

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



João Carvalho de Oliveira

**A EVOLUÇÃO DA MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA E AS FONTES
RENOVÁVEIS NA FUTURA ECONOMIA DO CARBONO ZERO**

Orientador: Sérgio Besserman Vianna

Rio de Janeiro - 2021

Sumário

1. Introdução	4
1.1. Motivação e Resultados Pretendidos	4
2. Crise Climática	6
3. Setor Elétrico Brasileiro	8
3.1 Energia Solar	14
3.2 Energia Eólica.....	23
4. Conclusão	30
5. Metodologia.....	34
6. Dados.....	35
7. Referências	37

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABEEólica	Associação Brasileira de Energia Eólica
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BEN	Balanço Energético Nacional
CAPEX	Despesas de Capital ou Investimento em Bens de Capital
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GEE	Gases de Efeito Estufa
GN	Gás Natural
IEMA	Instituto de Energia e Meio Ambiente
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
IRENA	Agência Internacional para as Energias Renováveis
LEE	Leilões de Energia Existente
LEN	Leilões de Energia Nova
MME	Ministério de Minas e Energia
OIEE	Oferta Interna de Energia Elétrica
PNE	Plano Nacional de Energia
SIN	Sistema Interligado Nacional
UNFCCC	Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima

1. Introdução

Em meio a atual Crise Ambiental, o constante aumento da temperatura global alerta cada vez mais os líderes mundiais sobre a necessidade de mudanças, principalmente nos setores emissores de gases do efeito estufa. Assim, o setor de geração elétrica e calor - responsável por até [25%](#) das emissões globais - é um ponto focal que exige mudanças indiscutíveis no combate à crise climática.

Assim, tendo em consideração o impacto do setor elétrico no aquecimento do planeta, e a projeção de uma transição para o baixo carbono nas próximas décadas, é notável a posição vantajosa a ser tomada pelos países que planejem a transição para fontes renováveis na geração elétrica.

Com isso, a ideia central da monografia está na apresentação da evolução da matriz elétrica brasileira, assim como a demonstração do potencial de expansão das fontes de energia renováveis e a viabilidade do Brasil totalmente sustentado por geração elétrica limpa.

1.1. Motivação e Resultados Pretendidos

Com o visível crescimento das energias renováveis na geração de eletricidade em escala mundial, os benefícios colaterais no bem estar e o papel fundamental no setor elétrico com a transição para o baixo carbono, é esperado que muitos países planejem substituições em suas matrizes elétricas. Assim, o Brasil, favorecido por características geográficas e climáticas para a geração de energia limpa (como a solar e eólica), com o devido planejamento na transição do setor elétrico, pode substituir as termelétricas pelas eólicas e solares, garantindo posição vantajosa mediante a precificação do carbono nas próximas décadas.

A pesquisa parte da análise da matriz elétrica brasileira e a progressão das fontes emissoras de gases estufa na geração de energia nas últimas décadas. Após a análise, o estudo tem como objetivo avaliar a possibilidade e viabilidade da maior implementação das matrizes elétricas renováveis no Brasil, visando as vantagens de um país totalmente renovável em meio a precificação e o custeio da emissão de gases estufas, considerando as futuras políticas ambientais de combate à crise climática.

Assim, a partir da análise da progressão das emissões de gases estufa no setor elétrico brasileiro nas últimas décadas, da apresentação dos custos das fontes renováveis e a viabilidade na

capacidade de geração elétrica, será considerada a possibilidade da substituição das matrizes emissoras de GEE. Com esta demonstração, é esperado notar a projeção de aumento das emissões de gás carbônico no setor elétrico brasileiro nos próximos anos, assim como o alto potencial de expansão das fontes renováveis e a viabilidade do país iniciar a transição das fontes emissoras de gases estufa para as limpas, visando as vantagens de um setor elétrico livre da precificação do carbono.

2. Crise Climática

A Crise Ecológica Global apresenta dois elementos principais: O aquecimento global e a erradicação da biodiversidade, marcados pela emissão exacerbada de gases estufa e a ocupação do planeta. Apesar desses impactos serem notáveis no século XXI, a crise climática era prevista após a evidente transição do ser humano na exploração do planeta e nas emissões de gases estufa ao fim da Primeira Revolução Industrial (**Gráfico 1**). Guiadas pela inovação e crescimento econômico, nos últimos dois séculos as potências mundiais impactaram de maneira definitiva no meio ambiente através da exploração e utilização dos combustíveis fósseis.

