Competitividade de curto, médio e longo prazo das fontes eólica e solar na matriz energética brasileira

Marcelo Casagrande
Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)
Av. Pasteur, 250 – Urca - Rio de Janeiro, RJ - Brasil - 21941-901
marcelofcasagrande@gmail.com

Erick Meira
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio)
Rua Marquês de São Vicente, 225, Gávea - Rio de Janeiro, RJ - Brasil - 22451-900
erickmeira89@gmail.com

Nivalde José de Castro
Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)
Av. Pasteur, 250 – Urca - Rio de Janeiro, RJ - Brasil - 21941-901
nivalde.castro@gmail.com

RESUMO

O presente artigo faz uma análise de competitividade econômica de energias renováveis alternativas no Brasil, notadamente eólica e solar fotovoltaica. A métrica do LCOE (*Levelized Cost of Energy*) é utilizada como critério de comparação entre essas fontes e outras fontes geradoras de eletricidade presentes na matriz elétrica brasileira. Diferentes horizontes temporais (curto, médio e longo prazo) são considerados. Busca-se entender a situação atual de competitividade e atratividade de investimentos das fontes eólica e solar, bem como como estas fontes devem evoluir ao longo do tempo. Foram encontrados, tanto no médio quanto no longo prazo, valores que corroboram a hipótese de ganho de competitividade nos custos para as fontes eólica e solar com o avanço tecnológico e economias de escala no setor.

PALAVRAS CHAVE. Energias Renováveis. LCOE. Planejamento Energético.

Tópicos. EN&PG – PO na Área de Energia, Petróleo e Gás; EST&MP – Estatística e Modelos Probabilísticos.

ABSTRACT

This article assesses the economic competitiveness of alternative renewable energies in Brazil, notably wind and solar photovoltaic power. The LCOE (Levelized Cost of Energy) metric is used as a benchmark metric to compare these and other electricity generating sources present in the Brazilian energy matrix. Multiple time horizons (short, mid and long run) are considered. In doing so, the study aims to understand the current situation of competitiveness and investment attractiveness of wind and solar energies, and to identify possible avenues for the development of these sources in the coming years. The findings in both the medium and long term corroborate the hypothesis of cost competitiveness gains for wind and solar power due to technological advances and economies of scale in the sector.

KEYWORDS. Renewable Energies. LCOE. Energy Planning.

Paper topics. Operational Research applied to the Energy, Oil and Gas Industry (EN&PG); Statistics and Probabilistic Models (EST&MP).

1. Introdução

A partir das revoluções industriais e dos ganhos tecnológicos associados a elas, a humanidade passou a usar, predominantemente, os combustíveis fósseis para gerar energia. Como principais argumentos para sua disseminação à época, elencavam-se vantagens perante as fontes renováveis, como maiores eficiências e estocabilidade. Porém, os combustíveis fósseis são também emissores de gases de efeito estufa (GEEs) quando geram energia, tornando-os aceleradores do aquecimento global, que é comprovadamente maléfico à sociedade. Eventos climáticos extremos e aumento dos níveis dos oceanos e da temperatura atmosférica são alguns dos malefícios que a humanidade precisa enfrentar por conta do aquecimento do planeta [IPCC 2018].

Diante desse contexto, torna-se imperativa a busca pela transição energética, que compreende a passagem de uma economia dependente do carbono para uma economia cada vez mais descarbonizada, ou sustentável. Vários consensos já foram estabelecidos no âmbito internacional, à exemplo das diretrizes traçadas para se guiar políticas de preservação do meio ambiente [Oliveira, 2015]. No âmbito do Acordo de Paris de 2015, por exemplo, para se atingir a meta de controle sobre o aumento da temperatura global em 1,5ºC ou, no máximo, 2ºC, uma das ações mais importantes é a redução das emissões de GEEs. Nesse contexto, mecanismos de incentivo a matrizes energéticas mais limpas devem ser prioridade dos formuladores de políticas. O Brasil, como signatário, deve ancorar as suas políticas em diretrizes e metas que apoiam o acordo, sendo um dos caminhos o investimento em energias renováveis.

As energias renováveis são aquelas cujas fontes não se esgotam. Como exemplos, destacam-se as energias eólica, solar, biomassa, geotérmica e hidráulica. Esta última já é explorada em larga escala há mais tempo e, no Brasil, a primeira UHE (Usina Hidrelétrica) foi construída em 1889 [Canal Energia 2020]. Para entender a importância dos recursos hídricos para a matriz elétrica brasileira, cabe observar a parcela das hidrelétricas na matriz em 2019: 60,5%, logo à frente da eólica (9%) [EPE 2020a], como pode ser visto na Figura 1. Sendo uma forma de geração plenamente estabelecida, cujo investimento já é feito no Brasil desde o século XIX e que há décadas lidera na capacidade instalada da matriz elétrica, neste artigo as hidrelétricas não estão sendo consideradas como uma fonte renovável alternativa e com potencial de forte redução de custos no longo prazo, o que é aplicado às usinas eólicas e solares. Hoje, a solar representa 1,5% da capacidade instalada total [EPE 2020a].

