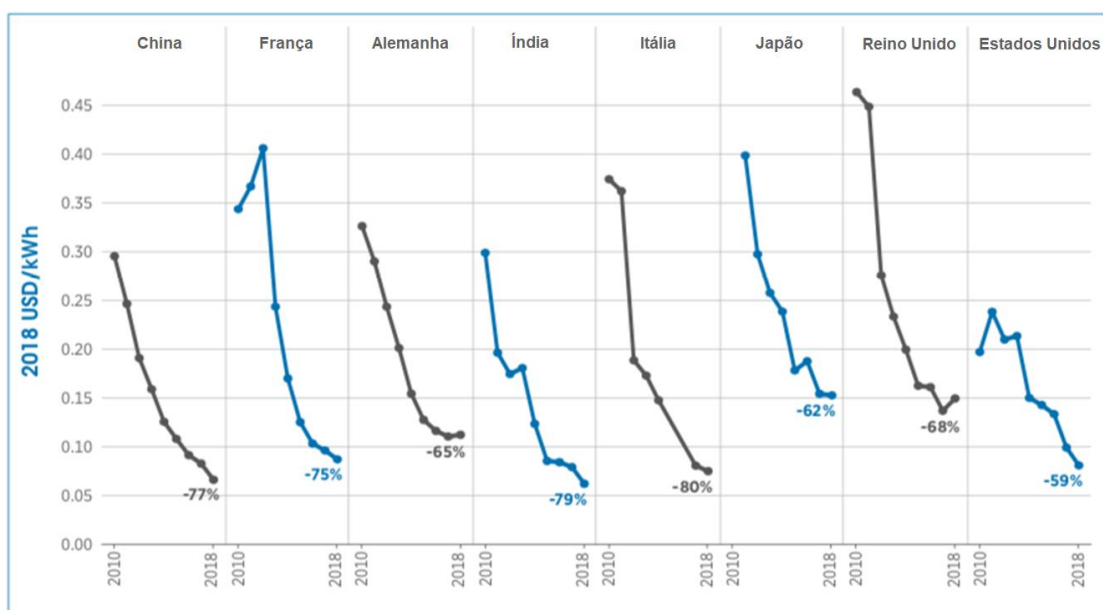


Figura 14: Preço LCOE da energia solar PV em diversos países no mundo.

Fonte: Adaptado de IRENA (2019).

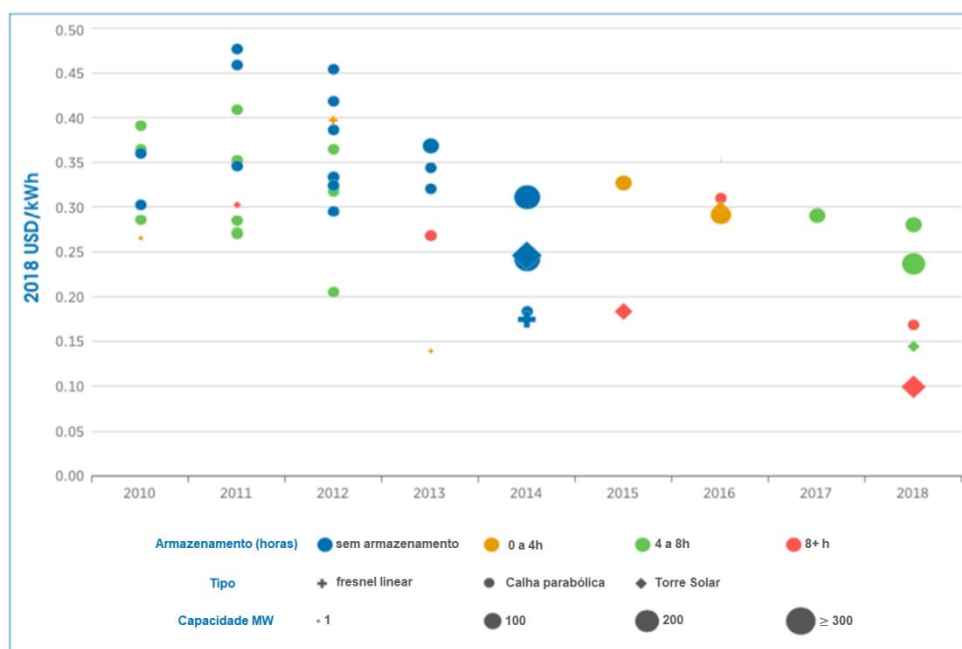


Figura 15: Preço LCOE da energia solar CSP no mundo (classificado em horas de estocagem, tipo e capacidade em MW).

Fonte: Adaptado de IRENA (2020).

2.2.5 Bioenergia

A bioenergia possui duas categorias: a tradicional e a moderna. A tradicional refere-se à combustão de biomassa na forma de madeira, dejetos animais e carvão vegetal. Já a moderna refere-se às tecnologias que incluem biogás, biorrefinarias, biocombustíveis líquidos produzidos a partir do bagaço de plantas, entre outros, como pode ser visto na Figura 16. Cerca de 75% das energias renováveis no mundo envolve bioenergia, sendo que mais que 50% consiste em uso de biomassa. A biomassa tem um potencial significativo para aumentar o suprimento de energia em países com crescimento populacional, como Brasil, Índia e China. Pode ser queimado diretamente para aquecimento / geração de energia, ou pode ser convertido em substitutos de petróleo ou gás. Os biocombustíveis líquidos, um substituto conveniente e renovável da gasolina, são usados principalmente no setor de transportes (IRENA, 2020a).

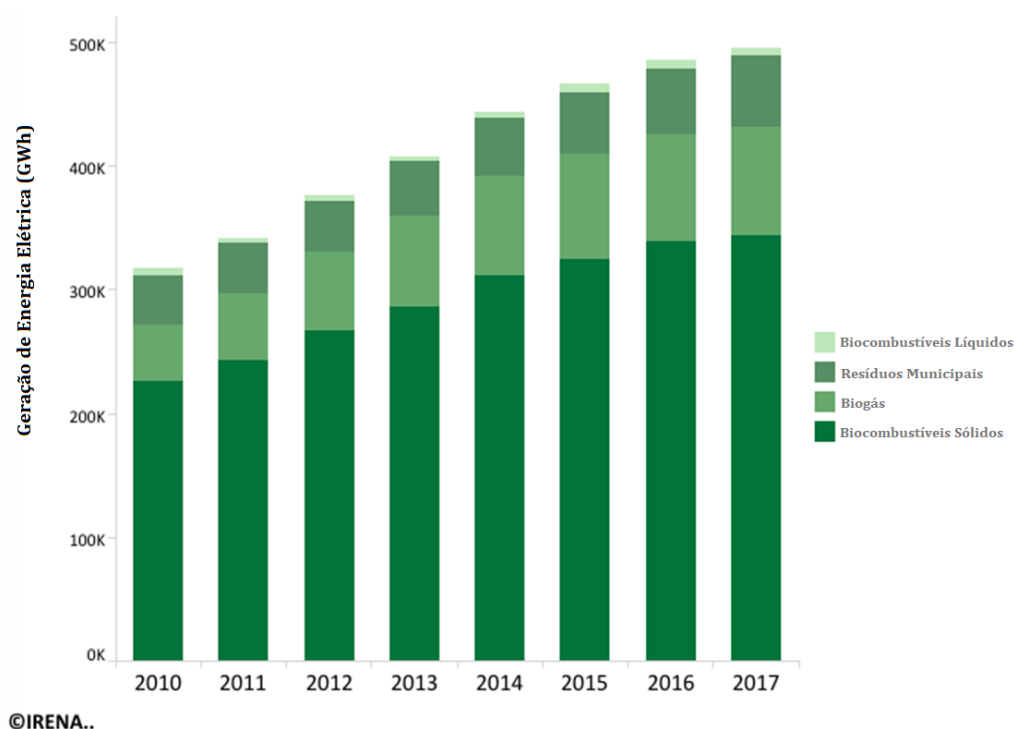


Figura 16: Geração de energia elétrica por bioenergia no mundo (em GWh).

Fonte: Adaptado de IRENA (2020a).

O Brasil, em 2017, era o segundo maior país em consumo de bioenergia no mundo, atrás somente dos Estados Unidos (IEA, 2018). É importante comentar que o Brasil é líder em biocombustíveis líquidos e possui a maior frota de veículos flexíveis, que podem rodar com bioetanol - um álcool produzido principalmente pela fermentação de carboidratos em culturas de açúcar ou amido, como milho, cana de açúcar ou sorgo doce (IRENA, 2020a).

Em 2018, quando aproximadamente 5.7 GW de nova capacidade de eletricidade por bioenergia foi adicionada no mundo, o preço LCOE médio global das usinas de bioenergia foi de US\$0.062/kWh, sendo 14% menor do que em 2017, como pode ser visto na Figura 17.

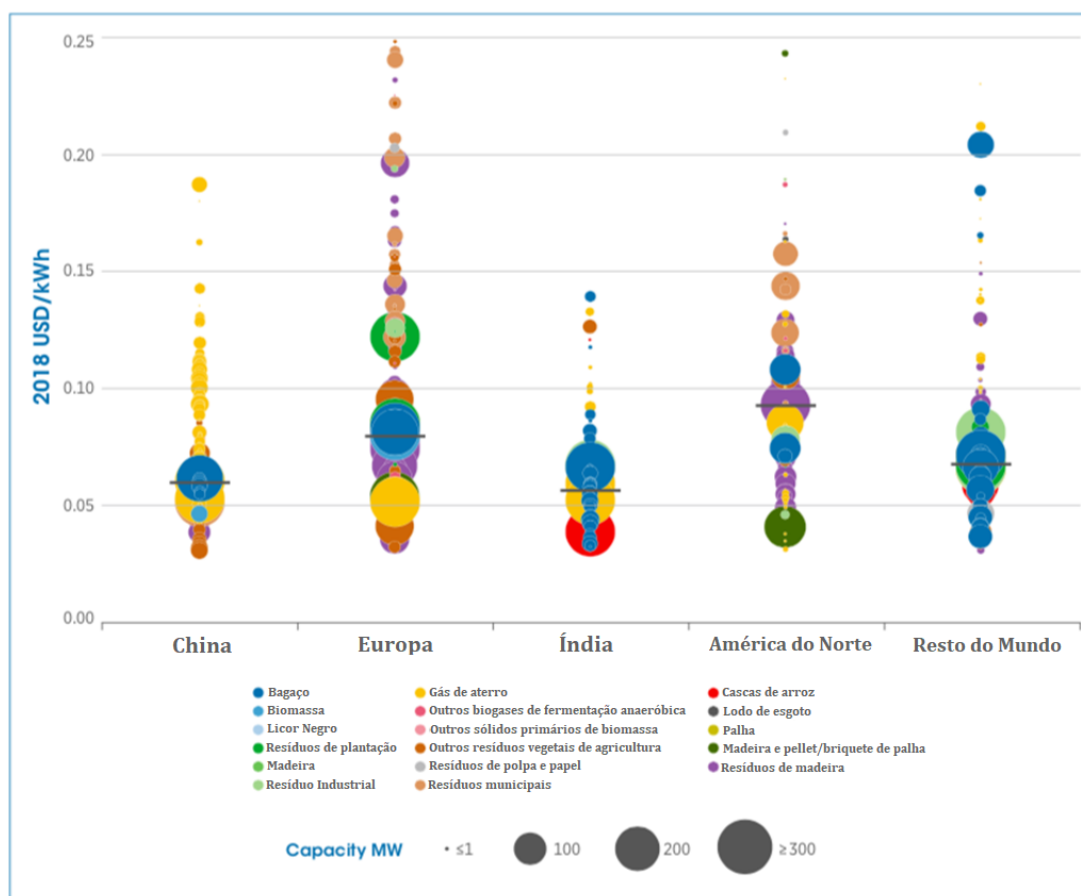


Figura 17: Preços LCOE de bioenergia no mundo.

Fonte: Adaptado IRENA (2019).

3 METODOLOGIA

O objetivo do trabalho é identificar padrões e relações existentes entre o preço do petróleo e das energias renováveis nos últimos vinte anos por meio de testes estatísticos de Correlação Cruzada e Causalidade de Granger. Esses testes foram escolhidos por serem bastante difundidos na literatura para tratamento de séries temporais e serão explicados a seguir.

3.1 Teste de Correlação Cruzada

Para as áreas de probabilidade e estatística, correlação é qualquer relação estatística (causal ou não causal) de duas variáveis. Como exemplo, pode-se citar a correlação entre alturas de membros de uma mesma família ou, até mesmo, entre valores de diferentes tipos de ações na bolsa. É importante ressaltar que apesar das variáveis serem relacionadas, isso não implica causalidade.

Como este trabalho trata sobre séries temporais, foi utilizado o teste de Correlação Cruzada, pois aplicar o teste de Correlação de Pearson⁵ para esse tipo de séries está, de certo modo, errado, já que pode ocorrer uma correlação espúria⁶ (StackExchange, 2015; Johansen, 2007).

Segundo Otto (2017), a Correlação Cruzada é calculada como pode ser visto na Equação (2).

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

⁵ Para mais informações, consultar o Apêndice H.

⁶ Correlação espúria é uma relação matemática em que duas ou mais variáveis estão associadas devido a uma coincidência ou devido a um fator terceiro, que pode ser o tempo. Assim, séries temporais podem resultar em correlações espúrias, por estarem associadas ao tempo.

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 estará defasada da outra⁷. Isso faz com que as auto dependências dessas variáveis sejam eliminadas, resultando num coeficiente de correlação mais exato do que o de Pearson.

O coeficiente de Correlação Cruzada (r) pode variar entre -1 e 1. Quando o valor de “ r ” é 1, significa uma correlação positiva perfeita, ou seja, os valores de Y aumentam na mesma proporção que os valores de X aumentam. Quando o valor de “ r ” é -1, significa uma correlação negativa perfeita, ou seja, os valores de Y aumentam / diminuem na mesma proporção que os valores de X diminuem / aumentam. No entanto, quando o valor de “ r ” é igual a zero, indica que não há relação linear entre as variáveis.