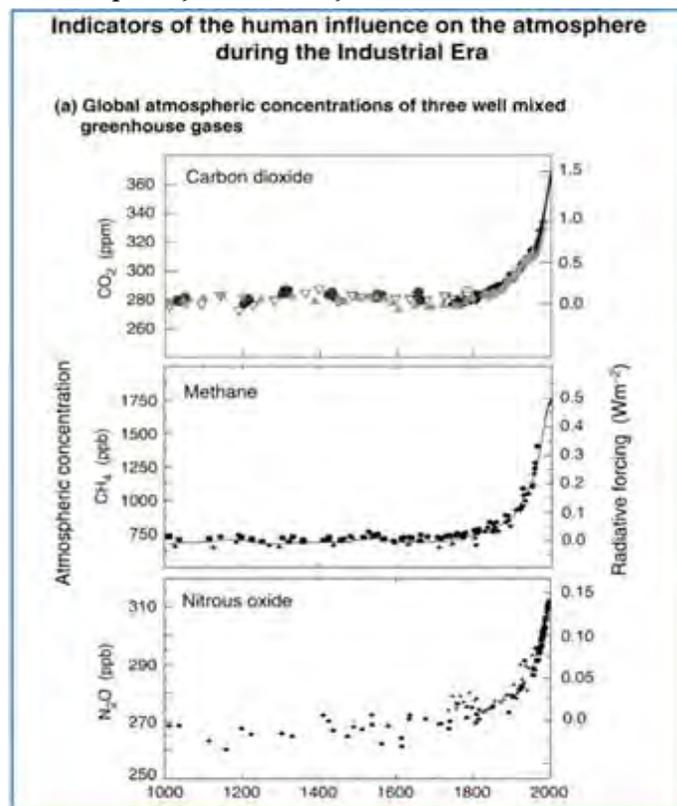


Gráfico 1: Emissões de Gases Estufa 1000-2000

Ainda que visível o acentuado aumento das emissões de gases estufa desde o século XIX e a previsão de possíveis graves efeitos dessa transição, a crise climática foi formalizada apenas na década de 80. No ano de 1988 após aumento relevante da temperatura global, marcado pelo verão mais quente da história (até 1988), marcou-se a gravidade dos efeitos da exploração, atraindo a atenção de diversos cientistas em todo o mundo após o relatório de James Hansen, um dos principais climatologistas da época, que projetou o aumento da temperatura global de 3.0°C – 4.5°C até 2100. Com esta nova realidade, no mesmo ano, em 1988 foi criado o IPCC (Painel

Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas), que busca sintetizar e divulgar informação científica que auxilie no entendimento das mudanças climáticas. Assim, o aquecimento global avançou como debate na década de 90, notável nos encontros e acordos, como na Rio-92, e o Protocolo de Kyoto.

Apesar da movimentação dos países para atingir a redução de emissões de gases estufa no fim do século XX, foi necessária a implementação do mais recente acordo a cerca das mudanças climáticas, o Acordo de Paris. Este tem como objetivo reduzir o aumento da temperatura global para 1.5 - 2°C até 2100 através da forte redução da emissão de gases estufa. Assim, temos três projeções de cenários (**Gráfico 2**) que variam de acordo com a conduta dos principais países emissores de gases estufa. Caso ocorra o não cumprimento das medidas climáticas (de acordo com as metas/políticas atuais), ao fim do século XX projeta-se um aumento de temperatura de 4.1 - 5.4°C. Caso os países sigam as metas anteriores ao Acordo de Paris, seria concretizado aumento de temperatura superior a 3°C, notando sua insuficiência e a necessidade de novas metas de redução nas emissões. Por fim, para atingir o terceiro e ideal cenário com aumento de 1,5 – 2°C (o mais seguro das projeções), como [relatado](#) pelo UNFCCC em 2019, as emissões de gases estufa globais teriam que reduzir 7% ao ano (1,5°C) ou 2,7% ao ano (2°C) de 2020 até 2030, evidenciando a dificuldade de alcançar os objetivos do Acordo de Paris e a baixa probabilidade de um aumento de temperatura inferior a 2°C.