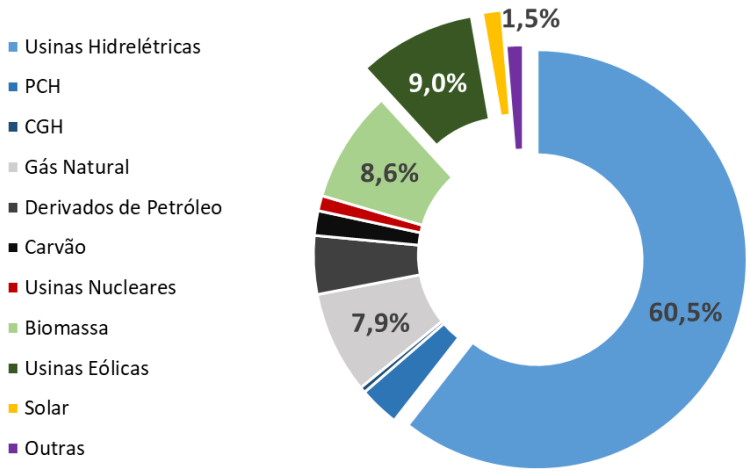


Figura 1. Capacidade Instalada na Matriz Elétrica no Brasil (2019).
Fonte: EPE, 2020a.

É notável a competitividade da matriz elétrica brasileira em relação à baixa emissão de GEEs, quando comparada a matrizes de outras economias no mundo. Se por aqui a fatia dos combustíveis fósseis na geração de eletricidade é de 14,3% [EPE, 2020a], a média mundial está

em 64,2% [IEA 2018]. Porém, esse fato não diminui a necessidade de se incentivar ainda mais a exploração de recursos limpos. Eles podem ser complementares aos recursos hídricos na garantia de segurança energética, sem que se necessite de mais termelétricas poluentes para cumprir esta função. Ressalta-se, em particular, a energia eólica, que no Brasil apresenta o maior fator de capacidade (FC)[1] do mundo e complementa sazonalmente a produção das hidrelétricas [Castro et al. 2018], e a energia solar fotovoltaica, que também tem muito potencial neste país dada a grande incidência de radiação direta e a possibilidade de geração de forma descentralizada, como nos projetos de micro e de minigeração [Castro et al. 2016].

Sendo assim, busca-se entender a competitividade das fontes eólica e solar fotovoltaica no país, como forma de predizer a capacidade de avanço e ganho de protagonismo na expansão da matriz elétrica. Por se configurar em um dos fatores mais relevantes na decisão de investimento, o presente trabalho deu particular atenção à competitividade no custo, comparando-se os custos associados a essas fontes renováveis alternativas com os das outras fontes energéticas. Para tal, usou-se a métrica do LCOE (*Levelized Cost of Energy*), que pode ser aplicada a qualquer forma de geração de energia a fim de tornar os seus custos comparáveis entre si. Espera-se encontrar valores que convirjam com a hipótese de avanço tecnológico e ganhos de economia de escala para estas fontes renováveis no longo prazo.

O artigo se divide em cinco seções, incluindo esta primeira introdutória. Na segunda seção, a metodologia para obtenção de dados e realização dos cálculos feitos a partir deles é detalhada. Na Seção 3, os resultados para o estudo de curto prazo da viabilidade econômica das fontes presentes na geração de eletricidade no Brasil são apresentados. Analogamente, na quarta seção são apresentados os resultados para o estudo de viabilidade econômica do médio e do longo prazo para as fontes renováveis alternativas analisadas, eólica e solar fotovoltaica. Por fim, a Seção 5 traz as conclusões e sugere aspectos a serem considerados em estudos futuros.

2. Metodologia

Tendo como objetivo investigar o potencial de avanço das fontes de geração eólica e solar, tanto para o curto, como para o médio e longo prazo, foram analisados dados estimados pela EPE (Empresa de Pesquisa Energética). A comparação de competitividade das diversas fontes leva em consideração dados de seus custos de capital (CAPEX, do inglês *Capital Expenditure*), seus custos operacionais (OPEX, do inglês *Operational Expenditure*) e o conceito de LCOE (*Levelized Cost of Energy*), ou custo nivelado de energia. Simplificadamente, CAPEX pode ser entendido como o investimento inicial e a compra de bens de capital, OPEX como despesas contínuas de manutenção e LCOE como a soma dos dois parâmetros (ou o custo total de uma usina) dividida pela totalidade de geração de energia ao longo da vida útil de uma usina.

Trata-se de uma métrica amplamente aceita e difundida na literatura –ver, por exemplo, Guimarães [2019], IRENA [2019], IEA [2020] e EIA [2021]. Segundo a IRENA, o LCOE é definido como o investimento necessário para se receber uma taxa de retorno igual à taxa de desconto aplicada a toda a vida útil da usina, sem levar em conta os gastos com impostos e a inflação [IRENA 2016]. Assim, o LCOE pode ser calculado de acordo com a seguinte equação, retirada de Dos Reis et al. [2021]:

$$LCOE = \frac{CAPEX + \sum_{t=1}^{T} \frac{OPEX_t}{(1+WACC)^t}}{\sum_{t=1}^{T} \frac{AEP_t}{(1+WACC)^t}} \quad (1)$$

onde CAPEX representa o custo de capital e OPEX representa o custo operacional. Ainda, AEP representa a produção anual de energia de uma usina (*Annual Energy Production*) e WACC é a

[1] Fator de capacidade representa a proporção entre o que de fato foi produzido por uma usina de geração elétrica e a sua capacidade total de produção.

taxa de desconto (*Weighted Average Cost of Capital*). Ao final do cálculo, chega-se à conclusão de quantas unidades monetárias são necessárias para produzir 1 MWh de eletricidade.