Valores absolutos 0 e 1 de “ r ” são difíceis de serem encontrados na prática e, portanto, é importante mostrar como alguns pesquisadores interpretam os valores desse coeficiente. Cohen (1988) considera valores entre 0.10 e 0.29 como pequenos / fracos; valores entre 0.30 e 0.49 como médios; e valores entre 0.50 e 1.0 como grandes / fortes. Já Dancey e Reidy (2005) possuem uma concepção ligeiramente diferente: para “ r ” entre 0.10 e 0.30 é considerado fraco; entre 0.40 e 0.60 é considerado médio / moderado; e entre 0.70 e 1.0 é considerado forte. Apesar desses pesquisadores divergirem pouco entre suas considerações, o fato é que ambos compreendem que quanto mais perto de 1 (valor absoluto), maior é o grau de dependência linear entre as variáveis e, quando mais perto de 0, menor a dependência.

⁷ É importante citar que o teste de correlação cruzada sem defasagem é igual ao teste de correlação de Pearson.

Caso haja correlação entre os dados, é possível aplicar o teste de Causalidade de Granger. Caso não haja correlação, 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 (Penn, 2018).

3.2 Teste de Causalidade de Granger

O teste de causalidade mais conhecido na literatura se deve ao econometrista Clive Granger, e parte do princípio de que o futuro não pode causar nem o passado e nem o presente. Exemplificando, caso um evento A ocorra depois de um evento B, sabe-se que é impossível que A cause B. No entanto, caso A ocorra antes de B, não significa que A cause B. O exemplo clássico que ilustra esse problema é o das previsões meteorológicas: o evento “previsão” ocorrer antes do evento “chuva” não faz com que a “previsão” cause a “chuva”. 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).

A Figura 18 demonstra de maneira gráfica a causalidade de Granger entre séries. Quando a série temporal X possui causalidade de Granger em Y, os padrões de X são aproximadamente repetidos em Y após um tempo de defasagem (indicado pelas flechas vermelhas). Portanto, valores de X podem prever valores futuros de Y.

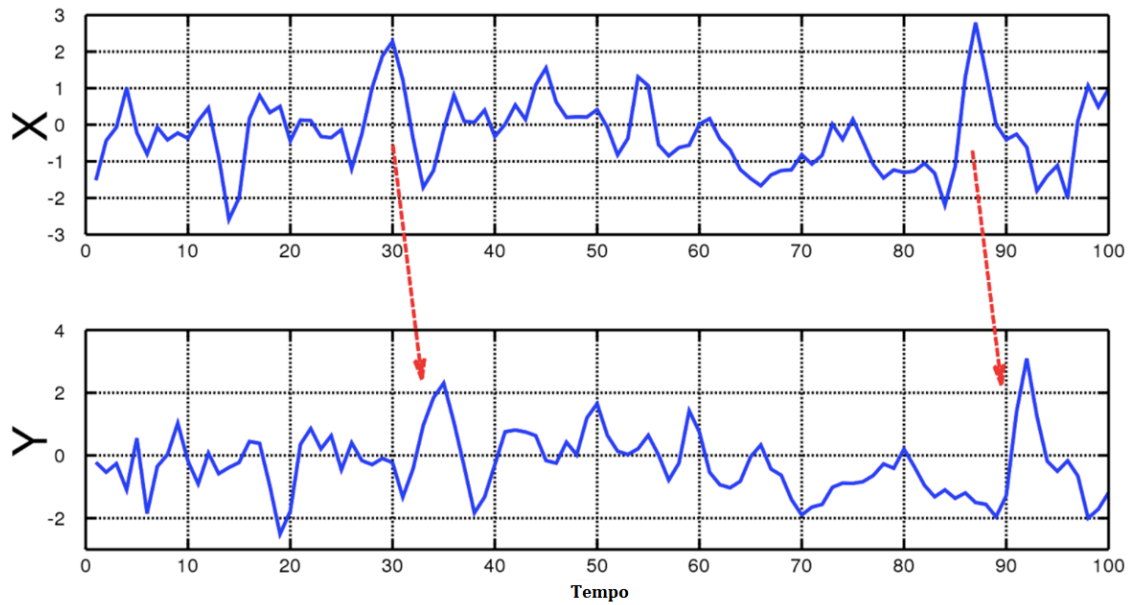


Figura 18: Exemplos de séries temporais X e Y, verificando sua causalidade.

Fonte: Adaptado de Wikipedia (2014).

Considerando duas séries temporais X_t e Y_t , o teste de causalidade de Granger assume que a informação essencial para a predição das variáveis X e Y está contida somente nas séries temporais dessas variáveis. Desse modo, “uma série de tempo estacionária X causa, no sentido de Granger, uma outra série estacionária Y se melhores predições estatisticamente significantes de Y podem ser obtidas ao incluirmos valores defasados de X aos valores defasados de Y” (Carneiro, 1997). Em termos matemáticos, o teste estima as regressões das equações (3) e (4), retiradas de Granger (1969).

$$X_t = \sum_{j=1}^m a_j X_{t-j} + \sum_{j=1}^m b_j Y_{t-j} + u_{1t} \quad (3)$$

$$Y_t = \sum_{j=1}^m c_j X_{t-j} + \sum_{j=1}^m d_j Y_{t-j} + u_{2t} \quad (4)$$

Em que a_j , b_j , c_j e d_j são coeficientes das regressões, e u_{1t} e u_{2t} são resíduos que são assumidos como não-correlacionados.

A Equação (3) mostra que os valores de X estão relacionados a valores passados do próprio X e à valores defasados de Y , enquanto a Equação (4) mostra o mesmo comportamento para Y . Geralmente X e Y são representadas como taxas de variação⁸, já que praticamente é muito difícil encontrar séries temporais estacionárias para essas análises (Carneiro, 1997).

A escolha do número de defasagens⁹, a ser utilizado nas equações (3) e (4) para a análise da relação de causalidade, expõe pensamentos contraditórios na literatura. Para Maddala (1992) a escolha pode ser arbitrária, já que uma diversidade de métodos alternativos para se determinar um tamanho ótimo de defasagens. No entanto, Gujarati e Porter (2011) ressaltam que a análise de causalidade é muito sensível em relação ao número de defasagens escolhidos, ou seja, deve-se tomar certo cuidado.

Um dos testes mais conhecidos na literatura, para a escolha do melhor número de defasagens, é a de Schwarz (1978) que consiste em minimizar a Equação (5).

$$S_c = \ln \vartheta^2 + m \cdot \ln n \quad (5)$$

Em que ϑ^2 é a estimativa de máxima verossimilhança de σ^2 (soma dos quadrados dos resíduos das equações 3 e 4); m é o número de defasagens; n é o número de observações. De modo geral, esse teste consiste em um modelo de regressão com muitas defasagens e gradativamente é reduzido essas defasagens até que se encontre um valor de m que minimize S_c (Carneiro, 1997).

⁸ Neste caso, supondo uma série X discreta com $x(1) = 2$, $x(2) = 4$ e $x(3) = 8$, a taxa de variação seria a diferença entre esses intervalos, ou seja, $Dx(1) = x(2) - x(1) = 4 - 2 = 2$, e $Dx(2) = x(3) - x(2) = 8 - 4 = 4$. Para séries contínuas, é possível utilizar a primeira derivada para verificar a taxa de variação.

⁹ O número de defasagens é a quantidade de períodos ou dados que uma variável está em relação à outra.

Assim, após estimar as regressões das equações (3) e (4), podem ocorrer 4 casos distintos (Carneiro, 1997; Gujarati e Porter, 2011):

1. Causalidade unilateral de Y para X: quando a soma dos coeficientes a_j de (3) é diferente de zero ($\sum a_j \neq 0$), e quando o conjunto de coeficientes d_j de (4) for igual a zero ($\sum d_j = 0$).
2. 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 (4) for diferente de zero ($\sum d_j \neq 0$).
3. 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 $\sum d_j \neq 0$).
4. 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 $\sum d_j = 0$).

3.3 Etapas para o desenvolvimento do trabalho

O fluxograma apresentado na Figura 19 descreve passo a passo as etapas que foram desenvolvidas para identificar padrões e relações entre o preço do petróleo e das energias renováveis.

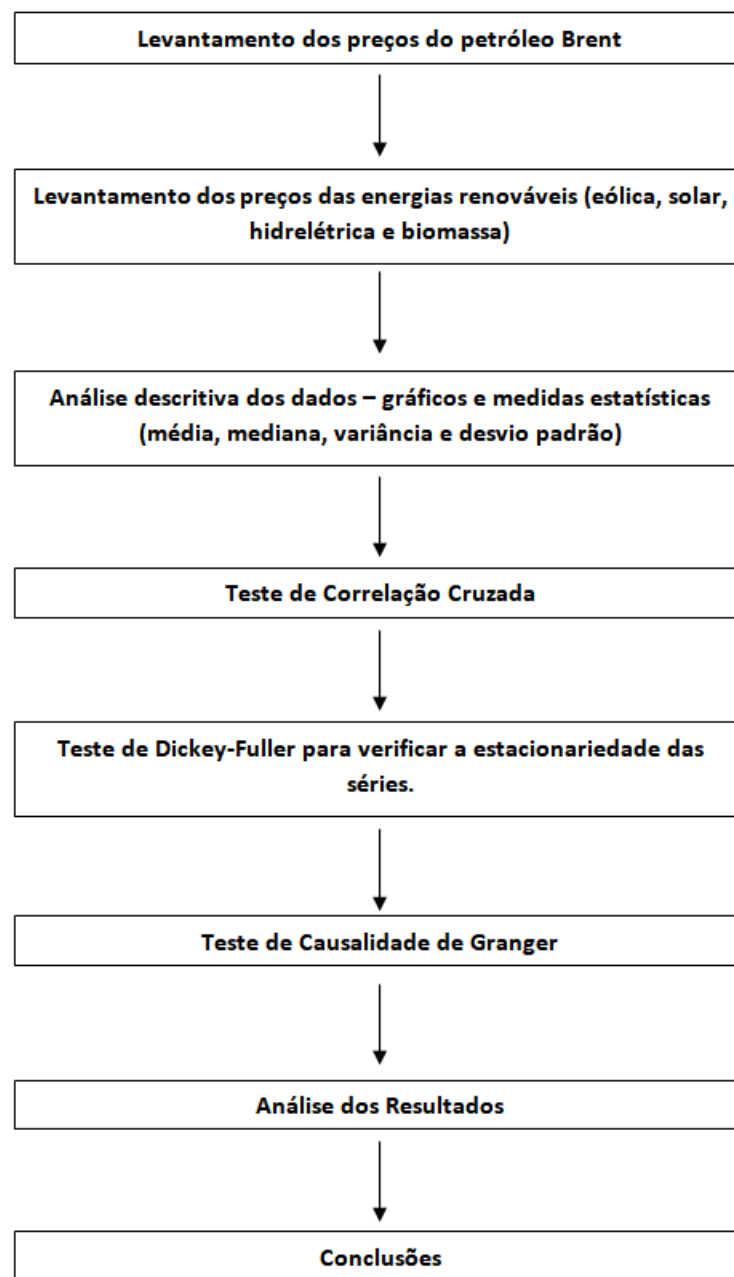


Figura 19: Fluxograma da metodologia do trabalho.

Fonte: O autor (2020).

Inicialmente, foi feito um levantamento dos preços anuais do petróleo tipo Brent. Os preços médios anuais foram extraídos da base de dados da Macrotrends (2020) e cobriu o período de janeiro de 2000 até julho de 2020. Nesse período é possível observar os efeitos de diversos eventos sobre o preço

do petróleo: crise de 2001 decorrente do atentado ao World Trade Center (IAGS, 2004; Morgan, 2009), de 2008 iniciada pelo setor imobiliário dos EUA (Amadeo, 2019; Reuters, 2009), de 2010 provocada pela crise da dívida pública da Zona Euro (Copelovitch, 2016) e, finalmente, de 2020 com os efeitos do COVID-19 (Gandra, 2020). Os preços do Brent e do WTI são próximos (Figura 4) e, portanto, a escolha de apenas um deles não afeta os resultados da pesquisa.

Os preços das energias renováveis foram extraídos do banco de dados da IRENA. O período temporal considerado foi diferente para cada tipo de energia, já que as desenvolvidas mais recentemente não têm dados disponíveis para todo o período estudado. Assim, quando os dados das energias renováveis não cobriam o período temporal do Brent (2000 a 2020), os dados do Brent foram ajustados para se adequar ao período disponível da energia renovável. Esses tipos de energias foram escolhidos, pois possuem uma grande importância na matriz energética brasileira, como pode ser visto na Figura 13, sendo que 60% é hidrelétrica, 8,5% é eólica, 8,3% é bioenergia, 1,5% é solar.

É importante ressaltar que o ideal seria utilizar dados mensais ou trimestrais para o preço do petróleo e para o preço das energias renováveis. Isso porque uma maior quantidade de dados traz maior precisão aos testes estatísticos. No entanto, não foi possível encontrar uma base de dados confiável para o preço mensal / trimestral das energias renováveis. Assim, foi decidido seguir com a base de dados anuais da IRENA.

Após o levantamento dos dados foram realizadas as seguintes etapas:

- a) Análise descritiva dos dados por meio da representação gráfica e de medidas como média, mediana, variância e desvio padrão.
- b) Teste de Correlação Cruzada. Foi utilizado pacote de Excel: *Miscellaneous Time Series Topics – Cross Correlations* (Zaiontz, [S.I.]) para facilitar o

processamento de dados. O pacote¹⁰ desenvolvido por Zaiontz utiliza a Equação (2) de um modo automatizado e com uma interface amigável, facilitando a obtenção do resultado.

- c) Teste de Dickey-Fuller para verificar se as séries são estacionárias. Caso não fossem, foi utilizada a taxa de crescimento (ver seção 3.4).
- d) Teste de Correlação de Granger. Foi utilizado um pacote de Excel: *Miscellaneous Time Series Topics - Granger Causality* (Zaiontz, [S.I.]) para facilitar o processamento de dados. O pacote¹¹ desenvolvido por Zaiontz utiliza uma hipótese nula (H_0) que afirma que os coeficientes das equações (3) e (4) são iguais a zero (nulos), ou seja, a série X causa Y caso H_0 seja rejeitado. Além disso, é utilizado o teste F^{12} para determinar se há diferença de significância entre o modelo de regressão completo (equações 3 e 4) e o modelo reduzido (em que os coeficientes das equações 3 e 4 são nulos). Se o valor-p¹³ desse teste for menor do que o valor de " α ", então rejeita-se a hipótese nula e conclui-se que X causa Y. Resumindo de um modo mais simples, a hipótese nula (H_0) afirma que as variáveis comparadas são independentes, ou seja, não existe causalidade. Assim, de modo geral, se o valor-p desse teste for menor do que o valor de " α ", então rejeita-se a hipótese nula e conclui-se que existe causalidade.