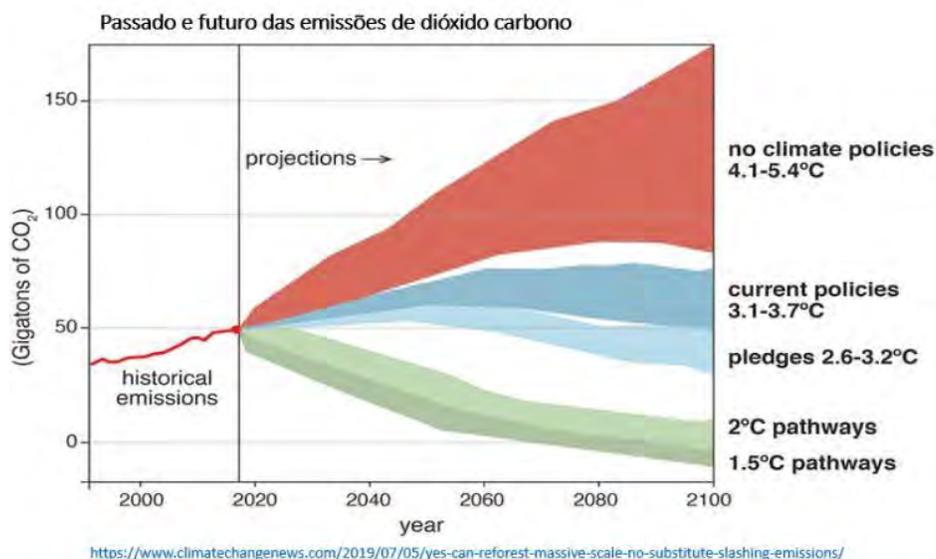


Gráfico 2: Projeção do Aquecimento Global 2000-2100

Vale notar que o aumento de temperatura superior 1,5°C amplificará a frequência e intensidade de fenômenos climáticos, como tempestades, ondas de calor, secas e outros efeitos já salientados em [relatórios](#) do IPCC. Assim, a significativa diferença no risco ao superar 2°C em comparação aos 1,5°C, coloca o cenário de aumento superior a 3°C (seguindo as medidas atuais) como extremamente crítico e até imprevisível nas consequências climáticas e ambientais, notando a necessidade de medidas restritivas fortes para a redução das emissões de GEE (gases do efeito estufa) nos próximos anos.

3. Setor Elétrico Brasileiro

O setor elétrico brasileiro teve seu desenvolvimento durante o século XX, marcado por três principais momentos, o início das práticas envolvendo a energia elétrica no país -durante a primeira metade do século XX-, com a instalação das primeiras usinas hidrelétricas, empresas (Light) e leis de energia; A atuação direta do estado nas diversas atividades do setor até o início do século XXI, com a instalação de agentes reguladores (Ministério de Minas e Energia, ANEEL e outras) e empresas (ELETROBRÁS, NUCLEBRAS e outras); e por fim, o recente processo de maior participação da iniciativa privada.

Dentro da estrutura do setor elétrico brasileiro, criada e desenvolvida durante o século XX, vale ressaltar a EPE, Empresa de Pesquisa Energética existente desde 2004 e vinculada ao Ministério de Minas e Energia, que tem a função de apresentar dados, estudos e pesquisas destinadas a subsidiar o planejamento do setor energético. Além dessa empresa estatal, a ANEEL, reguladora e fiscalizadora de todo o processo de geração, transmissão, distribuição e comercialização da energia elétrica e o BEN (Balanço Nacional Energético, disponibilizado pelo Ministério de Minas e Energia), serão determinantes para avaliação do setor elétrico brasileiro e a classificação da oferta interna de energia elétrica. Tendo em vista essa denominação, o BEN divide a geração elétrica em: Hidráulica; Eólica; Gás Natural; Biomassa; Nuclear; Carvão; Derivados do Petróleo; Solar ; Importação (incluída nas demais). As Termelétricas incluem a geração elétrica por gás natural, biomassa, nuclear, carvão e derivados do petróleo.