A coleta dos dados de CAPEX e OPEX para diferentes fontes no Brasil foi feita a partir de dois estudos da EPE: Plano Decenal de Energia 2030 [EPE 2021] e Plano Nacional de Energia 2050 [EPE 2020b]. O objetivo destes estudos é fornecer dados à formulação de políticas energéticas e apresentar predições sobre a expansão futura do setor energético brasileiro. Além disso, foi necessário calcular a AEP para as diversas fontes que serviram como comparação na análise de competitividade econômica. Neste caso, utilizou-se dados constantes no Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2020 [EPE 2020a], também elaborado pelo EPE, de acordo com o observado no ano de referência do estudo, nesse caso para 2019. A Tabela 1 sumariza os dados coletados.

Tipo de Fonte	**AEP (MWh) [1]**	**Cap Inst (MW) [1]**	**FC [2]**
Nuclear	16.128.820	1.990	90%
Carvão	15.327.230	3.228	69%
Gás Natural	60.188.290	13.385	65%
Hidrelétrica	375.770.910	102.999	55%
Eólica	55.985.620	15.378	47%
Biomassa	52.111.160	14.703	33%
Solar	6.650.540	2.473	30%

Tabela 1. AEP, Capacidade Instalada e Fator de Capacidade para diversas fontes no Brasil.
Fontes: [1] Adaptado de EPE [2020a]. [2] EPE [2020b].

No que tange à taxa de desconto, dois cenários distintos foram considerados. No primeiro cenário (identificado na Tabela 1 como “DI Futuro”), buscando-se atingir com mais proximidade a realidade da economia brasileira, foi feito o levantamento das projeções das taxas de juros futuras no Brasil, estimadas pelas taxas cotadas para os contratos de DI (Depósito Interbancário) Futuro negociados na bolsa brasileira. No segundo cenário (identificado como “WACC”), adotou-se a taxa de desconto mais comumente aceita na literatura internacional como medida simplificadora, de 10% a.a. [Dos Reis et al. 2021].

t	**Código**	**Vencimento**	**Taxa de juros (% a.a.)**
1	DI1F22	01/01/2022	4,9750
2	DI1F23	01/01/2023	6,6100
3	DI1F24	01/01/2024	7,5200
4	DI1F25	01/01/2025	8,0100
5	DI1F26	01/01/2026	8,3300
6	DI1F27	01/01/2027	8,6300
7	DI1F28	01/01/2028	8,8100
8	DI1F29	01/01/2029	9,0000
9	DI1F30	01/01/2030	9,2200
10	DI1F31	01/01/2031	9,2400
11	interpolação linear simples		9,2750

12	DI1F33	01/01/2033	9,3100

Tabela 2. Juros DI Futuro Selecionados.
Fonte: Infomoney, 2021 (consulta feita em 27/05/2021).

Como se pode notar, nem todos os anos possuem negociações de contratos DI Futuro com vencimento para o dia 1º de janeiro. Desta forma, para não comprometer o cálculo do LCOE, realizou-se uma interpolação linear simples no ano de 2032, ou seja, uma média aritmética entre a taxa do ano anterior e a do ano seguinte. Da mesma forma, para depois de 2033, foi adotada a taxa constante de 9,3100% a.a., observada no último ano com dados disponíveis. Isso foi necessário porque a vida útil das usinas elétricas analisadas é de pelo menos 20 anos, período que extrapola o limite das estimativas para contratos DI futuro.

Com base nos dados supracitados, realizou-se o cômputo de CAPEX, OPEX e LCOE das diversas fontes consideradas. Quando os custos das fontes eólica e solar são comparados aos de outras fontes, renováveis ou não, teoricamente devem ser atraentes para que haja investimento. Por outro lado, é preciso levar em conta também outras vantagens e desvantagens que o investimento nestes setores pode proporcionar, em relação à expansão, segurança e produtividade da geração de energia elétrica no Brasil, bem como a fatores sustentáveis, como impactos aos ecossistemas, ao clima e a comunidades e economias locais.

Assim, ressalvas podem ser feitas com relação ao uso do LCOE como medida de viabilidade econômica. Em primeiro lugar, várias métricas diferentes para este cálculo estão disponíveis na literatura, com instituições e autores diferentes adotando variáveis distintas, o que torna a comparação entre diferentes fontes de dados um pouco limitada. As variações cambiais também podem dificultar a comparação entre LCOEs de períodos distintos, pois afetam diretamente os custos associados ao cálculo [Johnston et al. 2020]. Outra crítica vem do fato do LCOE desconsiderar quaisquer externalidades ambientais e sociais, como resíduos e poluição, advindas da geração de energia, o que pode impactar diretamente na decisão de se priorizar fontes renováveis e limpas [Guimarães 2019].