Os testes realizados por esse pacote também devem obedecer a todas as condições que foram citadas anteriormente, que são:

¹⁰ Para mais informações, consultar: <https://www.real-statistics.com/time-series-analysis/time-series-miscellaneous/cross-correlations/>

¹¹ Para mais informações, consultar: <https://www.real-statistics.com/time-series-analysis/time-series-miscellaneous/granger-causality/>

¹² Teste que para analisar a variância de entre dois conjuntos de dados diferentes e compará-los realizando um teste de hipótese. Para mais informações, consultar o capítulo 8 de Gujarati e Porter (2011).

¹³ O valor-p é definido como o menor nível de significância (α) em que uma hipótese nula pode ser rejeitada, ou seja, para valores-p maiores que o valor de significância, a hipótese nula não é rejeitada. Para mais informações, consultar o capítulo 5 de Gujarati e Porter (2011).

1. As variáveis X e Y devem ser estacionárias.
2. O número de defasagens a ser utilizado nos testes é uma questão importante a ser verificada.
3. Os resíduos / erros que estão nas equações do teste não podem estar correlacionados.
4. Como o objetivo é testar a causalidade, não é necessário apresentar os coeficientes das equações. Apenas o resultado do teste F é suficiente.

A seguir serão apresentados os resultados obtidos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Preços do petróleo e das energias renováveis

O preço do Brent pode ser visto na tabela 2, o preço das energias renováveis pode ser visto nas tabelas 3 a 6 e, finalmente, a tabela 7 mostra a média, mediana, variância e desvio padrão de cada uma delas.

Tabela 2: Preços médios anuais do barril de petróleo Brent (2000 a julho de 2020).

Ano	Preço médio	Preço de abertura no ano	Maior valor no ano	Menor valor no ano	Preço de fechamento no ano	Variação % anual
2000	\$30.38	\$25.56	\$37.22	\$23.91	\$26.72	3.73%
2001	\$25.98	\$27.29	\$32.21	\$17.50	\$19.96	-25.30%
2002	\$26.19	\$21.13	\$32.68	\$18.02	\$31.21	56.36%
2003	\$31.08	\$31.97	\$37.96	\$25.25	\$32.51	4.17%
2004	\$41.51	\$33.71	\$56.37	\$32.49	\$43.36	33.37%
2005	\$56.64	\$42.16	\$69.91	\$42.16	\$61.06	40.82%
2006	\$66.05	\$63.11	\$77.05	\$55.90	\$60.85	-0.34%
2007	\$72.34	\$60.77	\$99.16	\$50.51	\$95.95	57.68%
2008	\$99.67	\$99.64	\$145.31	\$30.28	\$44.60	-53.52%
2009	\$61.95	\$46.17	\$81.03	\$34.03	\$79.39	78.00%
2010	\$79.48	\$81.52	\$91.48	\$64.78	\$91.38	15.10%
2011	\$94.88	\$91.59	\$113.39	\$75.40	\$98.83	8.15%
2012	\$94.05	\$102.96	\$109.39	\$77.72	\$91.83	-7.08%
2013	\$97.98	\$93.14	\$110.62	\$86.65	\$98.17	6.90%
2014	\$93.17	\$95.14	\$107.95	\$53.45	\$53.45	-45.55%
2015	\$48.66	\$52.72	\$61.36	\$34.55	\$37.13	-30.53%
2016	\$43.29	\$36.81	\$54.01	\$26.19	\$53.75	44.76%
2017	\$50.80	\$52.36	\$60.46	\$42.48	\$60.46	12.48%
2018	\$65.23	\$60.37	\$77.41	\$44.48	\$45.15	-25.32%
2019	\$56.99	\$46.31	\$66.24	\$46.31	\$61.14	35.42%
2020	\$37.96	\$61.17	\$63.27	\$11.26	\$40.27	-34.13%

Fonte: Macrotrends (2020).

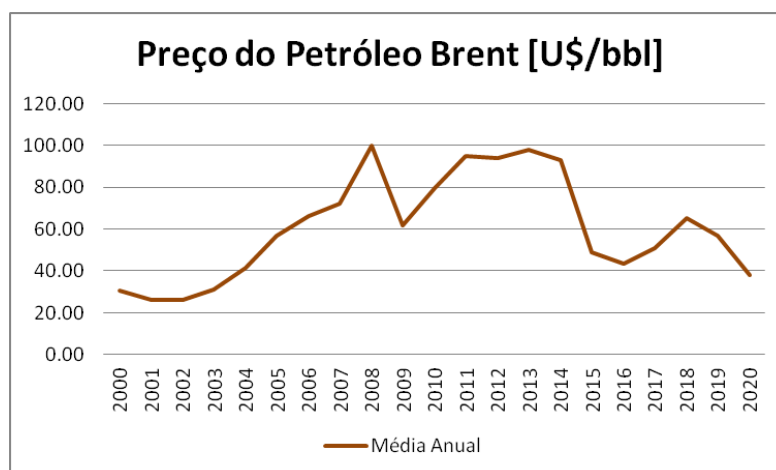


Figura 20: Série temporal do preço do Brent.

Fonte: O autor (2020).

Tabela 3: Preço médio mundial da energia eólica onshore (2000-2018)

Preço da Energia Eólica Onshore [US\$/kWh]			
Ano	Mínima	Máxima	Média
2000	0,074	0,162	0,139
2001	0,061	0,161	0,124
2002	0,066	0,142	0,117
2003	0,060	0,143	0,104
2004	0,068	0,135	0,109
2005	0,065	0,164	0,102
2006	0,059	0,132	0,103
2007	0,060	0,129	0,096
2008	0,056	0,119	0,086
2009	0,056	0,126	0,085
2010	0,056	0,114	0,084
2011	0,055	0,122	0,080
2012	0,056	0,108	0,077
2013	0,056	0,119	0,080
2014	0,055	0,120	0,075
2015	0,046	0,122	0,067
2016	0,045	0,109	0,065
2017	0,044	0,113	0,064
2018	0,043	0,099	0,055

Fonte: Adaptado de IRENA (2019).

Tabela 4: Preço médio mundial da energia solar fotovoltaica (2010-2018)

Preço da Energia Solar Fotovoltaica [US\$/kWh]			
Ano	Mínima	Máxima	Média
2010	0,183	0,511	0,370
2011	0,161	0,485	0,287
2012	0,135	0,398	0,221
2013	0,120	0,362	0,175
2014	0,101	0,363	0,165
2015	0,082	0,289	0,133
2016	0,080	0,267	0,119
2017	0,060	0,230	0,097
2018	0,057	0,218	0,085

Fonte: Adaptado de IRENA (2019).

Tabela 5: Preço médio mundial da energia hidrelétrica (2010-2018)

Preço da Energia Hidrelétrica [US\$/kWh]			
Ano	Mínima	Máxima	Média
2010	0,023	0,086	0,041
2011	0,025	0,075	0,040
2012	0,026	0,089	0,042
2013	0,026	0,096	0,045
2014	0,026	0,124	0,037
2015	0,026	0,118	0,041
2016	0,029	0,168	0,053
2017	0,027	0,236	0,055
2018	0,030	0,145	0,048

Fonte: Adaptado de IRENA (2019).

Tabela 6: Preço médio mundial da bioenergia (2010-2018)

Preço da Bioenergia [US\$/kWh]			
Ano	Mínima	Máxima	Média
2010	0,039	0,136	0,074
2011	0,035	0,147	0,054
2012	0,038	0,13	0,059
2013	0,045	0,17	0,08
2014	0,045	0,298	0,08
2015	0,04	0,443	0,073
2016	0,055	0,237	0,071
2017	0,054	0,198	0,071
2018	0,048	0,243	0,061

Fonte: Adaptado de IRENA (2019).

Tabela 7: Média, mediana, variância e desvio padrão das séries temporais do Brent e das energias renováveis.

Dados estatísticos das séries temporais				
	Média	Mediana	Variância	Desvio padrão
Brent	60.68	56.99	621.84	24.94
Eólica	0.09	0.09	5.0E-04	0.02
Solar	0.18	0.17	8.9E-03	0.09
Hidrelétrica	0.04	0.04	3.8E-05	0.01
Bioenergia	0.07	0.07	8.5E-05	0.01

Fonte: O autor (2020).

As figuras 20 e 21 mostram graficamente os preços das energias renováveis estudadas ao longo do tempo. Pode-se perceber que todas elas possuem tendência de queda, já que a tecnologia para produção desses tipos de energias está ficando mais barata ao longo do tempo.

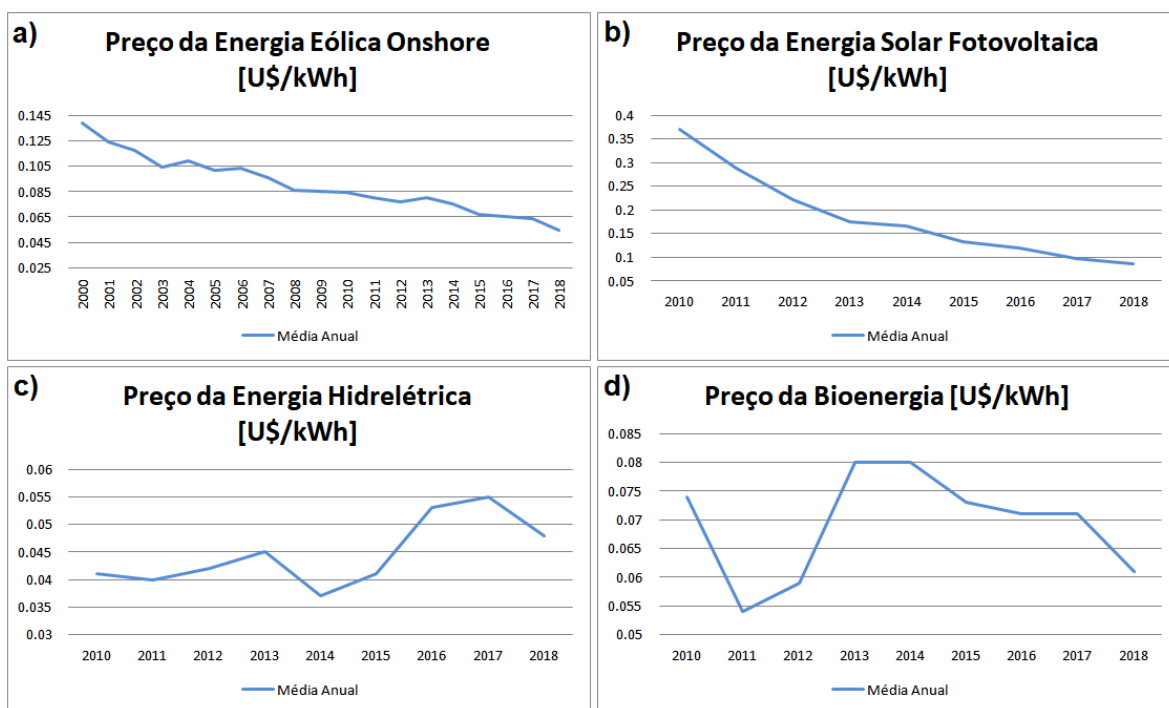


Figura 21: Séries temporais do preço das energias renováveis, sendo: a) Energia Eólica Onshore; b) Energia Solar Fotovoltaica; c) Energia Hidrelétrica e d) Bioenergia.

Fonte: O autor (2020).

Para compatibilizar o período temporal da energia renovável e dos preços do petróleo, será usado o período de 2000 a 2018 para o Brent e a energia eólica e, para as demais, será utilizado o período de 2010 a 2018, como pode ser visto na Tabela 8.

Tabela 8: Compatibilização do período temporal dos preços Brent e energias renováveis

Período temporal utilizado nos testes	
Brent - Eólica	2000 - 2018
Brent - Solar	2010 - 2018
Brent - Hidrelétrica	2010 - 2018
Brent - Bioenergia	2010 - 2018

Fonte: O autor (2020).

4.1 Teste de Correlação Cruzada

Utilizando o pacote Excel para o teste de Correlação Cruzada foram obtidos os resultados que podem ser vistos na Tabela 9.

Tabela 9: Coeficientes de Correlação Cruzada entre o preço do petróleo e o preço das energias renováveis

Correlação Cruzada: Brent – Energias Renováveis				
Defasagem	r Eólica	r Solar	r Hidr.	r Bioen.
0	-0.52	0.56	-0.67	-0.09
1	-0.53	0.59	-0.89	0.22
2	-0.60	0.57	-0.54	0.58
3	-0.75	0.40	-0.06	0.64
4	-0.92	-0.78	0.77	-0.61
5	-0.88	-0.83	0.77	-0.66
6	-0.82	-0.92	-0.19	-0.46
7	-0.86	-	-	-
8	-0.84	-	-	-
9	-0.79	-	-	-
10	-0.97	-	-	-
11	-0.95	-	-	-
12	-0.90	-	-	-
Média Absoluta	0.80	0.66	0.55	0.46
Correlação	Forte	Média/Forte	Média	Média/Fraca

Fonte: O autor (2020).

Dos quatro tipos de energia renovável, é possível perceber que a correlação da energia eólica com o Brent foi a mais forte, considerando que, para defasagens maiores, o valor do coeficiente foi entre 0,80 a 0,90, ou seja, uma correlação forte. Para as energias solar e hidrelétrica, apesar de em certas defasagens a correlação chegar a ser forte, no geral apresentam uma correlação com valores entre 0,60 e 0,80, ou seja, uma correlação de nível médio. Já a

bioenergia, apresenta os coeficientes mais baixos e que mais variam, ficando com uma média absoluta de 0,46, ou seja, uma correlação média / fraca.

Como anteriormente citado, não é necessário realizar o teste de causalidade de Granger para séries que possuem correlação fraca, pois não existe causalidade sem correlação (Penn, 2018). Dentre as energias renováveis neste estudo, somente a bioenergia obteve uma correlação próxima a fraco. No entanto, como sua correlação média é de 0,46, ela ainda será considerada no teste de Granger pelo fato desse valor ainda ser considerável.