Geração de Energia Elétrica por Fonte no Brasil - Participação em 2020

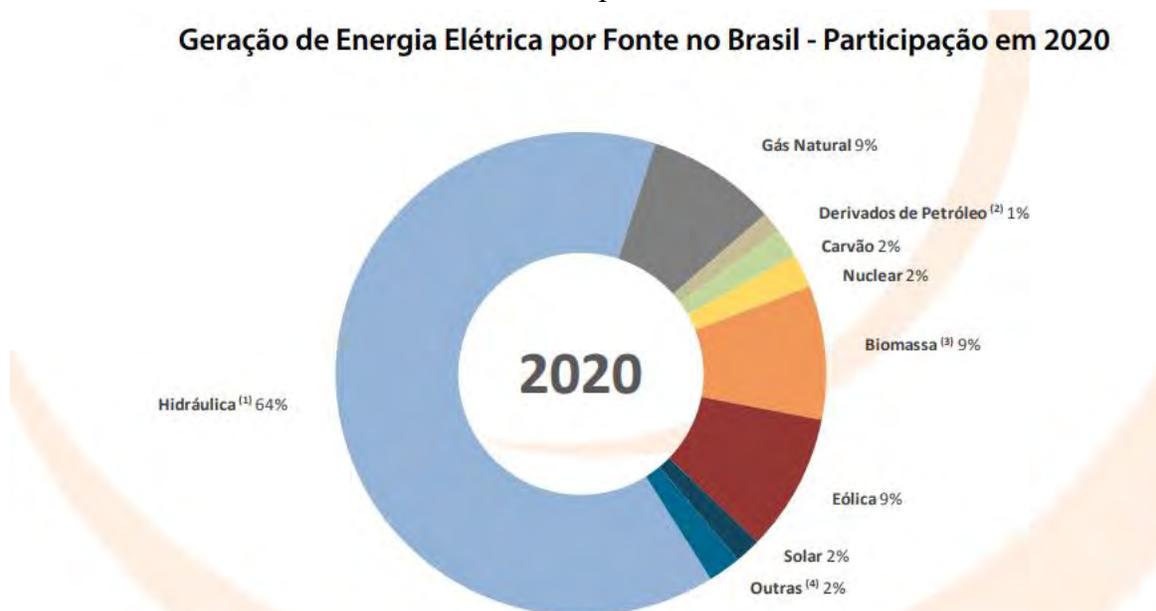


Gráfico 3: Fonte: [Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2021](#)

Frente a estes processos de desenvolvimento do setor elétrico, a matriz elétrica brasileira desde o começo do século XX foi favorecida com investimentos para o aproveitamento das bacias hidrográficas, inicialmente no sudeste – em 1908 com a Usina de Fontes Velha - e no nordeste - em 1913 com a Usina de Delmiro Gouveia-. Este processo perdurou todo o século passado, e assim evidenciou o planejamento focado na matriz hidroelétrica como amparo do uso de energia elétrica no Brasil. O país tem hoje como reflexo uma das matrizes elétricas mais limpas no mundo, tendo no ano de 2020 até 63,8% de sua geração proveniente da fonte hidráulica, 9,2% da eólica e 1.7% da solar, visível na tabela e gráfico acima, retirados do relatório estatístico anual do EPE (Empresa de Pesquisa Energética).

Com isso deduzimos que a matriz energética brasileira é limpa em sua predominância, atingindo no primeiro ano de pandemia 84,8% de sua Oferta Interna de Energia Elétrica (OIEE) proveniente de renováveis (considera-se a geração elétrica através da biomassa). Todavia, é evidente a dependência do setor na fonte energética hidráulica, o que resultou no histórico brasileiro períodos de racionamento de energia associados a conhecidos e previstos períodos de seca. Assim, o setor elétrico brasileiro é principalmente complementado pela ação das termelétricas na provisão de eletricidade, porém a maior participação de diversas fontes é vital para evitar períodos de escassez de eletricidade. Além disso, é importante notar que as termelétricas representaram a segunda maior geração elétrica em 2020 (25,3%), logo a substituição da dependência hidráulica não pode se basear no crescimento das fontes poluentes, visto a impraticidade de contornar o problema da predominância das hidroelétricas com outro obstáculo, o aumento das emissões de GEE (Gases de Efeito Estufa) no setor elétrico no SIN¹ (Sistema Interligado Nacional).

¹ SIN(Sistema Interligado Nacional) é o sistema de produção e transmissão de energia elétrica do Brasil. Este interliga todos os “subsistemas” brasileiros: Sul, Sudeste/Centro Oeste, Nordeste e grande parte do Norte. Contém uma rede extensa de hidrelétricas, Eolielétricas, Termelétricas e outras.

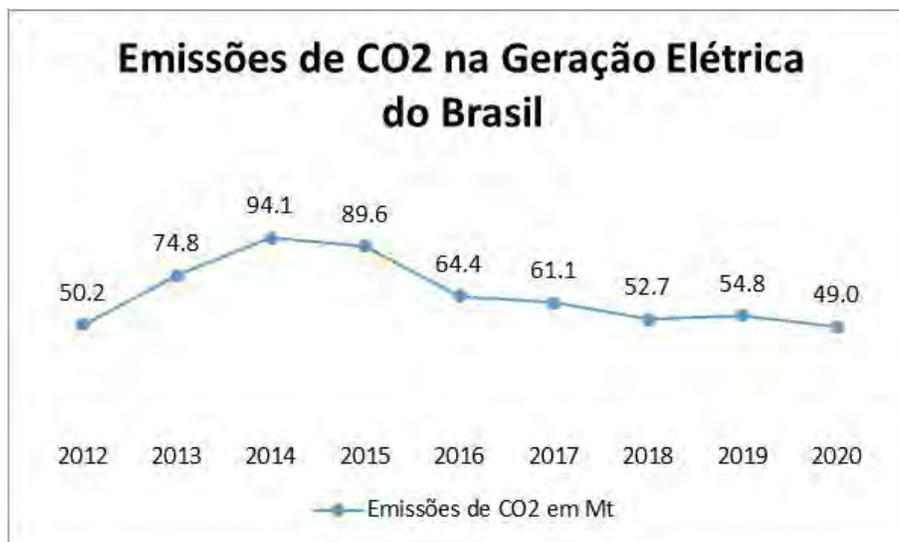


Gráfico 4: Dados: [Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2021](#)

Vale notar que a geração elétrica emitiu 49 milhões de toneladas de gás carbônico em 2020, sendo 30 milhões de toneladas no SIN¹ (Sistema Interligado Nacional), denotando uma redução de 10.7% em comparação ao ano de 2019.