3. Cálculo de LCOE no Curto Prazo

A Tabela 3 resume o CAPEX por kW instalado, o OPEX gasto por kW em cada ano e a vida útil esperada de cada tipo de usina selecionada neste trabalho. Todos os dados foram retirados do PDE 2030 e do PNE 2050, elaborados pela EPE, como já mencionado. Cabe ressaltar, contudo, que os cálculos dos custos expressos no PDE 2030 consideraram o dólar ao preço de R$ 4,90. Como esta relação não reflete mais o câmbio observado atualmente no mercado, fez-se uma adaptação usando a mediana das projeções do mercado expressas no Boletim Focus, semanalmente publicado pelo Banco Central do Brasil[2]. A edição de 24 de maio de 2021 foi usada como referência, chegando-se à expectativa de um câmbio precificado em R$5,30/US$ ao final de 2021. Isso explica a diferença entre os dados de CAPEX e OPEX apresentados na tabela abaixo e no PDE 2030. Adicionalmente, o Boletim Focus traz previsões para as taxas de câmbio no fechamento dos anos de 2022, 2023, 2024 e 2025 que foram usadas para calcular os OPEX referentes a estes anos (R$5,30; R$5,30; R$5,08; e R$5,05, respectivamente). Por falta de dados para os anos seguintes, o último câmbio foi estendido e usado como aproximação. Essa variação cambial foi imposta ao OPEX porque este é o componente variável do custo, aplicável em cada ano de vida útil do empreendimento. Enquanto isso, o CAPEX é um componente fixo, aplicável somente no ano inicial.

Por fim, a última coluna da Tabela 3 apresenta o total de investimento por kW necessário para todo o ciclo do projeto, em um cálculo simplificado de soma entre o CAPEX e o produto de OPEX com a vida útil, como forma de comparação preliminar. Os resultados descritos apontam que a fonte nuclear é hoje a mais cara de todas com relação ao dispêndio de capital necessário para

[2] https://www.bcb.gov.br/publicacoes/focus

construir e operar as usinas e que a fonte mais barata nesta comparação preliminar é a solar fotovoltaica.

Tipo de Fonte	CAPEX/kW [1]	OPEX/kW/ano [2]	Vida Útil (anos) [2]	Total
Nuclear	R$ 26.500,00	R$ 530,00	30	R$ 42.400,00
Carvão	R$ 10.600,00	R$ 173,06	25	R$ 14.926,53
Hidrelétrica	R$ 9.663,88	R$ 43,27	30	R$ 10.961,84
Gás Natural (CC)	R$ 4.434,69	R$ 173,06	20	R$ 7.895,92
Eólica	R$ 4.867,35	R$ 97,35	20	R$ 6.814,29
Biomassa (Cana)	R$ 4.326,53	R$ 97,35	20	R$ 6.273,47
Solar Fotovoltaica	R$ 4.326,53	R$ 54,08	20	R$ 5.408,16

Tabela 3. CAPEX e OPEX para diversas fontes no Brasil (2021).
Fontes: [1] PDE 2030 [EPE 2021]. Adaptado para câmbio R$ 5,30/US$. [2] PNE 2050 [EPE 2020b]. Notas: CC significa Ciclo Combinado.

Como mostra a tabela, a fonte hidrelétrica, predominante na matriz brasileira, também apresenta alto custo de capital, porém um custo de operação bem menor do que as outras fontes. Neste sentido, há dois pontos a se destacar: primeiro, que a inclusão de novas UHEs no sistema nacional se torna improvável devido ao grande investimento inicial demandado, o que é agravado pela resistência de ambientalistas com relação à interferência nas bacias hidrográficas e pelas recorrentes crises hídricas sofridas pelo país nas últimas décadas. O segundo ponto, decorrente deste fato, é a necessidade de diversificação da matriz elétrica brasileira com o avanço da eólica, sazonalmente complementar à hidrelétrica, e a solar, a alternativa mais barata no custo variável, repassado ao consumidor. Inclusive, estas últimas apresentam OPEX consideravelmente menores do que as usinas que hoje são com mais frequência usadas no sistema para compensar a falta de energia gerada nas UHEs, ou seja, as termelétricas a gás natural e carvão. Se contarmos também com o argumento da limpeza da matriz, a afirmativa fica ainda mais sustentada.

A Tabela 3, porém, não leva em conta a produção anual de energia para realizar uma comparação mais fiel, o que é considerado no LCOE. Sendo o FC da fonte solar fotovoltaica muito baixo (30%), ao considerarmos a comparação por LCOE, ela perderá posições na competividade econômica, por ser menos eficiente na produção de eletricidade, como pode ser observado na Tabela 4. O combustível fóssil Gás Natural (na geração em ciclo combinado) é a fonte energética mais competitiva pela ótica do LCOE, o que é uma vantagem para atrair investimentos neste combustível, que é considerado como o menos poluente entre os fósseis e que pode ter papel importante na transição energética brasileira. Isso porque se trata de uma usina de base[3] e não intermitente como a eólica e a solar, mas que ainda assim contribui para o aquecimento global. Portanto, apesar de barata, sua priorização deve ser relativizada, levando em conta as vantagens ambientais de se investir nas fontes renováveis alternativas.