4.2 Teste de Causalidade de Granger

Para aplicar o teste de causalidade de Granger, é necessário analisar se os dados são estacionários. Para isso, serão analisadas as figuras 20 e 21.

4.2.1 Teste de Dickey-Fuller

Analisando as Figuras 20 e 21, percebe-se que somente o Brent, a energia hidrelétrica e a bioenergia se aproximam ligeiramente de uma série estacionária, enquanto a energia eólica e solar são totalmente diferentes do que se espera de uma série estacionária. Sendo assim, como visto anteriormente, será utilizado a taxa de variação ao ano, proposta por Carneiro (1997), que faz com que os conjuntos de dados se aproximem de uma série estacionária e, assim, aplicar o teste de causalidade de Granger.

As Figuras 22 e 23 mostram que, utilizando a taxa de variação por ano, os conjuntos de dados se tornam muito mais próximos de uma série estacionária.

Para verificar se realmente são estacionárias, será realizado o teste Dickey-Fuller¹⁴ com um nível de significância de 0,05.

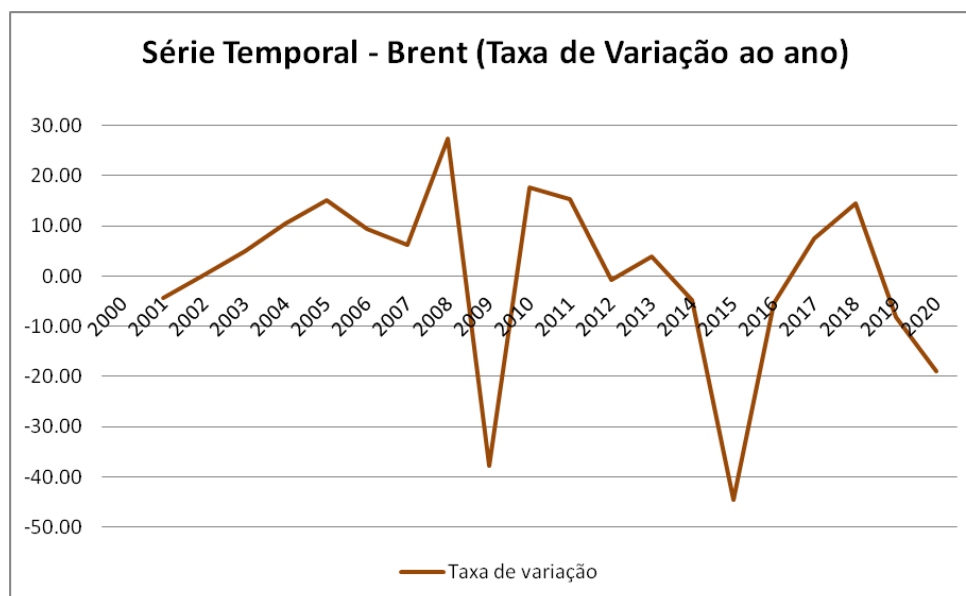


Figura 22: Série temporal da taxa de variação dos preços do Brent.

Fonte: O autor (2020).

¹⁴ Para mais informações, consultar Dickey & Fuller (1976).

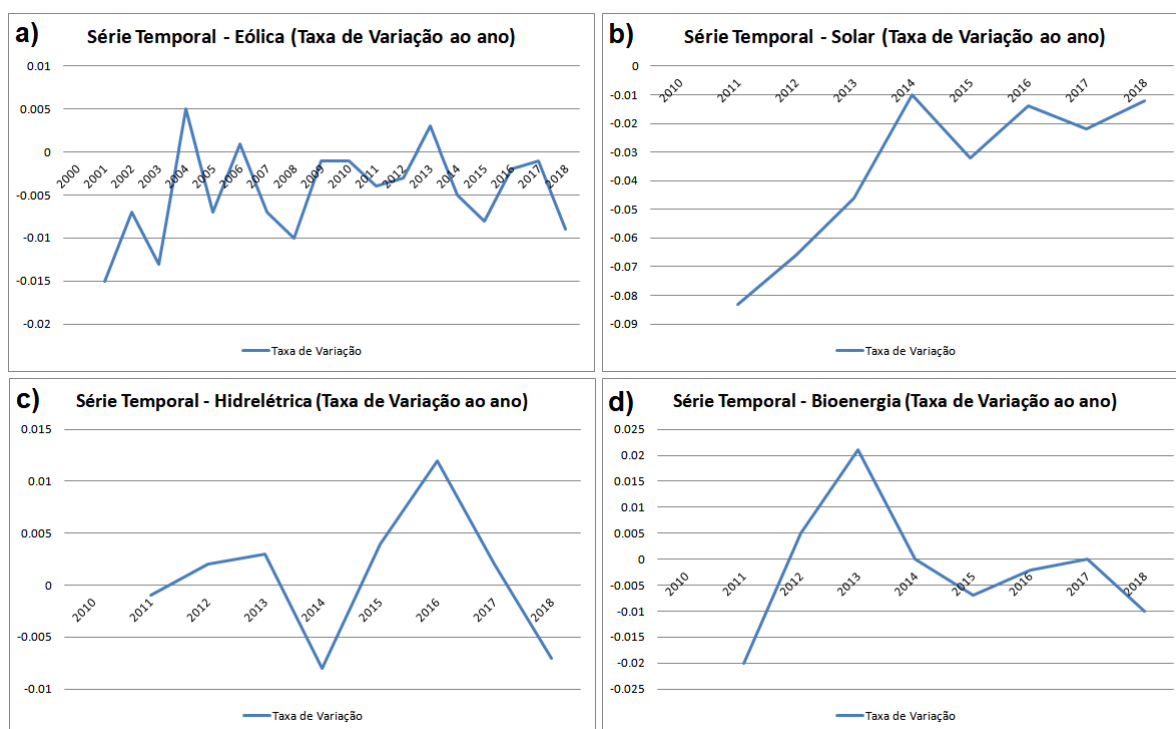


Figura 23: Série temporal da taxa de variação / primeira derivada dos preços das energias renováveis, sendo: a) Eólica; b) Solar; c) Hidrelétrica e d) Bioenergia.

Fonte: O autor (2020).

Os resultados obtidos do teste de Dickey-Fuller podem ser vistos na Tabela 10. As séries foram consideradas estacionárias para todos os casos, adotando um teste sem defasagens e de tipo zero. Com isso, é possível seguir para o teste de Causalidade de Granger.

Tabela 10: Teste de Dickey-Fuller para as energias renováveis e o petróleo Brent.

Teste Dickey-Fuller				
	Valor-p	Defasagem	Tipo ¹	Estacionário?
Brent	< 0,01	0	0	Sim
Eólica	< 0,01	0	0	Sim
Solar	0,02	0	0	Sim
Hidrelétrica	0,04	0	0	Sim
Bioenergia	< 0,01	0	0	Sim

¹O tipo 0 do teste de Dickey-Fuller considera um modelo de regressão linear sem constante e sem tendência.

Fonte: O autor (2020).

4.2.2 Teste de Causalidade de Granger

Para o teste de Causalidade de Granger, será utilizado o pacote Excel criado por Zaiontz, como comentado na seção 3.2.3. Para esse teste, será considerado o valor de α igual à 0,05, já que, como dito anteriormente, esse é o valor mais utilizado na literatura. A Tabela 11 mostra os resultados do valor-p obtido para cada relação do Brent com um tipo de energia renovável. O teste foi feito considerando que o preço do Brent pode causar o preço da energia renovável, e também, que o preço da energia renovável pode causar o preço do Brent.

Tabela 11: Valores-p do teste de Causalidade de Granger para Brent, energia eólica, energia solar, energia hidrelétrica e bioenergia.

Defasagens	Valor-p							
	Brent → Eólica	Eólica → Brent	Brent → Solar	Solar → Brent	Brent → Hidr.	Hidr. → Brent	Brent → Bioen.	Bioen. → Brent
1	0,79	0,36	0,60	0,62	0,08	0,06	0,83	0,93
2	0,93	0,64	0,94	0,14	0,72	0,05	0,84	0,55
3	0,93	0,26	-	-	-	-	-	-
4	0,88	0,59	-	-	-	-	-	-
5	0,97	0,67	-	-	-	-	-	-

Fonte: O autor (2020).

Como pode ser visto na Tabela 11, foi possível obter o valor-p para o Brent e a energia eólica com um número de defasagem de até 5. Já nos outros casos, isso não foi possível, pois a quantidade de dados analisada é menor (energia solar, hidrelétrica e bioenergia possuem dados de 2010 a 2018, enquanto o Brent e a energia eólica possuem dados de 2000 a 2018). Sendo rigoroso e analisando somente esses valores-p, não é possível afirmar que as energias renováveis possuem alguma causalidade com o preço do petróleo, já que todos esses valores são maiores do que o nível de significância α . No entanto, é possível perceber

que, para a causalidade entre Brent e energia hidrelétrica, os valores-p ficaram próximos de α , indicando uma possível causalidade.

Um fato que pode explicar por que a energia hidrelétrica influencia o petróleo mais do que os outros tipos de energia renovável é que ela é a energia renovável mais gerada no mundo, como se pode ver na Figura 9. Sendo assim, é justificável que o preço do petróleo e o preço da energia renovável mais produzida no mundo tenham taxas de variação parecidas. Um outro fato interessante seria que, para o número de defasagens 1, considerando um α igual à 0,09, pode-se dizer que o Brent e a energia hidrelétrica possuem bicausalidade, ou seja, qualquer flutuação de preço em um, irá afetar o outro, reciprocamente.

Um fato mais interessante de se observar seria que, como os coeficientes de correlação foram negativos (na maior parte) para esses conjuntos de dados, caso o preço do Brent aumente, o preço da energia hidrelétrica diminui, e caso o preço da energia hidrelétrica aumente, o preço do Brent diminui. Isso pode mostrar que, uma alta na procura do Brent indique uma baixa na procura da energia hidrelétrica, resultando no preço do Brent subir e no preço da energia hidrelétrica descer. Esse fato mostra, com um caso real e didático, como funciona a lei da oferta e demanda.

5 CONCLUSÃO

As energias renováveis vêm ganhando destaque nos últimos anos devido ao fato de serem menos poluentes e inesgotáveis, diferentemente do petróleo que a cada ano fica mais escasso e difícil de ser explorado. Com isso, este trabalho teve como objetivo identificar padrões e relações existentes entre o preço do petróleo e das energias renováveis nos últimos vinte anos. Para isso, foram utilizados os testes de Correlação Cruzada e o de Causalidade de Granger.

O teste de Correlação Cruzada mostrou que os preços das quatro energias renováveis escolhidas (eólica, solar, hidrelétrica e biomassa) mantêm correlação entre média e forte com o preço do petróleo, ou seja, existe relação entre os preços desses dois tipos de energia. Já no teste de Causalidade de Granger foi observada bicausalidade somente entre o preço do petróleo e da energia hidrelétrica. Mesmo assim, essa bicausalidade deve ser considerada com ressalvas, já que foi necessário considerar um nível de significância de 0,09.

A correlação e a causalidade identificada entre o preço do petróleo e o preço da energia hidrelétrica pode ser explicada pelo fato da energia hidrelétrica ser a energia renovável mais utilizada no mundo, mas, também, pelo fato da energia elétrica ser uma forte substituta dos combustíveis fósseis em veículos automotores, concorrendo assim diretamente com o petróleo.

A compreensão dos padrões e relações existentes entre os preços das energias alternativas e do petróleo contribui para que os tomadores de decisão definam melhor suas estratégias e operem de modo mais eficiente. É importante ressaltar a dificuldade para obter dados do preço das energias renováveis na literatura. O trabalho levantou e consolidou os dados com referências num único lugar.

Para desenvolvimento de trabalhos futuros recomenda-se ampliar a base de dados com levantamentos abarcando períodos mais longos ou mesmo com maior

frequência. Além disso, a realização do teste estatístico de cointegração pode indicar se as séries temporais têm relação de longo prazo.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). **Boletim de Recursos e Reservas de Petróleo e Gás Natural 2018**. Superintendência de Desenvolvimento e Produção, 2019a. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/images/DADOS_ESTATISTICOS/Reservas/Boletim_Reservas_2018.pdf> Acesso em 30 mar. 2020.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). **Legislação ANP - PORTARIA ANP Nº9**. 2000. Disponível em: <<http://legislacao.anp.gov.br/?path=legislacao-anp/portarias-operacionais/2000/janeiro&item=panp-9--2000>> Acesso em 30 mar. 2020.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). **Meio Ambiente**. 2019b. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/exploracao-e-producao-de-oleo-e-gas/seguranca-operacional-e-meio-ambiente/meio-ambiente>> Acesso em 14 abr. 2020.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). **Petróleo**. [S.l.] Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/petroleo-derivado/petroleo>> Acesso em 30 mar. 2020.

AMADEO, K. **2009 Financial Crisis Explanation with Timeline**. 2019. Disponível em: <<https://www.thebalance.com/2009-financial-crisis-bailouts-3305539>> Acesso em 02 abr. 2020.

ARELLANO, P.; TANSEY, K.; BALZTER, H.; TELLKAMP, M. **Plant Family-Specific Impacts of Petroleum Pollution on Biodiversity and Leaf Chlorophyll Content in the Amazon Rainforest of Ecuador**. PloS one, 12(1), e0169867. doi:10.1371/journal.pone.0169867, 2017a.

ARELLANO, P.; TANSEY, K.; BALZTER, H. BOYD, D. S.; **Field spectroscopy and radiative transfer modelling to assess impacts of petroleum pollution on biophysical and biochemical parameters of the Amazon rainforest**. Environ Earth Sci 76, 217. doi:10.1007/s12665-017-6536-6, 2017b.

ARIAS, E.; XU, JIAQUAN. **United States Life Tables, 2017**. National Vital Statistics Reports 68, no.7, 2019. Disponível em: <https://www.cdc.gov/nchs/data/nvsr/nvsr68/nvsr68_07-508.pdf> Acesso em 22 abr. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA (ABSOLAR). **Infográfico Absolar**. 2020. Disponível em: <<http://www.absolar.org.br/infografico-absolar-.html>> Acesso em 28 abr. 2020.