Apesar do movimento indicar posicionamento de transição para a menor utilização de fontes elétricas não renováveis, esse impacto é reflexo da atípica retração de cerca de 1,4% no consumo de energia no ano de 2020, segundo o relatório estatístico do EPE de 2021 (ano base 2020). A redução do consumo de eletricidade nos setores comercial e industrial - que representam 52,3% do consumo anual de energia elétrica no Brasil -, seriam já indícios de um efeito da pandemia, o que não evidencia um planejamento para menor utilização de fontes energéticas poluentes.

As emissões de gás carbônico no setor elétrico são oriundas da geração energética pelas termelétricas, tendo como destaque a queima do gás natural e carvão (96% das emissões de CO2 no setor em 2020). Esses dois recursos energéticos terão grande impacto nas variações de milhões de toneladas de CO2 emitidas anualmente no Brasil na geração elétrica. Com isso, a maior participação dessas usinas com a queima de gás natural, carvão, óleo combustível e óleo diesel para a redução da dependência das hidrelétricas não parece solução ótima, visto que representam aumento na emissão de GEE e portanto retrocesso no combate à crise climática, mediante a provável precificação do carbono. No gráfico abaixo é possível verificar a proporção de emissões de gás carbônico no SIN (2012-2020) por recurso gerador de eletricidade (constituem as termelétricas sem os dados de biomassa).

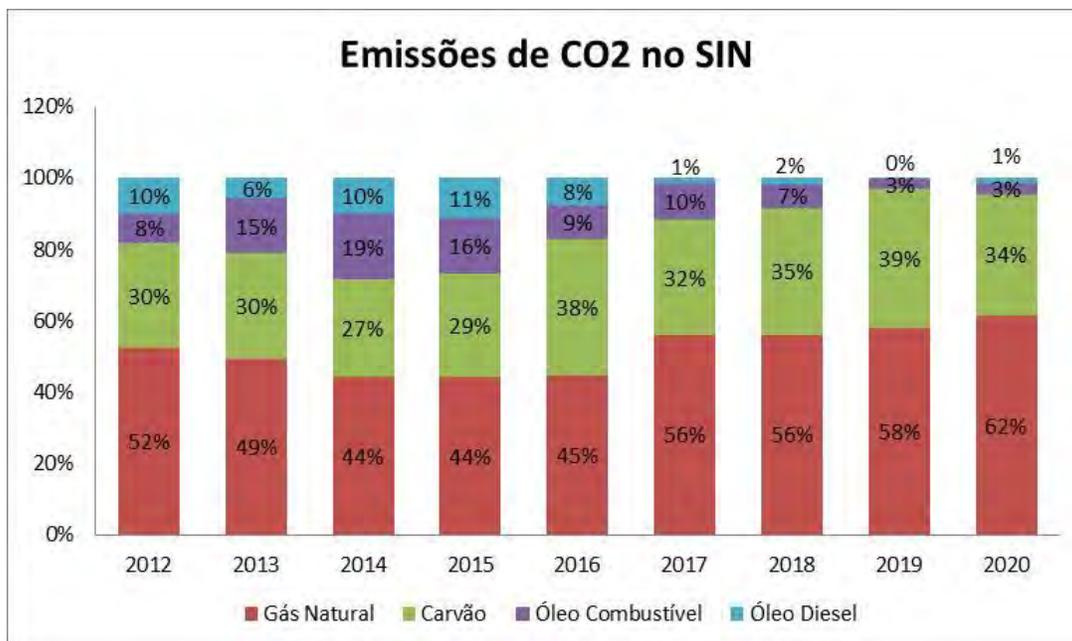


Gráfico 5: Dados: [Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2021](#)

Vale notar que a redução de 10.7% das emissões de GEE no setor elétrico são explicadas em parte pela redução das termelétricas baseadas no carvão, enquanto o gás natural aumenta sua dominância na participação de emissões do setor. Além disso, ao considerar a geração elétrica a partir do carvão no ano de 2020, relata-se a ineficácia da fonte, que ao produzir aproximadamente 2% da matriz brasileira constituiu 34% das emissões do parque gerador. A ausência de projeto de transição para uma matriz elétrica totalmente limpa é concretizada no próximo gráfico, ao identificar a quantidade de empreendimentos (usinas) em construção em 2021.