É fácil notar que as fontes destacadas neste artigo não são as mais competitivas do mercado brasileiro, ao menos no curto prazo. Porém, com tecnologias ainda a serem aprimoradas para gerar eletricidade de forma mais produtiva e reduções potenciais de CAPEX e OPEX, esse cenário pode mudar.

[3] Usina capaz de produzir energia a uma taxa constante, geralmente a um custo menor em relação a outras disponíveis para o sistema.

Tipos de Fonte	R$/MWh		US$/MWh	
	DI Futuro	WACC	DI Futuro	WACC
Nuclear	382,10	409,64	72,09	77,29
Hidrelétrica	270,08	292,43	50,96	55,18
Carvão	262,25	280,93	49,48	53,01
Solar FV	194,76	208,34	36,75	39,31
Eólica	171,45	182,74	32,35	34,48
Biomassa (cana)	159,48	169,78	30,09	32,03
Gás Natural (CC)	144,51	152,83	27,27	28,84

Tabela 4. LCOE de curto prazo para diferentes fontes no Brasil.
Fonte: Elaboração própria (a partir de dados da EPE). Notas: CC significa Ciclo Combinado.

A Figura 2, por sua vez, ilustra a comparação entre os diferentes LCOEs calculados neste trabalho, em R$/MWh e considerando o cenário 'DI Futuro', para facilitar a visualização.

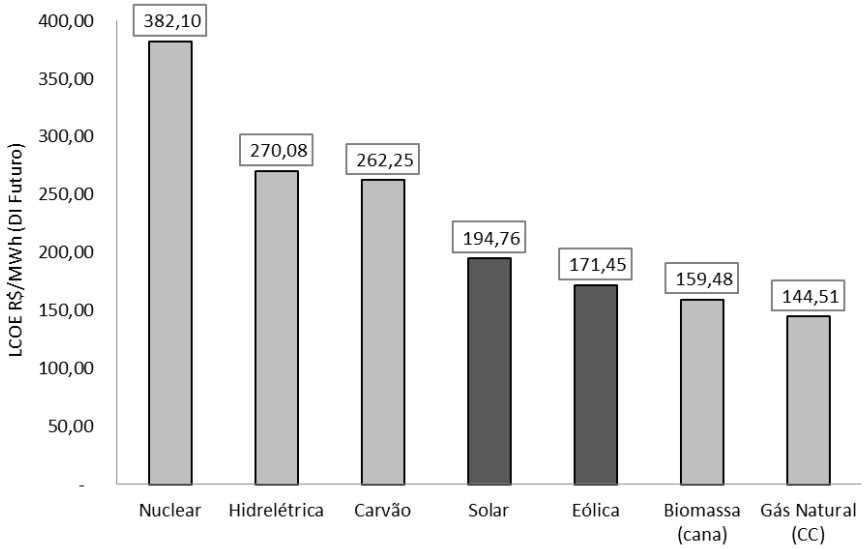


Figura 2. Comparação LCOE de Curto Prazo para Diversas Fontes (Brasil).
Fonte: Elaboração própria a partir de dados da EPE.

Por enquanto, mesmo com o fato de encontrarmos fontes mais competitivas economicamente do que a eólica e a solar, os valores encontrados para estas últimas não podem ser desprezados ou considerados pouco atraentes. Os LCOEs de ambas são menores que o das grandes usinas hidrelétricas, que não devem atrair pesados investimentos no futuro pela frequente escassez de recursos hídricos para tal geração no Brasil, além do fato destas usinas já responderem pela maior capacidade instalada na matriz energética brasileira, sendo tal investimento contrário à boa prática de diversificação das matrizes elétricas para se evitar a dependência de uma única fonte. Por fim, considerando somente as fontes limpas de emissão de gases de efeito estufa, a eólica e a solar só perdem em competitividade para a biomassa (produzida a partir da cana). Este é um sinal de que as fontes caminham para situações mais favoráveis de competitividade de custos.

4. Cálculo de LCOE no Médio e no Longo Prazo

Com o objetivo de analisar o potencial de redução de custos na geração eólica e solar, calculou-se também o LCOE de médio e de longo prazo para as fontes, para os períodos 2030-

2040 e 2040-2050, respectivamente. O PNE 2050 [EPE 2020b] traz as estimativas do quanto os custos de CAPEX e OPEX devem cair nestes períodos, o que foi considerado neste cálculo. Assim, partindo-se dos dados do período 2020-2030 (curto prazo, conforme apresentado acima) para o Brasil, a partir do PDE 2030, e da perspectiva de barateamento dos custos trazida pelo PNE 2050, chegou-se aos valores de CAPEX e OPEX ilustrados na Tabela 5.

Fonte	CAPEX (R$/kW)			OPEX (R$/kW)		
	2020-2030 [1]	2030-2040 [2]	2040-2050 [2]	2020-2030 [1]	2030-2040 [2]	2040-2050 [2]
Eólica	R$ 4.867,35	R$ 3.853,32	R$ 3.536,94	R$ 97,35	R$ 97,35	R$ 97,35
Solar FV	R$ 4.326,53	R$ 3.502,43	R$ 2.641,24	R$ 54,08	R$ 43,27	R$ 32,45

Tabela 5. CAPEX e OPEX no curto, médio e longo prazo no Brasil.
Fontes: [1] EPE, 2021. [2] Elaboração própria, a partir de dados de EPE [2020b].