BP. **BP Statistical Review of World Energy 68th Edition**. 2019. Disponível em: <<https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2019-full-report.pdf>> Acesso em 30 mar. 2020.

BRASKEM. **Energia eólica já é a segunda maior fonte energética do Brasil**. 2019. Disponível em: <<https://bluevisionbraskem.com/inovacao/energia-eolica-ja-e-a-segunda-maior-fonte-energetica-do-brasil/>> Acesso em 27 abr. 2020.

BRITISH BROADCASTING CORPORATION (BBC). **A guerra de preços entre Rússia e Arábia Saudita que derrubou o preço do petróleo**. 2020. Disponível em: <<https://g1.globo.com/economia/noticia/2020/03/09/a-guerra-de-precos-entre-russia-e-arabia-saudita-que-derrubou-o-preco-do-petroleo.ghtml>> Acesso em 26 mar. 2020.

CANALENERGIA. **Equinor financia pós-graduação em energia renovável, petróleo e gás natural**. 2018. Disponível em: <<https://www.canalenergia.com.br/noticias/53082234/equinor-financia-pos-graduacao-em-energia-renovavel-petroleo-e-gas-natural>> Acesso em 12 mar. 2020.

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 jun. 2020.

COHEN, J. **Statistical power analysis for the behavioral sciences**. Routledge, 2nd edition. ISBN 978-0805802832, 1988.

COPELOVITCH, M.; FRIEDEN J.; WALTER, S. **The Political Economy of the Euro Crisis**. Comparative Political Studies 49, no. 7, pp. 811–40. doi:10.1177/0010414016633227, 2016.

COTTA, P. **O Petróleo é nosso?** Guaravira Editores, Rio de Janeiro, 1975.

DANCEY, C.; REIDY, J. **Estatística Sem Matemática para Psicologia: Usando SPSS para Windows**, Artmed, 3^a edição. ISBN 9788536306889, 2006.

DANTAS, C. **Taxa de letalidade do Sars-Cov-2 é maior que a da gripe, mas é a menor da família coronavírus; veja comparativos**. 2020. Disponível em: <<https://g1.globo.com/bemestar/coronavirus/noticia/2020/03/14/taxa-de-letalidade-do-sars-cov-2-e-maior-que-a-da-gripe-mas-e-a-menor-da-familia-coronavirus-veja-comparativos.ghtml>> Acesso em 26 mar. 2020.

DICKEY, D. A.; FULLER, W. A. **Distribution of the Estimators for Autoregressive Time Series With a Unit Root**. Journal of the American Statistical Association 74, no. 366, pp. 427-431, 1976. doi: 10.2307/2286348.

DUNN, S.; HOLLOWAY, J. **The Pricing Of Crude Oil**, RBA Bulletin (Print copy discontinued), issue, pp. 65-74, 2012. Disponível em: <<https://EconPapers.repec.org/RePEc:rba:rbabul:sep2012-08>> Acesso em 31 mar. 2020.

ELLABAN, O.; ABU-RUB, H.; BLAABJERG, F. **Renewable energy resources: Current status, future prospects and their enabling technology**. Renewable and Sustainable Energy Reviews 39, pp. 748–764. doi:10.1016/j.rser.2014.07.113, 2014.

ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION (EIA). **Crude oils have different quality characteristics**. 2012. Disponível em: <<https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=7110>> Acesso em 30 mar. 2020.

ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION (EIA). **Brazil Executive Summary**. 2019. Disponível em: <<https://www.eia.gov/international/analysis/country/BRA>> Acesso em 27 abr. 2020.

FIGUEIREDO, D. B.; SILVA, J. A. **Desvendando os Mistérios do Coeficiente de Correlação de Pearson (r)**, Revista Política Hoje, [S.l.], 18(1). ISSN 0104-7094, 2010. Disponível em: <<https://periodicos.ufpe.br/revistas/politica hoje/article/view/3852>> Acesso em 02 jun. 2020.

G1. **Preço do petróleo fecha em queda conforme investidores reavaliam riscos no Oriente Médio**. 2020. Disponível em: <<https://g1.globo.com/economia/noticia/2020/01/07/preco-do-petroleo-tem-queda-apos-barril-bater-us-70-na-vespera.ghtml>> Acesso em 02 jun. 2020.

GANDRA, A. **Coronavírus afeta variação nos preços de barril de petróleo no mundo**. 2020. Disponível em: <<https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2020-03/coronavirus-afeta-variacao-nos-precos-do-barril-de-petroleo-no-mundo>> Acesso em 26 mar. 2020.

GARSON, G. D. **Statnotes: Topics in Multivariate Analysis**. 2009. Disponível em: <<http://faculty.chass.ncsu.edu/garson/PA765/statnote.htm>> Acesso em 02 jun. 2020.

GRANGER, C. W. J. **Investigating Causal Relations by Econometric Models and Cross-spectral Methods**. Econometrica. 37 (3), pp. 424–438. doi:10.2307/1912791, 1969.

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 mar. 2020.

GUJARATI, D. N.; PORTER, D. C. **Econometria Básica – 5ª edição**. AMGH Editora. ISBN 9788580550511, 2011.

HUSSEINI, T. **The future of oil and gas: Eight bold industry predictions**. 2018. Disponível em: <<https://www.offshore-technology.com/features/the-future-of-oil-and-gas-predictions/>> Acesso em 17 abr. 2020.

IAGS – Institute for the Analysis of Global Security. **How much did the September 11 terrorist attack cost America?** 2004. Disponível em: <<http://www.iags.org/costof911.html>> Acesso em 02 abr. 2020.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Renewables 2018 – Fuel Report**. 2018. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/renewables-2018>> Acesso em 28 abr. 2020.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). **Renewable Power Generation Costs in 2018**. ISBN: 978-92-9260-126-3, 2019.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). **Bioenergy**. 2020a. Disponível em: <<https://www.irena.org/bioenergy>> Acesso em 28 abr. 2020.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). **Hydropower**. 2020b. Disponível em: <<https://www.irena.org/hydropower>> Acesso em 27 abr. 2020.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). **Solar Energy**. 2020c. Disponível em: <<https://www.irena.org/solar>> Acesso em 28 abr. 2020.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). **Wind Energy**. 2020d. Disponível em: <<https://www.irena.org/wind>> Acesso em 27 abr. 2020.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). **Statistics Time Series – Trends in Renewable Energy**. 2020e. Disponível em: <<https://www.irena.org/Statistics/View-Data-by-Topic/Capacity-and-Generation/Statistics-Time-Series>> Acesso em 14 ago. 2020.

JOHANSEN, S. **Correlation, regression, and cointegration of nonstationary economic time series**. University of Copenhagen, 2007. Disponível em: <<http://web.math.ku.dk/~sjo/papers/LisbonPaper.pdf>> Acesso em 07 out. 2020.

KAMAL, M. S. **A Review of Gemini Surfactants: Potential Application in Enhanced Oil Recovery**. Journal of Surfactants and Detergents, 19, pp. 223-236, doi: 10.1007/s11743-015-1776-5, 2016.

MACROTRENDS. **Crude Oil Prices - 70 Year Historical Chart**. 2020. Disponível em: <<https://www.macrotrends.net/1369/crude-oil-price-history-chart>> Acesso em 03 ago. 2020.

MADDALA, G.S. **Introduction to Econometrics**. MacMillan, 2nd edition. ISBN 9780023745454, 1992.

MOORE, D. S. **The Basic Practice of Statistics**. Freeman, 7th Edition. ISBN 978-1464142536, 2015.

MORGAN, M. J. **The Impact of 9/11 on Politics and War: The Day that Changed Everything?** Palgrave Macmillan. ISBN 978-0-230-60763-7, 2009.

OILSANDSMAGAZINE. **Oil Prices Explained: Putting a dollar value on a barrel of crude**. 2017. Disponível em: <<https://www.oilsandsmagazine.com/market-insights/oil-prices-explained-how-to-value-a-barrel-of-crude>> Acesso em 03 ago. 2020.

OPEC. **OPEC Annual Statistical Bulletin 2019**. 2019. Disponível em: <https://www.opec.org/opec_web/en/publications/202.htm> Acesso em 30 mar. 2020.

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 ago. 2020.

PORTALACTION. **Séries Temporais – 1.1 Estacionariedade**. [S.l.]. Disponível em: <<http://www.portalaction.com.br/series-temporais>> Acesso em 03 jun. 2020.

PORTALSOLAR. **Petrobrás começa a investir em Energia Solar**. 2018. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/blog-solar/energia-solar/petrobras-comeca-a-investir-em-energia-solar.html>> Acesso em 12 mar. 2020.

PORTALSOLAR. **Dados do Mercado de Energia Solar no Brasil**. 2020. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/mercado-de-energia-solar-no-brasil.html>> Acesso em 28 abr. 2020.

RAFFA, P.; BROEKHUIS, A.; PICCHIONI, F. **Polymeric Surfactants for Enhanced Oil Recovery: a Review**. Journal of Petroleum Science and Engineering, 145, pp. 723-733. doi: 10.1016/j.petrol.2016.07.007, 2016.

REUTERS. **Three Top Economists Agree 2009 Worst Financial Crisis Since Great Depression; Risks Increase if Right Steps are Not Taken**. 2009. Disponível em:

<<https://web.archive.org/web/20100212214538/https://www.reuters.com/article/pressRelease/idUS193520%2B27-Feb-2009%2BBW20090227>> Acesso em 02 abr. 2020.

REUTERS. **Preços do petróleo caem pela 4ª semana seguida.** 2020. Disponível em: <<https://g1.globo.com/economia/noticia/2020/03/20/precos-do-petroleo-caem-pela-4a-semana-seguida.ghtml>> Acesso em 26 mar. 2020.

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 31 mar. 2020.

RNCAN. **O que são commodities, tipos, vantagens e como investir.** 2018. Disponível em: <<https://blog.rico.com.vc/o-que-sao-commodities>> Acesso em 30 mar. 2020.

ROMANZOTI, N. **O Banco Mundial vai parar de financiar negócios de petróleo a partir de 2019.** 2017. Disponível em: <<https://hypescience.com/o-banco-mundial-vai-parar-de-financiar-negocios-de-combustiveis-fosseis-partir-de-2019/>> Acesso em 12 mar. 2020.

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 09 jun. 2020.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. **An analysis of variance test for normality (complete samples).** Biometrika, Volume 52, Issue 3-4, pp.591-611 doi: 10.1093/biomet/52.3-4.591, 1965.

SIMARD, R.; L'ECUYER, P. **Computing the Two-Sided Kolmogorov-Smirnov Distribution.** Journal of Statistical Software, 39(11), doi: 10.18637/jss.v039.i11, 2011.

STACKEXCHANGE. **How to use Pearson correlation correctly with time series.** 2015. Disponível em: <<https://stats.stackexchange.com/questions/133155/how-to-use-pearson-correlation-correctly-with-time-series/133171#133171>> Acesso em 07 out. 2020.

STANTON, J. M. **Galton, Pearson, and the peas: A brief history of linear regression for statistics instructors.** Journal of Statistical Education, 9(3), 2001. Disponível em: <<http://www.amstat.org/publications/JSE/v9n3/stanton.html>> Acesso em 02 jun. 2020.

TEIXEIRA, W.; TOLEDO, M.; FAIRCHILD, T.; TAIOLI, F. **Decifrando a terra.** São Paulo Oficina de Textos, pp. 285-304, 2000.

TORO. **Commodities – o que são commodities?** 2019. Disponível em: <<https://blog.toroinvestimentos.com.br/commodities-o-que-sao>> Acesso em 30 mar. 2020.

TRADINGECONOMICS. **Brent Crude oil** 2020a. Disponível em: <<https://tradingeconomics.com/commodity/crude-oil>> Acesso em 08 abr. 2020.

TRADINGECONOMICS. **Crude oil** 2020b. Disponível em: <<https://tradingeconomics.com/commodity/crude-oil>> Acesso em 08 abr. 2020.

TULLY, A. **How long will world's oil reserves last? 53 years, says BP.** 2014. Disponível em: <<https://www.csmonitor.com/Environment/Energy-Voices/2014/0714/How-long-will-world-s-oil-reserves-last-53-years-says-BP>> Acesso em 17 abr. 2020.

WIKIPEDIA. **Granger Causality.** 2014. Disponível em: <https://en.wikipedia.org/wiki/Granger_causality#/media/File:GrangerCausalityIllustration.svg> Acesso em 03 jun. 2020.

XP. **Commodities: O que são e como funcionam (Guia Completo).** 2019. Disponível em: <<https://blog.xpi.com.br/commodities/>> Acesso em 30 mar. 2020.

ZACHARIAS, D.; REZENDE, K.; FORNARO, A. **Offshore petroleum pollution compared numerically via algorithm tests and computation solutions.** Ocean Engineering, 151, pp. 191-198. doi:10.1016/j.oceaneng.2018.01.007, 2018.

ZAIONTZ, C. **Real Statistics.** [S.l.]. Disponível em: <<https://www.real-statistics.com>> Acesso em 09 jun. 2020.

APÊNDICE A – INFORMAÇÕES ADICIONAIS: PETRÓLEO

A composição química do petróleo é importante no quesito econômico, pois o seu valor de mercado irá se modificar caso seja considerado leve ou pesado. Basicamente, pode-se dizer que os petróleos leves possuem as frações mais leves de hidrocarbonetos (moléculas de carbono e hidrogênio) e os petróleos mais pesados possuem as frações mais pesadas. No entanto, para definir exatamente um petróleo como leve ou pesado, é usado um cálculo do °API. A Equação (AN1) mostra como fazer esse cálculo:

$$^{\circ}API = \frac{141,5}{\rho} - 131,5 \quad (AN1)$$

Em que ρ é a densidade do petróleo em relação à água. De acordo com a legislação da ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis) a classificação dos petróleos são:

- Petróleo Leve – todo petróleo com densidade igual ou inferior a 0,87 (ou grau API igual ou superior a 31°);
- Petróleo Mediano – todo petróleo com densidade superior a 0,87 e igual ou inferior a 0,92 (ou grau API igual ou superior a 22° e inferior a 31°);
- Petróleo Pesado – todo petróleo com densidade superior a 0,92 e igual ou inferior a 1,00 (ou grau API igual ou superior a 10° e inferior a 22°);
- Petróleo Extrapesado – todo petróleo com densidade superior a 1,00 (ou grau API inferior a 10°).