Gráfico 6: Dados: [Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2021](#)

No gráfico acima verificamos o foco do planejamento brasileiro nas fontes elétricas renováveis, o alto número de centrais eólicas em construção (115) aponta para o progresso observado da geração eólica nas duas primeiras décadas do século XXI, assim como as usinas fotovoltaicas com o terceiro maior número de empreendimentos em construção (33). Entretanto, quando analisamos o potencial de MW (Megawatt) dessas construções, as usinas eólicas e solares representam 33.3 e 11.3% do potencial de eletricidade a ser implantado, enquanto as termelétricas 38.6%. Com isso, apesar da maior participação das renováveis (44.6%), analisando isoladamente está evidente a estratégia de investimento na principal fonte de geração elétrica emissora de GEE, que terá impacto direto nas emissões de gás carbônico nos próximos anos, caso não haja atípica redução no consumo de energia (como visto no ano de 2020).

Por outro lado é importante notar o impacto positivo das termelétricas na geração energética através da biomassa e o efeito reduzido através do gás natural quando comparado ao carvão e derivados de petróleo. Assim, ao analisarmos brevemente a participação do carvão na geração elétrica de 2020 (1.9%) e sua participação nas emissões de GEE no SIN (34%, 10.2 Mt CO₂), vemos que a priorização do gás natural é crucial neste momento, uma vez que ao supor a mesma geração elétrica de 8.6% do gás natural, a fonte baseada no carvão emitiria anualmente aproximadamente adicionais 35 Mt de CO₂, valor superior a todo o quantitativo observado no sistema interligado nacional em 2020. Desse jeito, o crescimento da participação dessas usinas no setor elétrico é alarmante ao indicar aumento da emissão de GEE, porém amenizado pela predominância da utilização do gás natural e da biomassa na geração elétrica.

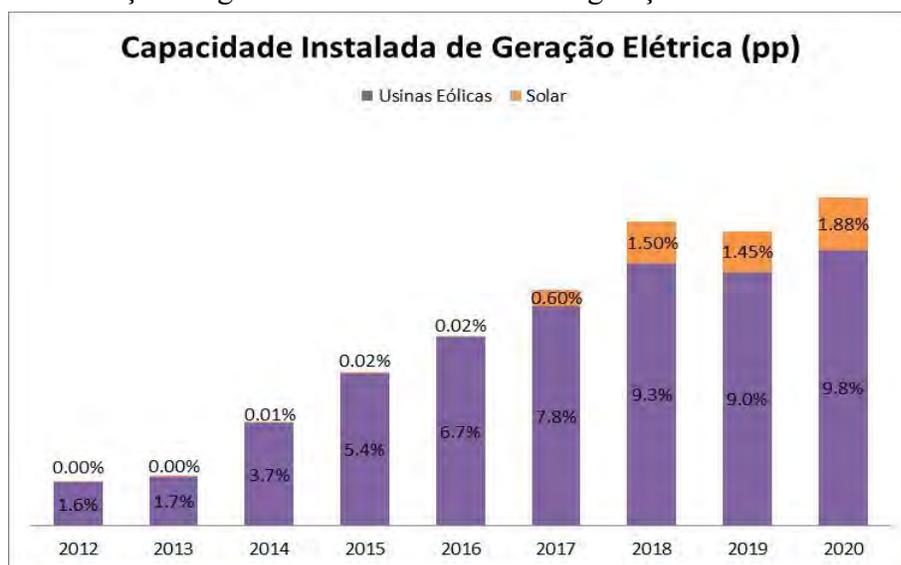


Gráfico 7: Dados: [Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2021](#)

Sobre a capacidade instalada de Geração Elétrica, hoje as fontes renováveis Eólica e Solar são de extrema importância frente à crise climática existente e as possíveis precificações das emissões de gases de efeito estufa. Este posicionamento de favorecimento das fontes limpas pode ser visto no crescimento de capacidade instalada de geração elétrica, no ano de 2012 as Usinas Eólicas representavam 1.6% do total no Brasil, em maio/2021 atingem 9.8%. Esse progresso é diretamente sustentado pela efetiva geração de energia eólica no país, como citado anteriormente no **Gráfico 3**, 9.2% da eletricidade gerada em 2020 foi proveniente da fonte eolioelétrica. A cerca da Energia Solar, sua estruturação é recente e notável, visto o alto crescimento desde 2012, sua capacidade instalada não passava de 2 MW (inferior a 0.01% da capacidade instalada nacional) e hoje atinge 1.9% do total no país – vale ressaltar o crescimento de 3836% na capacidade instalada em 2017-. Além disso, apesar do baixo aumento nos anos de 2019 e 2020, a geração elétrica fotovoltaica atingiu 1.7% no primeiro ano de pandemia, o que representa um aumento de 61.1% na geração de eletricidade no Sistema Interligado Nacional.