Dentre as fontes analisadas neste artigo, foram escolhidas somente aquelas com perspectiva de redução nos custos no horizonte do PNE 2050, ou seja: eólica e solar fotovoltaica. Essa perspectiva se justifica por serem as fontes renováveis que ainda não atingiram toda sua maturidade e ganhos de escala esperados, ao contrário das fontes tradicionalmente estabelecidas na matriz elétrica brasileira. Estas, notadamente os combustíveis fósseis, hidrelétricas, nucleares e biomassa, devem manter os atuais níveis de custos ou sofrer reduções pouco significativas. As fontes alternativas, portanto, ainda tendem a ter grande potencial de desenvolvimento no Brasil quando contarem com a esperada redução nos seus custos, principalmente nos custos iniciais, como se pode notar na Tabela 5.

Foi adotada aqui a taxa de câmbio R$5,05/US$, conforme previsão mais longa para a variável disponível no Boletim Focus de 24 de maio de 2021. A partir desses novos dados e considerando-se apenas a taxa de desconto de 10% a.a., visto que as projeções de DI Futuro seriam insuficientes para alcançar o longo prazo, foram calculados novos LCOEs para dois horizontes: o médio prazo, que considera os anos entre 2030 e 2040, e o longo prazo, entre 2040 e 2050. Os resultados das projeções estão dispostos na Tabela 6 e na Figura 3.

Tipos de Fonte	R$/MWh		US$/MWh	
	2030-2040	2040-2050	2030-2040	2040-2050
Eólica	151,06	140,85	27,47	25,61
Solar FV	169,06	127,43	30,74	23,17

Tabela 6. LCOE de médio e longo prazo no Brasil.
Fonte: Elaboração própria, a partir de dados do EPE.

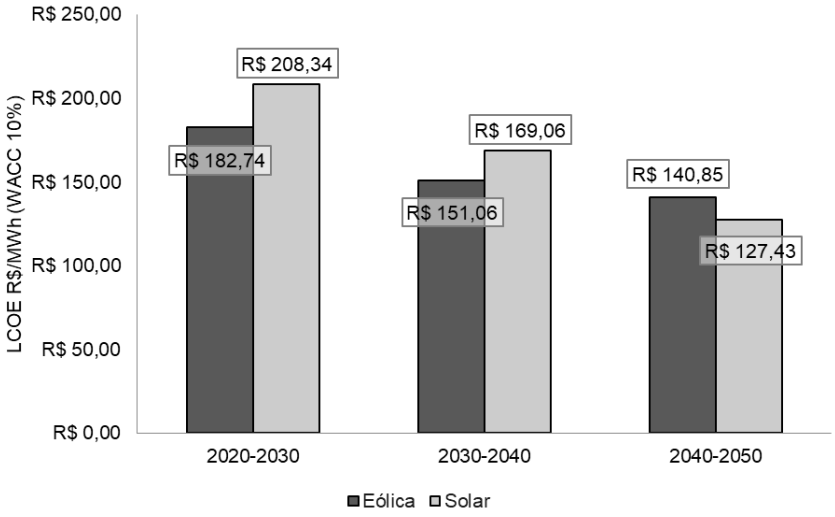


Figura 3. Comparação LCOE de Curto, Médio e Longo Prazo (Brasil).
Fonte: Elaboração própria, a partir de dados da EPE.

Os resultados indicam que ambas as fontes irão ganhar competitividade ao longo do tempo. Os ganhos de escala da indústria nacional e mundial devem contribuir para a redução nos custos de capital e de operação e manutenção, com consequentes menores investimentos sendo necessários para se instalar a mesma capacidade de geração. Apesar da queda, foi adotada a hipótese simplificadora de constância dos Fatores de Capacidade (FCs), algo que deve mudar com o avanço tecnológico e o melhor aproveitamento das torres eólicas e das células fotovoltaicas na produção de energia [IEA 2020]. Como consequência da maior produção de eletricidade, essas quedas podem até mesmo estar subestimadas e os ganhos de competitividade podem ser maiores.

Segundo os resultados atingidos, a geração solar fotovoltaica será a mais barata entre todas as fontes, renováveis ou não, no longo prazo. Com uma taxa de desconto de 10% a.a., maior do que caso fossem consideradas projeções do DI Futuro, ou seja, com uma abordagem mais conservadora, a solar fotovoltaica apresentou LCOE médio estimado de R$127,43/MWh entre 2040 e 2050. Ela superou em termos de competitividade a projeção da eólica, de R$140,85/MWh, que até o 2040 deve continuar a ser mais competitiva do que a solar, repetindo a situação do curto prazo.

Comparando com as outras fontes, que devem manter o nível de custos do curto prazo, tanto a solar quanto a eólica devem ser mais atraentes para investimentos no longo prazo. Se a geração elétrica via biomassa e gás natural mantiverem seus custos de curto prazo, ambas acima de R$ 140,00 com o cenário DI Futuro, elas serão superadas. Neste caso, não apenas o argumento de apoio ao combate às mudanças climáticas favorecerá a eólica e a solar, mas também o argumento econômico-financeiro de barateamento nos custos e de maior competitividade, pois será mais barato investir nestas fontes do que em qualquer outro recurso energético.