É importante ressaltar que o petróleo pode conter, além de carbono e hidrogênio, frações de nitrogênio, oxigênio, compostos de enxofre e íons metálicos (ANP, 2002?).

A partir do petróleo bruto é possível obter diversos tipos de produtos. No entanto, para isso, é necessário realizar um processo de refino, em que o petróleo é aquecido e os diferentes tipos de hidrocarboneto são separados de acordo com suas faixas de ebulição. Alguns produtos resultantes desse processo são: gás de

petróleo, gás liquefeito de petróleo (GLP), nafta, gasolina, querosene, óleo diesel, entre outros.

APÊNDICE B - ORGANIZAÇÃO DOS PAÍSES EXPORTADORES DE PETRÓLEO

A Organização dos Países Exportadores de Petróleo (OPEP) foi criada em 1960 com objetivo de coordenar e unificar as políticas de petróleo entre os países membros para assegurar preços justos e estáveis para os produtores de petróleo. A OPEP surgiu numa época em que o mercado de petróleo era dominado pelas Sete Irmãs, companhias multinacionais que detinham a maior parte da produção de petróleo no mundo. Atualmente essa organização possui treze membros, que são: Argélia, Angola, Congo, Guiné Equatorial, Gabão, Irã, Iraque, Kuwait, Líbia, Nigéria, Arábia Saudita, Emirados Árabes Unidos e Venezuela.

De acordo com a Tabela AP1, pode-se perceber que muitos dos países membros da OPEP estão entre os países com maiores reservas de petróleo no mundo. De acordo com as estimativas realizadas, cerca de 79% das reservas provadas no mundo são de membros da OPEP. É importante ressaltar que seus países membros adicionaram uma grande quantidade de reservas de petróleo nos últimos anos graças ao grande investimento em explorações e recuperações avançadas. Como resultado, as reservas provadas de petróleo da OPEP são de aproximadamente 1190 bilhões de barris (OPEC, 2019).

APÊNDICE C - PAÍSES COM AS MAIORES RESERVAS DE PETRÓLEO

O mundo atualmente é desigual em recursos naturais. É comum países que possuem mais riquezas que outros. No caso do petróleo não é diferente: existem poucos países com reservas grandes de petróleo e, por isso, esses países possuem uma influência geopolítica elevada. Isso porque cerca de um terço do

consumo de energia do mundo é baseada em derivados de petróleo (BP, 2019). No entanto, os países que possuem esse recurso necessitam provar essas reservas.

Na tabela AP1 é mostrado os quinze países com maiores reservas provadas de petróleo do mundo.

Tabela AP1: Países com maiores reservas provadas de petróleo no mundo (BP, 2019)

País	Reservas Provadas
Venezuela	303 bilhões de barris
Arábia Saudita	298 bilhões de barris
Canadá	168 bilhões de barris
Irã	156 bilhões de barris
Iraque	147 bilhões de barris
Rússia	106 bilhões de barris
Kuwait	102 bilhões de barris
Emirados Árabes	98 bilhões de barris
Estados Unidos	61 bilhões de barris
Líbia	48 bilhões de barris
Nigéria	38 bilhões de barris
Cazaquistão	30 bilhões de barris
China	26 bilhões de barris
Catar	25 bilhões de barris
Brasil	13 bilhões de barris

Fonte: BP (2019)

APÊNDICE D – RESERVAS PROVADAS

Todos os levantamentos de dados que analisam as reservas de petróleo utilizam as informações de reservas provadas. Uma reserva provada é a “quantidade de Petróleo ou Gás Natural que a análise de dados de geociências e engenharia indica com razoável certeza, como recuperáveis comercialmente, na data de referência do BAR, de Reservatórios descobertos e com condições econômicas, métodos operacionais e regulamentação governamental definidos. Se forem usados métodos determinísticos de avaliação, o termo “razoável certeza” indica um alto grau de confiança de que a quantidade será recuperada. Quando são usados métodos probabilísticos, a probabilidade de que a quantidade recuperada seja igual ou maior que a estimativa deverá ser de pelo menos 90%” (ANP, 2019a).

APÊNDICE E – GRÁFICO: TIPOS DE PETRÓLEO

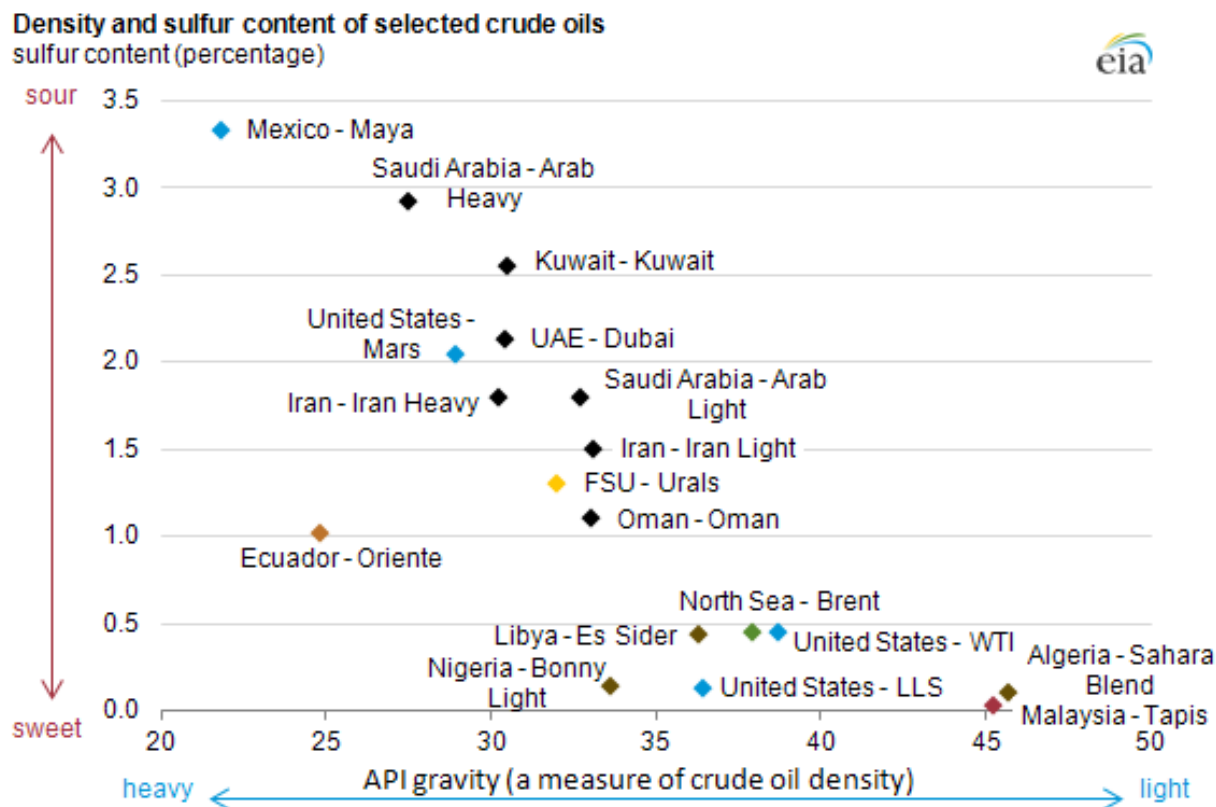


Figura AP1: Tipos de petróleos definidos por sua densidade e porcentagem de enxofre.

Fonte: EIA (2012).

APÊNDICE F – POLUIÇÃO GERADA PELO PETRÓLEO

O petróleo, apesar de atualmente ser o principal combustível da sociedade, é um dos maiores causadores de impactos ambientais, tanto diretamente quanto indiretamente. Sobre os efeitos diretos, podem ocorrer derramamentos de óleo nos mares provenientes de acidentes de plataformas ou descuidos de navios, afetando praticamente toda vida marítima da região, já que o petróleo irá formar uma camada impenetrável de luz, fazendo com que os fito plânctons não consigam realizar fotossíntese. Sobre os efeitos indiretos, pode-se citar a poluição

gerada por veículos automotores, já que grande parte deles utilizam combustíveis a base de petróleo. Além disso, é possível citar qualquer objeto que tenha petróleo em sua composição como um possível poluente, já que eles podem acabar dentro dos mares, prejudicando a vida marinha. No entanto, existem pessoas estudiosas e comprometidas que contribuem ao realizarem pesquisas sobre os efeitos da poluição do petróleo em áreas específicas ou até mesmo propondo soluções. Dentro dessas pesquisas, pode-se citar algumas mais recentes sobre a poluição do petróleo na floresta Amazônica (Arellano et al., 2017a e 2017b) e sobre modelos de poluição de petróleo offshore utilizando algoritmos numéricos (Zacharias et al., 2018).

Para que não ocorra um excesso de poluição é necessário existir agências reguladoras. No caso do Brasil existe a ANP, que fiscaliza oleodutos, gasodutos e campos de produção de petróleo. É importante ressaltar que a ANP possui parcerias com a Marinha do Brasil, com o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente (Ibama) e com os órgãos ambientais de todos os estados para abranger o maior nível de segurança para atividades de exploração e produção de petróleo. Além disso, a ANP “atende a convocações dos Ministérios Público Federal e Estaduais, a partir de denúncias da sociedade, para a verificação de condutas inadequadas por parte de agentes regulados, incluindo a geração de passivos ambientais. Outra importante atividade da Agência é a realização de vistorias em áreas passíveis de serem ofertadas em futuras rodadas de licitações de blocos exploratórios” (ANP, 2019b).

APÊNDICE G – O FUTURO DO PETRÓLEO

O futuro do petróleo é incerto, mas não porque um dia ele irá acabar. Apesar de existirem projeções afirmando que o petróleo irá durar até aproximadamente 2067 (Tully, 2014), provavelmente ele irá durar mais tempo. Isso se deve ao fato da tecnologia avançar ao longo dos anos e, reservatórios que antes eram considerados como não mais recuperáveis podem voltar a se tornar viáveis e com

grande capacidade de produção. Uma tecnologia que se fala atualmente é sobre os *Smart Drillings*, que permite que as plataformas de perfuração demonstrem conformidade com todas as regulamentações aplicáveis durante qualquer processo de perfuração, on-line e em tempo real. Um outro tipo de tecnologia seria sobre a utilização de *blockchain* como forma de controlar os dados, reduzindo riscos de fraudes, erros, etc (Husseini, 2018). Ambas tecnologias conseguem fazer com que o petróleo tenha mercado para permanecer por muitos anos, sendo que, em paralelo, ainda existem muitos outros desenvolvimentos em recuperações avançadas e melhoradas (Kamal, 2015; Raffa et al., 2016).

Existe a possibilidade de que as energias renováveis sejam o próximo modal de energia que será utilizado no mundo. Exatamente por isso é possível pensar que o dinheiro proveniente hoje do petróleo poderá financiar o próximo modal energético. Um exemplo claro de que isso está ocorrendo é a mudança do *slogan* da Petrobrás, por volta de 2013, em que começou a adotar “o desafio é a nossa energia”. Ao invés de focar isoladamente para o petróleo, a Petrobrás começou a focar em energia, já que, futuramente ela deverá se tornar uma empresa de energia e não somente de petróleo. Outros exemplos na indústria do petróleo também podem ser citados, como a mudança de nomes das empresas British Petroleum para BP e da Statoil para Equinor. Ambas tiraram a palavra óleo/petróleo de suas marcas.

APÊNDICE H - CORRELAÇÃO DE PEARSON

O coeficiente de correlação de Pearson é uma medida de associação linear entre variáveis (Figueiredo e Silva, 2009). Apesar do nome desse método atribuir todo o mérito a Karl Pearson, é importante comentar que a origem desse coeficiente foi de um trabalho conjunto entre Karl Pearson e Francis Galton (Stanton, 2001).

Definição do coeficiente de correlação

O coeficiente de correlação de Pearson é, para Garson (2009), “uma medida de associação bivariada (força) do grau de relacionamento entre duas variáveis”, enquanto para Moore (2015), “mensura a direção e o grau da relação linear entre duas variáveis quantitativas”. De modo resumido, esse coeficiente é uma medida de associação linear entre variáveis e é dado pela Equação (H1):

$$r = \frac{cov(X,Y)}{\sqrt{var(X).var(Y)}} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (H1)$$

Em que:

r : Coeficiente de correlação de Pearson;

x_i : Componentes da variável X , de 1 até n ;

$\bar{x}$: Valor médio dos componentes da variável X ;

y_i : Componentes da variável Y , de 1 até n ;

$\bar{y}$: Valor médio dos componentes da variável Y ;

Para entender esse coeficiente é necessário entender os conceitos de associação e linearidade. No quesito estatístico, duas variáveis podem estar associadas pelo compartilhamento da variância, ou seja, o coeficiente de correlação de Pearson é uma medida de variância compartilhada entre as variáveis. Já na questão de linearidade, supõe que o acréscimo ou decréscimo de uma unidade na variável X geraria o mesmo impacto na variável Y . Graficamente, o melhor modo de demonstrar a relação linear entre duas variáveis é por uma linha reta. Portanto, resumidamente, a correlação de Pearson exige um compartilhamento de variância e que ela seja distribuída linearmente (Figueiredo e Silva, 2009).