Desse jeito nos deparamos com uma matriz elétrica majoritariamente limpa, com até 84,8% de sua OIEE renovável, mas que apesar do crescimento visível das fontes eólica e solar, também investe no crescimento e maior participação das termelétricas na geração de eletricidade. O planejamento da expansão da geração elétrica no país nas próximas décadas - sobretudo nos leilões - é crucial para direcionar o crescimento das usinas eolioelétricas, fotovoltaicas e termelétricas, e assim posicionar o Brasil quanto as futuras emissões de gases de efeito estufa no setor elétrico.

3.1 Energia Solar

Nos últimos anos, a energia solar fotovoltaica representa o maior crescimento de capacidade elétrica instalada no mundo (apresentado no [IRENA, 2020](#)) e no Brasil, apresentado anteriormente no capítulo 2.2. Desse jeito, o mercado de geração elétrica se depara com constantes evoluções tecnológicas e mudanças nas estruturas das placas fotovoltaicas e em sua geração energética. A popularidade da fonte solar e a recorrente evolução dos equipamentos tem impacto direto no investimento que financia projetos de pequeno, médio e grande porte, visto a ligação natural com os preços desses equipamentos. Com isso, é esperado que o Brasil esteja interligado cada vez mais com essa fonte, visto o favorecimento do investimento na geração elétrica renovável não geradora de GEE e a importante vantagem geográfica do país que detém altos índices de radiação solar.

Sobre os recursos da usina solar e a vantagem brasileira em comparação com outras fontes de geração elétrica, a posição entre os trópicos de Câncer e Capricórnio resulta na incidência da radiação solar de maneira vertical e distribuída regularmente pelo território brasileiro, como apresentado no estudo do EPE ([“ENERGIA RENOVÁVEL”, 2016, MAURÍCIO T. TOLMASQUIM](#)). Este posicionamento permite que o Brasil tenha altos índices de incidência de radiação solar em todas as épocas do ano, evidenciando a vantagem no setor em comparação a países mais desenvolvidos na geração elétrica solar e menos favorecidos geograficamente. Além disso, o autor aponta que no longo prazo, a média de variabilidade anual na geração elétrica das usinas solar é menor do que as gerações eólicas e hidrelétricas, garantindo maior certeza no retorno desse investimento. Vale notar a importância da baixa variância na geração elétrica dessas usinas, visto que a abundância desse recurso proporciona relação de dependência climática extremamente suavizada se comparada a geração elétrica por hidroelétricas que comumente sofrem crises hídricas e resultam em altíssimos preços nas contas de luz. Com isso, o diálogo da fonte solar como substituta da termoelétrica por não emitir gases de efeito estufa se expande para também substituir a predominância das hidroelétricas no Brasil, que apesar de benéficas à crise climática, colocam o país em posições fragilizadas com a ocorrência de crises hídricas, observáveis no atual ano de 2021.

A respeito do recurso da energia solar de disponibilidade virtualmente infinita, é importante ressaltar a discussão sobre a geração elétrica das usinas fotovoltaicas nos dias nublados ou pouco ensolarados e sua instabilidade. Na análise (Fact Sheet FV) administrada pelo EPE no mês de Julho de 2020 sobre a média histórica anual de geração elétrica solar no SIN, a geração solar apresentou variabilidade interanual baixíssima, variando apenas 5% da média. Esta baixa variabilidade ocorre pela similaridade no potencial de geração elétrica das diferentes usinas solares no intervalo de 09h da manhã às 15h da tarde. Ao serem espalhadas pelo território brasileiro, não sofrem redução momentânea da geração elétrica com os tempos nublados (que ainda geram resultado energético). Vale notar que esta redução de geração elétrica pelo clima nublado é relevante no momento isolado, mas não é significante na análise interanual do país.

Sobre as áreas de instalação de usinas fotovoltaicas, são exigidas áreas de alta incidência de radiação solar e pouca inclinação no solo, visto que a verticalidade dos raios impacta na geração energética. Além disso, para analisar o potencial de conversão fotovoltaico no Brasil, descartam-se áreas de proteção ambiental, áreas urbanas, reservas vegetais, comunidades quilombolas, terras indígenas e áreas de vegetação nativa.

Apesar das limitações de localização para implementação de usinas solares, o vasto território brasileiro com alta incidência de radiação solar continua a favorecer o crescimento dessa fonte energética no país. Como pode ser observado nos mapas abaixo, a figura 1 demonstrará o mapa excluindo territórios com maior declividade, que resultaria na menor incidência dos raios solares e assim redução no potencial elétrico. Em seguida, a figura 2 remove os territórios inaptos a portarem usinas fotovoltaicas, dado que pertencem aos grupos citados no final do parágrafo anterior.