5. Conclusões e diretrizes para estudos futuros

O avanço das energias eólica e solar tende a ganhar cada vez mais importância no Brasil, seguindo a tendência mundial de transição energética, o que é corroborado neste estudo. Em uma matriz elétrica dominada por fontes hídricas, limpas, mas que já apresentam sinais de esgotamento para novas usinas e de fragilidade em relação a escassez de chuvas, a expansão do setor elétrico brasileiro tende a ser dominado por outros tipos de fontes renováveis. Sendo a diversificação um objetivo a ser seguido em políticas de expansão de uma matriz energética, as fontes renováveis alternativas passam a assumir papel central nesse processo. O presente artigo buscou demonstrar, com dados concretos e estimativas fundamentadas em documentos técnicos oficiais, em que

patamar estão as fontes eólica e solar no Brasil evoluírem termos de competitividade de custo e como essa situação estará nas próximas décadas. O trabalho, portanto, possui alta relevância, dado que a atratividade econômica constitui um dos fatores mais importantes para os investidores decidirem em qual tipo de empreendimento devem alocar os seus recursos.

Com os cálculos de curto prazo, os valores de LCOE encontrados para as fontes destacadas, considerando as projeções de juros no contexto da economia brasileira, foram de R$194,76/MWh para a solar fotovoltaica e R$171,45/MWh para a eólica. Quando comparadas com a fonte mais barata segundo o mesmo cálculo, ou seja, o gás natural em ciclo combinado (R$144,51/MWh), a primeira está aproximadamente 38% mais cara e a segunda possui um preço aproximadamente 19% superior. Pode-se concluir que, simplesmente pela ótica dos custos nivelados, há outras fontes energéticas mais competitivas e que podem ser mais atraentes aos investidores por demandarem menor capital para se produzir a mesma quantidade de energia. No entanto, fatores como a poluição e a geração de resíduos não são considerados nesse cálculo, assim como a possibilidade de que se realizem incentivos financeiros por meio de políticas públicas, capazes de tornar os investimentos em recursos renováveis alternativos mais atraentes.

Já no longo prazo, estima-se que a situação mude. A eólica e a solar vão ganhar competitividade nos custos, devido aos avanços tecnológicos e aos ganhos de escala mundial e nacional, com o ganho de protagonismo esperado nas matrizes elétricas ao redor do mundo. Do curto para o médio prazo, a solar fotovoltaica deve se beneficiar de uma queda de quase 19% no seu LCOE e mais 25% do médio para o longo prazo. Isso resultaria em uma queda de aproximadamente 39% do curto para o longo prazo, um ganho considerável que a levaria ao posto de fonte mais competitiva da matriz brasileira no período mais longo, superando inclusive a eólica. Esta, segundo os cálculos deste artigo, partiria de uma queda de 17% do curto para o médio prazo para uma queda de 7% do médio para o longo prazo. Assim, a queda do início para o final do período considerado seria de aproximadamente 23%.

Conclui-se que as fontes renováveis alternativas tendem a seguir o processo de ganho de competitividade no Brasil. Com a ameaça do aquecimento global e a necessidade de se investir em fontes limpas, além da indisponibilidade de se avançar com novas usinas hidrelétricas, fica clara a importância do barateamento de fontes como a eólica e a solar para garantir a diversificação, a limpeza e a segurança de abastecimento da matriz elétrica brasileira. A dependência dos recursos hídricos já foi um problema sério que ocasionou crises de racionamento no setor elétrico brasileiro [Dutra e Szklo 2006, Dutra 2018], além de ainda ameaçar novas crises ocasionalmente [Infomoney 2021, Valor Econômico 2021], o que pode ser evitado com o investimento em outras fontes.

No curto prazo, apresar de já serem mais competitivas que termelétricas a carvão, hidrelétricas e nucleares, a eólica e a solar ainda precisariam de impulsos a partir de políticas energéticas para ganhar atratividade, seja com facilitação de crédito destinado às renováveis alternativas ou desincentivos à produção de energia via fontes poluentes. No longo prazo, por outro lado, o movimento de queda nos custos tende a deixá-las naturalmente mais atrativas. Espera-se que isso se reflita em instalações de maiores capacidades de geração e consequentes ganhos de representatividade dessas fontes, com maior protagonismo ainda da eólica, que hoje já ocupa a segunda posição na capacidade instalada do país como um todo e a primeira posição no Nordeste, região brasileira onde a fonte é mais produtiva. A solar, por sua vez, alinhada à tendência de descentralização da geração de eletricidade, pela facilidade de instalação de usinas de micro e minigeração, também deve ganhar cada vez mais importância.