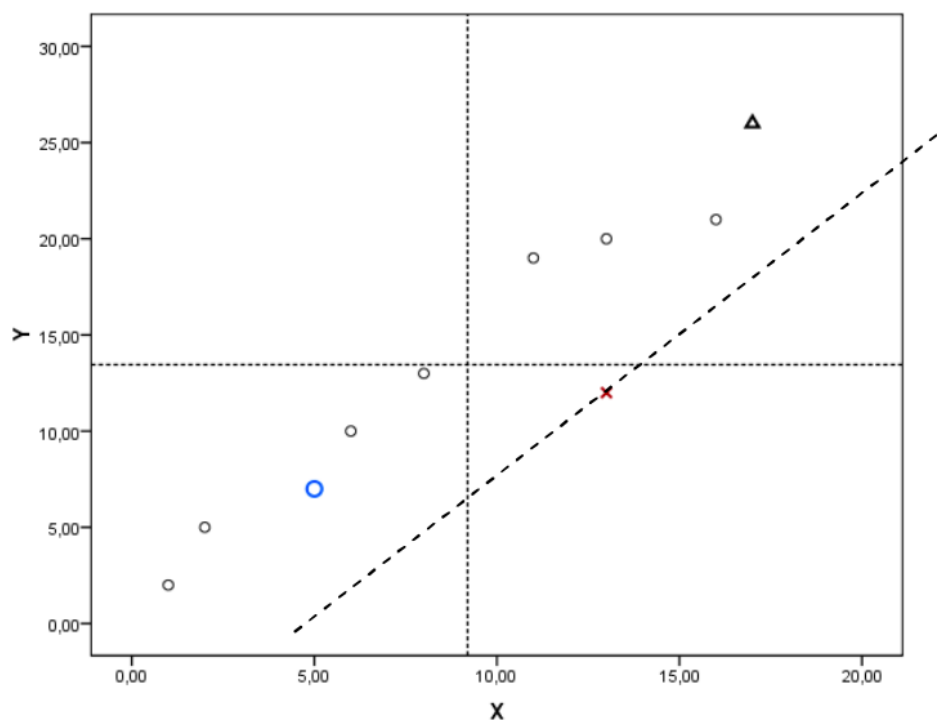


Figura AP2: Relação linear positiva entre duas variáveis (X e Y). As linhas pontilhadas paralelas aos eixos são os valores médios de X (9.20) e Y (13.5). Valores que estão acima da média de X devem estar acima da média de Y e valores abaixo da média de X devem estar abaixo da média de Y, representando assim uma relação linear positiva. A única ressalva é o ponto “x” em vermelho que pode ser excluído / ser considerado um dado inválido.

Fonte: Figueiredo e Silva, 2009.

Condições para aplicar o método

Para que possa ser feita a análise de correlação de Pearson (r), é necessário satisfazer algumas condições e propriedades. Baseado em Moore e McCabe (2004), e Figueiredo e Silva (2009), serão destacados esses itens.

1. O coeficiente “ r ” não diferencia entre variáveis independentes e variáveis dependentes, ou seja, a correlação entre X e Y será a mesma que entre Y e X;
2. O valor da correlação não muda caso a unidade das variáveis seja alterada, ou seja, caso a variável X seja litros e Y seja metros, modificar X para mililitros e Y para centímetros não irá alterar o valor da correlação;

3. O coeficiente é adimensional, ou seja, não existe uma unidade física que o defina;
4. Necessário que as variáveis analisadas sejam quantitativas (contínuas ou discretas). Não faz sentido e é impossível utilizar “r” para dados quantitativos, como sexo, cor, textura, etc;
5. Os dados devem estar normalmente distribuídos. No entanto, isso é essencial apenas para amostras pequenas (com menos de 40 elementos) pois, pelo Teorema do Limite Central, sabe-se que quanto maior o tamanho da amostra, mais ela tende a uma normal.
6. Necessário a análise de *outliers*, que são dados que se diferenciam demasiadamente dos outros, ou seja, pontos fora da curva. A não análise desses *outliers* pode comprometer as estimativas dos pesquisadores.
7. Necessário a independência das observações, ou seja, a observação de X não pode influenciar na observação de Y. O não cumprimento dessa condição pode fazer com que sejam assumidas correlações errôneas.

APÊNDICE I - CRONOGRAMA DE TRABALHO

Atividade/Mês	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov
1	x								
2.a		x	x						
2.b		x	x						
3.a				x	x				
3.b				x	x				
4.a						x			
4.b						x	x	x	
4.c						x	x	x	
5								x	x

Atividades:

1. Introdução
2. Revisão bibliográfica
 - a. Determinação dos preços de petróleo e energia renováveis
 - b. Dados de preço do petróleo e energias renováveis
3. Métodos
 - a. Correlação Cruzada
 - b. Causalidade de Granger
4. Desenvolvimento
 - a. Organização dos dados
 - b. Aplicação da Correlação Cruzada
 - c. Aplicação de Granger
5. Conclusão / Finalização do trabalho

Universidade de São Paulo

Engenharia de Petróleo – Escola Politécnica

Número: 9347521 USP

Data: 16/11/2020



RELAÇÃO ENTRE O PREÇO DO PETRÓLEO E DAS ENERGIAS RENOVÁVEIS

Sydney Hashimoto Oku

Orientador: Prof. Regina Meyer Branski

Artigo Sumário referente à disciplina PMI1096 – Trabalho de Formatura para Engenharia de Petróleo II
Este artigo foi preparado como requisito para completar o curso de Engenharia de Petróleo na Escola Politécnica da USP. Template versão 2018v11.

Resumo

O petróleo é a fonte de energia mais utilizada em todo o mundo. Apesar disso, sua utilização vem sendo questionada devido a poluição e aos impactos ambientais que sua exploração e produção causam. Grandes empresas do setor petróleo vêm acompanhando essas mudanças e expandindo suas atividades para atuar também no segmento de energias renováveis. O objetivo do trabalho foi identificar padrões e relações existentes entre o preço do petróleo e de quatro energias renováveis – eólica, hidrelétrica, solar e bioenergia – nos últimos vinte anos. O trabalho foi desenvolvido por meio testes estatísticos de Correlação Cruzada e Causalidade de Granger. O teste de Correlação Cruzada mostra a estrutura de dependência entre duas séries temporais. O teste de Causalidade de Granger identifica uma relação de precedência temporal entre as duas variáveis. O teste de Correlação Cruzada mostrou que as energias renováveis têm correlação do tipo médio a forte com o preço do petróleo. Já o teste de Causalidade de Granger indicou bicausalidade somente entre os preços da energia hidrelétrica e do petróleo. Essa bicausalidade pode ser explicada pelo fato da energia hidrelétrica ser a energia renovável mais utilizada no mundo mas, também, por ser uma forte substituta dos combustíveis fósseis para uso em veículos, concorrendo assim diretamente com o petróleo.

Abstract

Oil is the most widely used energy source worldwide. Despite this, its use has been questioned due to pollution and the environmental impacts that its exploration and production cause. Large companies in the oil sector have been following these changes and expanding their activities to also operate in the renewable energy segment. The objective of the work was to identify patterns and relationships that exist between the price of oil and four renewable energies - wind, hydroelectric, solar and bioenergy - in the last twenty years. The work was developed by means of statistical tests of Cross Correlation and Granger Causality. The Cross Correlation test shows the dependency structure between the series. The Granger Causality Test identifies a temporal precedence relation between the two variables. The results showed, for the Cross Correlation, that renewable energies obtained medium to strong correlations and, for Granger's Causality, only hydroelectric energy and oil obtained bicausality. Thus, it can be concluded that a possible reason for this bicausality is due to the fact that hydropower is the most used renewable energy in the world, competing directly with oil.

1. Introdução

Apesar da sua importância econômica, a utilização do petróleo vem sendo questionada devido a poluição e aos grandes impactos ambientais que sua exploração e produção causam. Em 2018, o Banco Mundial parou de financiar negócios de petróleo e gás para focar em projetos de energias renováveis (Romanzoti, 2017). Outro questionamento importante está relacionado ao tempo que o petróleo irá durar, já que muitas reservas estão se esgotando, sendo necessário ir para alto mar para explorar e produzir o óleo. Portanto, é comum a busca por possíveis alternativas para substituir o petróleo.

Uma alternativa ao petróleo é a utilização de fontes de energia renováveis. Essas energias limpas vêm de recursos naturais e são inesgotáveis, como: vento, chuva, sol, bioenergia, energia geotérmica, marés, entre outras. As energias renováveis causam menos poluição e menos conflitos dentro e fora dos países. Entretanto, muitas dessas energias dependem da localização geográfica além de fatores como clima e sazonalidade.

Muitas das grandes empresas do setor de petróleo, como Petrobras, ExxonMobil, BP e Equinor, estão mudando suas mentalidades e buscando um posicionamento no mercado de energias renováveis (PortalSolar, 2018) e até oferecendo cursos de pós-graduação nessa área (CanalEnergia, 2018). Assim, um pensamento que vem ganhando força nos últimos anos seria usar os recursos provenientes do petróleo para financiar a transição mundial para as energias renováveis.

A questão ainda é muito recente e é necessário aprofundar estudos nessa direção. O preço do petróleo é volátil pois depende de fatores geopolíticos assim como da oferta e demanda de óleo no mercado mundial. Assim, é importante compreender as relações existentes entre os preços do petróleo e das energias renováveis e, ainda, se as energias renováveis podem ser afetadas pelas frequentes oscilações do preço do petróleo.

O objetivo do trabalho é identificar padrões e relações existentes entre o preço do petróleo e das energias renováveis nos últimos vinte anos. O trabalho será desenvolvido por meio de testes estatísticos de Correlação Cruzada (Otto, 2017) e teste de Causalidade de Granger (Granger, 1969 e Caneiro, 1997) aplicadas aos preços do petróleo e ao preço das seguintes energias renováveis: eólica, hidrelétrica, solar e bioenergia. O teste de Correlação Cruzada mostra a estrutura de dependência entre as séries. O teste de Causalidade de Granger identifica uma relação de precedência temporal entre as duas variáveis. A compreensão dos padrões e relações existentes contribui para que os tomadores de decisão definam melhor suas estratégias e operem de modo mais eficiente.

2. Metodologia

O fluxograma apresentado na Figura 1 descreve passo a passo as etapas que foram desenvolvidas para identificar padrões e relações entre o preço do petróleo e das energias renováveis.

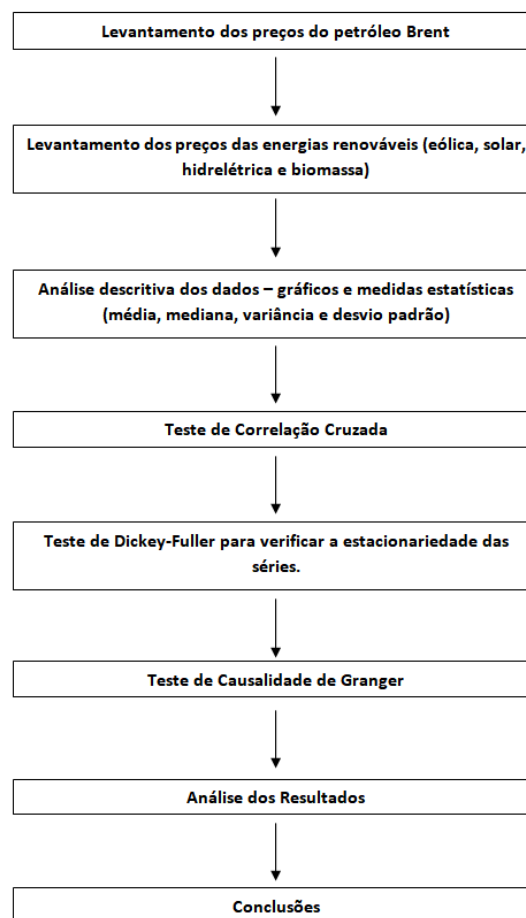


Figura 1 - Fluxograma da metodologia do trabalho (o autor, 2020).

Inicialmente, foi feito um levantamento dos preços anuais do petróleo tipo Brent. Os preços médios anuais foram extraídos da base de dados da Macrotrends (2020) e cobriu o período de janeiro de 2000 até julho de 2020. Nesse período é possível observar os efeitos de diversos eventos sobre o preço do petróleo: crise de 2001 decorrente do atentado ao World Trade Center (IAGS, 2004; Morgan, 2009), de 2008 iniciada pelo setor imobiliário dos EUA (Amadeo, 2019; Reuters, 2009), de 2010 provocada pela crise da dívida pública da Zona Euro (Copelovitch, 2016) e, finalmente, de 2020 com os efeitos do COVID-19 (Gandra, 2020). Os preços do Brent e do WTI são próximos (TradingEconomics, 2020a e TradingEconomics, 2020b) e, portanto, a escolha de apenas um dele não afeta os resultados da pesquisa.

Os preços das energias renováveis foram extraídos do banco de dados da International Renewable Energy Agency (IRENA, 2018). O período temporal

considerado foi diferente para cada tipo de energia, já que as desenvolvidas mais recentemente não têm dados disponíveis para todo o período estudado. Assim, quando os dados das energias renováveis não cobriam o período temporal do Brent (2000 a 2020), os dados do Brent foram ajustados para se adequar ao período disponível da energia renovável. Esses tipos de energias foram escolhidos, pois possuem uma grande importância na matriz energética brasileira, sendo que 60% é hidrelétrica, 8,5% é eólica, 8,3% é bioenergia, 1,5% é solar (ABSOLAR, 2020).

Após o levantamento dos dados foram realizadas as seguintes etapas:

- a) Análise descritiva dos dados por meio da representação gráfica e de medidas como média, mediana, variância e desvio padrão.
- b) Teste de Correlação Cruzada. Foi utilizado pacote de Excel: Miscellaneous Time Series Topics – Cross Correlations (Zaiontz, [S.I.]) para facilitar o processamento de dados. O pacote desenvolvido por Zaiontz utiliza as equações do teste de Causalidade de Granger de um modo automatizado e com uma interface amigável, facilitando a obtenção do resultado.
- c) Teste de Dickey-Fuller (Dickey et al., 1976) para verificar se as séries são estacionárias. Caso não fossem, foi utilizada a taxa de crescimento / primeira derivada.
- d) Teste de Correlação de Granger. Foi utilizado um pacote de Excel: Miscellaneous Time Series Topics - Granger Causality (Zaiontz, [S.I.]) para facilitar o processamento de dados. O pacote desenvolvido por Zaiontz utiliza uma hipótese nula (H_0) que afirma que os coeficientes das equações do teste de Causalidade de Granger são iguais a zero (nulos), ou seja, a série X causa Y caso H_0 seja rejeitado. Além disso, é utilizado o teste F para determinar se há diferença de significância entre o modelo de regressão completo (equações de Granger) e o modelo reduzido (em que os coeficientes das equações de Granger são nulos). Se o valor-p desse teste for menor do que o valor de “ α ”, então rejeita-se a hipótese nula e conclui-se que X causa Y. Assim, de modo geral, se o valor-p desse teste for menor do que o valor de “ α ”, então rejeita-se a hipótese nula e conclui-se que existe causalidade.

Os testes realizados por esse pacote também devem obedecer a todas as condições que foram citadas anteriormente, que são:

- 1) As variáveis X e Y devem ser estacionárias.
- 2) O número de defasagens a ser utilizado nos testes é uma questão importante a ser verificada.
- 3) Os resíduos / erros que estão nas equações do teste não podem estar correlacionados.

- 4) Como o objetivo é testar a causalidade, não é necessário apresentar os coeficientes das equações. Apenas o resultado do teste F é suficiente.

3. Resultados

3.1. Preços do petróleo e das energias renováveis

As figuras 2 e 3 mostram graficamente os preços das energias renováveis estudadas ao longo do tempo. Pode-se perceber que todas elas possuem tendência de queda, já que a tecnologia para produção desses tipos de energias está ficando mais barata ao longo do tempo.

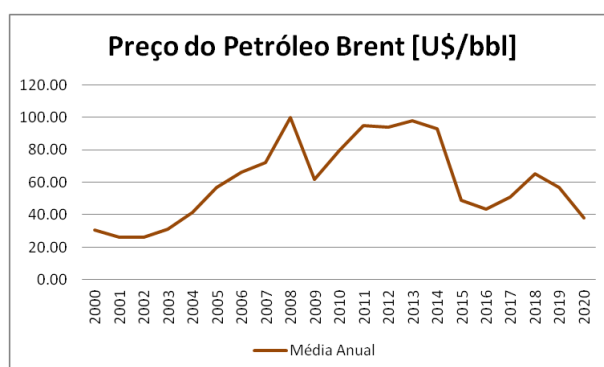


Figura 2 - Série temporal do preço do Brent (o autor, 2020).

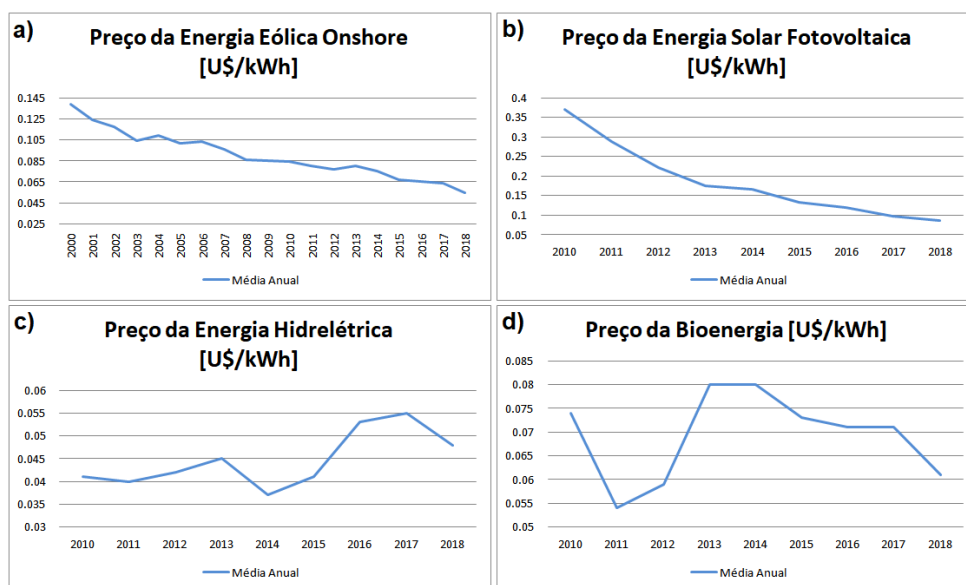


Figura 3 - Séries temporais do preço das energias renováveis, sendo: a) Energia Eólica Onshore; b) Energia Solar Fotovoltaica; c) Energia Hidrelétrica e d) Bioenergia (o autor, 2020).

3.2. Teste de Correlação Cruzada

Utilizando o pacote Excel para o teste de Correlação Cruzada foram obtidos os resultados que podem ser vistos na Tabela 1.

Tabela 1 - Coeficientes de Correlação Cruzada entre o preço do petróleo e o preço das energias renováveis (o autor, 2020).

Correlação Cruzada: Brent – Energias Renováveis				
Defasagem	r Eólica	r Solar	r Hidr.	r Bioen.
0	-0.52	0.56	-0.67	-0.09
1	-0.53	0.59	-0.89	0.22
2	-0.60	0.57	-0.54	0.58
3	-0.75	0.40	-0.06	0.64
4	-0.92	-0.78	0.77	-0.61
5	-0.88	-0.83	0.77	-0.66
6	-0.82	-0.92	-0.19	-0.46
7	-0.86	-	-	-
8	-0.84	-	-	-
9	-0.79	-	-	-
10	-0.97	-	-	-
11	-0.95	-	-	-
12	-0.90	-	-	-
Média Absoluta	0.80	0.66	0.55	0.46
Correlação	Forte	Média/Forte	Média	Média/Fraca

Dos quatro tipos de energia renovável, é possível perceber que a correlação da energia eólica com o Brent foi a mais forte, considerando que, para defasagens maiores, o valor do coeficiente foi entre 0,80 a 0,90, ou seja, uma correlação forte¹⁵. Para as energias solar e hidrelétrica, apesar de em certas defasagens a correlação chegar a ser forte, no geral apresentam uma correlação com valores entre 0,60 e 0,80, ou seja, uma correlação de nível médio. Já a bioenergia, apresenta os coeficientes mais baixos e que mais variam, ficando com uma média absoluta de 0,46, ou seja, uma correlação média / fraca.

3.3. Teste de Causalidade de Granger

Antes de iniciar o teste de Causalidade de Granger, é necessário realizar o teste de Dickey-Fuller para verificar a estacionariedade das séries. Para a primeira derivada das séries, todas deram estacionárias, segundo esse teste, como pode ser visto na Tabela 2.

Tabela 2 - Teste de Dickey-Fuller para as energias renováveis e o petróleo Brent (o autor, 2020).

Teste Dickey-Fuller				
	Valor-p	Defasagem	Tipo	Estacionário?
Brent	< 0,01	0	0	Sim
Eólica	< 0,01	0	0	Sim
Solar	0,02	0	0	Sim
Hidrelétrica	0,04	0	0	Sim
Bioenergia	< 0,01	0	0	Sim

Para o teste de Causalidade de Granger, foi utilizado o pacote Excel criado por Zaiontz. Para esse teste, será considerado o valor de α igual à 0,05, já que esse é o valor mais utilizado na literatura. A Tabela 3 mostra os resultados do valor-p obtido para cada relação do Brent com um tipo de energia renovável. O teste foi feito considerando que o preço do Brent pode causar o preço da energia renovável, e também, que o preço da energia renovável pode causar o preço do Brent.

¹⁵ Para mais informações, ver Cohen (1988) e Dancey et al. (2005).

Tabela 3 - Valores-p do teste de Causalidade de Granger para Brent, energia eólica, energia solar, energia hidrelétrica e bioenergia (o autor, 2020).

Defasagens	Valor-p							
	Brent → Eólica	Eólica → Brent	Brent → Solar	Solar → Brent	Brent → Hidr.	Hidr. → Brent	Brent → Bioen.	Bioen. → Brent
1	0,79	0,36	0,60	0,62	0,08	0,06	0,83	0,93
2	0,93	0,64	0,94	0,14	0,72	0,05	0,84	0,55
3	0,93	0,26	-	-	-	-	-	-
4	0,88	0,59	-	-	-	-	-	-
5	0,97	0,67	-	-	-	-	-	-

Como pode ser visto na Tabela 3, foi possível obter o valor-p para o Brent e a energia eólica com um número de defasagem de até 5. Já nos outros casos, isso não foi possível, pois a quantidade de dados analisada é menor (energia solar, hidrelétrica e bioenergia possuem dados de 2010 a 2018, enquanto o Brent e a energia eólica possuem dados de 2000 a 2018). Sendo rigoroso e analisando somente esses valores-p, não é possível afirmar que as energias renováveis possuem alguma causalidade com o preço do petróleo, já que todos esses valores são maiores do que o nível de significância α . No entanto, é possível perceber que, para a causalidade entre Brent e energia hidrelétrica, os valores-p ficaram próximos de α , indicando uma possível causalidade.

Um fato que pode explicar por que a energia hidrelétrica influencia o petróleo mais do que os outros tipos de energia renovável é que ela é a energia renovável mais gerada no mundo (IRENA, 2020). Sendo assim, é justificável que o preço do petróleo e o preço da energia renovável mais produzida no mundo tenham taxas de variação parecidas. Um outro fato interessante seria que, para o número de defasagens 1, considerando um α igual à 0,09, pode-se dizer que o Brent e a energia hidrelétrica possuem bicausalidade, ou seja, qualquer flutuação de preço em um, irá afetar o outro, reciprocamente.

4. Conclusão

As energias renováveis vêm ganhando destaque nos últimos anos devido ao fato de serem menos poluentes e inesgotáveis, diferentemente do petróleo que a cada ano fica mais escasso e difícil de ser explorado. Com isso, este trabalho teve como objetivo identificar padrões e relações existentes entre o preço do petróleo e as energias renováveis nos últimos

vinte anos. Para isso, foram utilizados os testes de Correlação Cruzada e o de Causalidade de Granger.

A correlação e a causalidade identificada entre o preço do petróleo e o preço da energia hidrelétrica pode ser explicada pelo fato da energia hidrelétrica ser a energia renovável mais utilizada no mundo, mas, também, pelo fato da energia elétrica ser uma forte substituta dos combustíveis fósseis em veículos automotores, concorrendo assim diretamente com o petróleo.

A compreensão dos padrões e relações existentes entre os preços das energias alternativas e do petróleo contribui para que os tomadores de decisão definam melhor suas estratégias e operem de modo mais eficiente. É importante ressaltar a dificuldade para obter dados do preço das energias renováveis na literatura. O trabalho levantou e consolidou os dados com referências num único lugar.

5. Referências

- AMADEO, K. **2009 Financial Crisis Explanation with Timeline**. 2019. Disponível em: <<https://www.thebalance.com/2009-financial-crisis-bailouts-3305539>> Acesso em 02 abr. 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA (ABSOLAR). **Infográfico Absolar**. 2020. Disponível em: <<http://www.absolar.org.br/infografico-absolar-.html>> Acesso em 28 abr. 2020.
- CANALENERGIA. **Equinor financia pós-graduação em energia renovável, petróleo e gás natural**. 2018. Disponível em: <<https://www.canalenergia.com.br/noticias/53082234/equinor-financia-pos-graduacao-em-energia-renovavel-petroleo-e-gas-natural>> Acesso em 12 mar. 2020.
- 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 jun. 2020.
- COHEN, J. **Statistical power analysis for the behavioral sciences**. Routledge, 2nd edition. ISBN 978-0805802832, 1988.
- COPELOVITCH, M.; FRIEDEN J.; WALTER, S. **The Political Economy of the Euro Crisis**. Comparative Political Studies 49, no. 7, pp. 811–40. doi:10.1177/0010414016633227, 2016.
- DANCEY, C.; REIDY, J. **Estatística Sem Matemática para Psicologia: Usando SPSS para Windows**, Artmed, 3^a edição. ISBN 9788536306889, 2006.
- DICKEY, D. A.; FULLER, W. A. **Distribution of the Estimators for Autoregressive Time Series With a Unit Root**. Journal of the American Statistical Association 74, no. 366, pp. 427-431, 1976. doi: 10.2307/2286348.
- GANDRA, A. **Coronavírus afeta variação nos preços de barril de petróleo no mundo**. 2020. Disponível em: <<https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2020-03/coronavirus-afeta-variacao-nos-precos-do-barril-de-petroleo-no-mundo>> Acesso em 26 mar. 2020.
- GRANGER, C. W. J. **Investigating Causal Relations by Econometric Models and Cross-spectral Methods**. Econometrica. 37 (3), pp. 424–438. doi:10.2307/1912791, 1969.
- IAGS – Institute for the Analysis of Global Security. **How much did the September 11 terrorist attack cost America?** 2004. Disponível em: <<http://www.iags.org/costof911.html>> Acesso em 02 abr. 2020.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Renewables 2018 – Fuel Report**. 2018. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/renewables-2018>> Acesso em 28 abr. 2020.
- INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). **Statistics Time Series – Trends in Renewable Energy**. 2020. Disponível em: <<https://www.irena.org/Statistics/View-Data-by-Topic/Capacity-and-Generation/Statistics-Time-Series>> Acesso em 14 ago. 2020.
- MACROTRENDS. **Crude Oil Prices - 70 Year Historical Chart**. 2020. Disponível em: <<https://www.macrotrends.net/1369/crude-oil-price-history-chart>> Acesso em 03 ago. 2020.
- MORGAN, M. J. **The Impact of 9/11 on Politics and War: The Day that Changed Everything?** Palgrave Macmillan. ISBN 978-0-230-60763-7, 2009.
- OTTO, M. **Chemometrics - Statistics and Computer Application in Analytical Chemistry (3rd Edition)**. John Wiley & Sons. ISBN 978-3-527-34097-2, 2017.

PORTALSOLAR. **Petrobrás começa a investir em Energia Solar**. 2018. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/blog-solar/energia-solar/petrobras-comeca-a-investir-em-energia-solar.html>> Acesso em 12 mar. 2020.

REUTERS. **Three Top Economists Agree 2009 Worst Financial Crisis Since Great Depression; Risks Increase if Right Steps are Not Taken**. 2009. Disponível em: <<https://web.archive.org/web/20100212214538/https://www.reuters.com/article/pressRelease/idUS193520%2B27-Feb-2009%2BBW20090227>> Acesso em 02 abr. 2020.

ROMANZOTI, N. **O Banco Mundial vai parar de financiar negócios de petróleo a partir de 2019**. 2017. Disponível em: <<https://hypescience.com/o-banco-mundial-vai-parar-de-financiar-negocios-de-combustiveis-fosseis-partir-de-2019/>> Acesso em 12 mar. 2020.

TRADINGECONOMICS. **Brent Crude oil** 2020a. Disponível em: <<https://tradingeconomics.com/commodity/crude-oil>> Acesso em 08 abr. 2020.

TRADINGECONOMICS. **Crude oil** 2020b. Disponível em: <<https://tradingeconomics.com/commodity/crude-oil>> Acesso em 08 abr. 2020.

ZAIONTZ, C. **Real Statistics**. [S.I.]. Disponível em: <<https://www.real-statistics.com>> Acesso em 09 jun. 2020.