Por fim, alguns aprimoramentos podem ser apontados para a continuidade dos estudos. Primeiramente, vale ressaltar que embora estudos baseados em LCOE sejam úteis na comparação de competitividade entre fontes energéticas, investidores e formuladores de políticas devem ter em mente suas limitações, buscando considerar também outros fatores na tomada de decisão. Pode-se citar como exemplos nesse contexto as condições geográficas, regulatórias e de aceitação pública quanto aos empreendimentos. Há métricas mais robustas, que levam em conta tanto o custo quanto a receita esperada na comparação de competitividade entre diferentes fontes, assim como o valor

que a adição de uma planta de geração adiciona ao sistema. São exemplos a LACE (*Levelized Avoided Cost of Energy*) e VALCOE (*Value-Adjusted LCOE*) [IEA 2020]. Outro ponto importante, que pode estimular maior interesse no investimento em tecnologias limpas, é a precificação dos impactos ambientais. Com a preocupação ambiental ganhando cada vez mais força, as estratégias empresariais e de financiamento podem precificar o "risco ambiental" de se investir em tecnologias poluentes, o que resultaria em ganhos de vantagem comparativa para as energias renováveis. Calcular esta e outras precificações dos impactos ambientais daria ainda maior robustez ao argumento de que se deve investir em tecnologias que combatam as mudanças climáticas, dentre as quais se incluem a eólica e a solar.

Referências

BCB (Banco Central do Brasil). (2021). Séries de estatísticas consolidadas. https://www3.bcb.gov.br/expectativas/publico/consulta/serieestatisticas. Acessado: 27/05/2021.

Canal Energia. (2020). Primeira hidrelétrica construída no Brasil deixa de operar para o SIN. https://www.canalenergia.com.br/noticias/53131200/primeira-hidreletrica-construida-no-brasil-deixa-de-operar-para-o-sin. Acessado: 01/06/2021.

Castro, N. et al. (2018). Perspectiva da Energia Eólica Offshore. URL http://gesel.ie.ufrj.br/app/webroot/files/IFES/BV/castro184.pdf.

Castro, N. et al. (2016). Perspectivas e Desafios da Difusão da Micro e da Mini Geração Solar Fotovoltaica no Brasil. *Texto de Discussão do Setor Elétrico*, nº 67. URL http://146.164.3.11/app/webroot/files/publications/12_TDSE67.pdf.

Diniz, T. (2018). Expansão da Indústria de Geração Eólica no Brasil: Uma Análise à Luz da Nova Economia das Instituições. *Planejamento e Políticas Públicas*, n. 50, p. 233-255.

Dos Reis, M. et al. (2021). Economic analysis for implantation of an offshore wind farm in the Brazilian coast. Sustainable Energy Technologies and Assessments, v. 43, 100955. DOI https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100955.

Dutra, R. e Szklo, A. A Energia Eólica no Brasil: Proinfa e o novo modelo do Setor Elétrico. *In: Anais do XI Congresso Brasileiro de Energia-CBE*, p. 842-868.

EIA (U.S. Energy Information Administration). (2021). Levelized Costs of New Generation Resources in the Annual Energy Outlook 2021. URL https://www.eia.gov/outlooks/aeo/pdf/electricity_generation.pdf.

EPE (Empresa de Pesquisa Energética). (2020a). Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2020. URL https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/anuario-estatistico-de-energia-eletrica.

EPE (Empresa de Pesquisa Energética). (2020b). Plano Nacional de Energia 2050. URL https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Nacional-de-Energia-2050.

EPE (Empresa de Pesquisa Energética). (2021). Plano Decenal de Energia 2030. URL https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-2030.

Guimarães, L. (2019). O Custo Nivelado da Eletricidade e seu Impacto na Transição Energética. *FGV Energia*. URL https://fgvenergia.fgv.br/opinioes/o-custo-nivelado-da-eletricidade-e-seu-impacto-na-transicao-energetica-0.

IEA (International Energy Agency). (2018). Global share of electricity generation, 2018. URL https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-share-of-electricity-generation-2018. Acessado: 01/06/2021.

IEA (International Energy Agency). (2020). Projected Costs of Generating Electricity 2020. URL https://www.iea.org/reports/projected-costs-of-generating-electricity-2020.

Infomoney. (2021). Cotações - Juros Futuros. https://www.infomoney.com.br/ferramentas/juros-futuros-di/. Acessado: 27/05/2021.

Infomoney. (2021). Especialistas falam em risco de apagão energético; veja impactos da crise de energia na Bolsa e na economia. https://www.infomoney.com.br/mercados/especialistas-falam-em-risco-de-apagao-energetico-veja-impactos-da-crise-de-energia-na-bolsa-e-na-economia/. Acessado: 02/06/2021.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2018). Impacts of 1.5ºC Global Warming on Natural and Human Systems. *In: Global Warming of 1.5°C*. Capítulo 3. URL https://www.ipcc.ch/sr15/.

IRENA (International Renewable Energy Agency). (2016). Innovation Outlook: Offshore Wind. URL https://irena.org/publications/2016/Oct/Innovation-Outlook-Offshore-Wind.

IRENA (International Renewable Energy Agency). (2019). Renewable Power Generation Costs. URL https://www.irena.org/publications/2020/Jun/Renewable-Power-Costs-in-2019.

Johnston, B. et al. (2020). Levelized cost of energy: A challenge for offshore wind. *Renewable Energy*. URL: https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.06.030.

Oliveira, E. M. (2015). Corporate social responsibility and firm performance: A case study from the Brazilian electric sector. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

Valor Econômico. (2021). Crise hídrica se agrava e cresce risco de blecautes. https://valor.globo.com/brasil/noticia/2021/05/31/crise-hidrica-se-agrava-e-cresce-risco-de-blecautes.ghtml. Acessado: 02/06/2021.