Figura 1: Mapa de irradiação direta Normal; Fonte: EPE (INPE e LABSOLAR)

No mapa acima está ilustrada a irradiação solar no Brasil. Percebe-se a predominância de terras favoráveis e aptas às usinas fotovoltaicas de médio e grande porte na área Central do país, nas regiões Centro Oeste, Nordeste e Sudeste. Mais especificamente, espera-se que os grandes projetos fotovoltaicos se concentrem no oeste da Bahia, no Vale do São Francisco, Piauí, Mato Grosso do Sul, leste de Goiás, oeste do estado de São Paulo e norte de Minas Gerais.

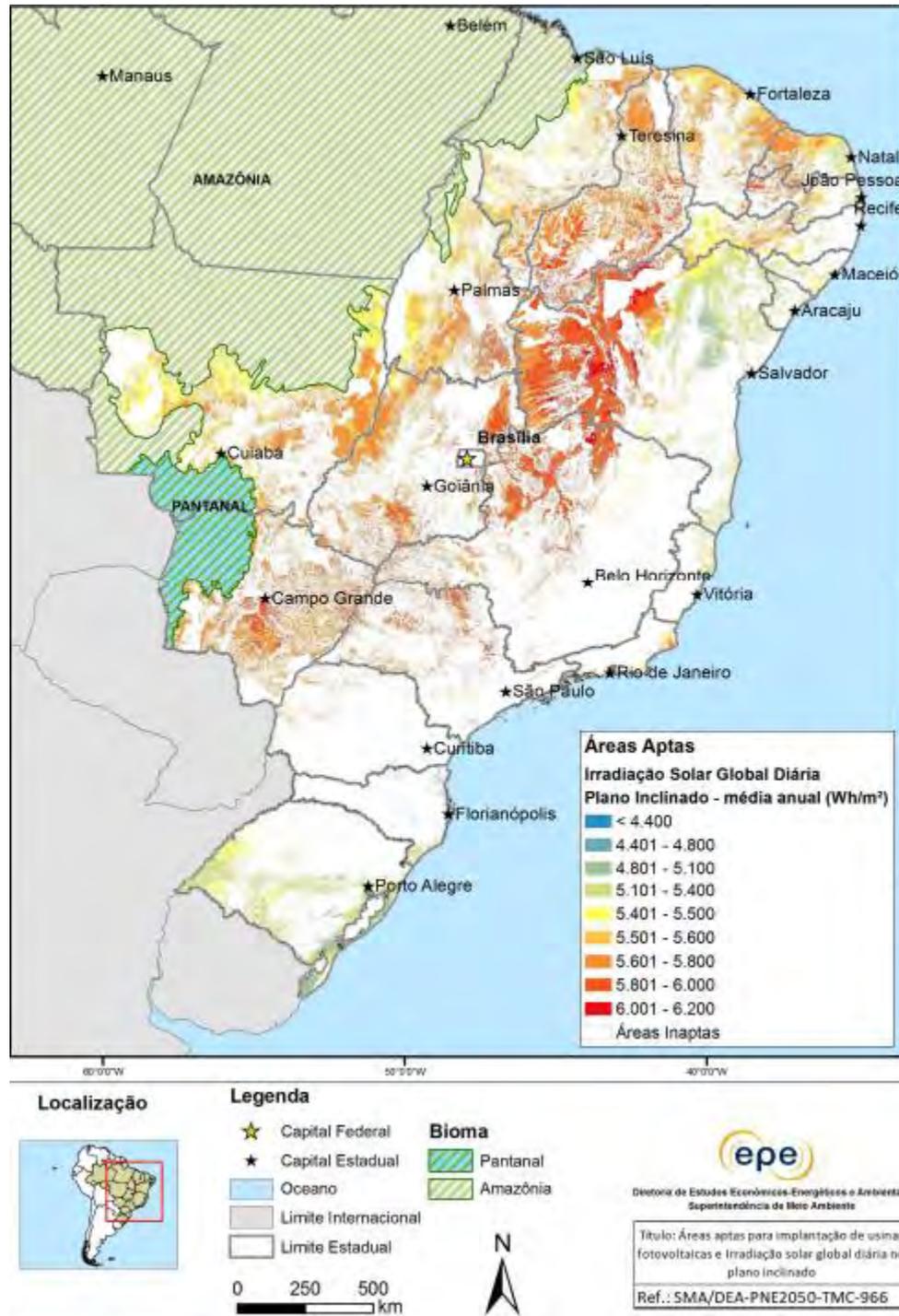


Figura 2: Áreas aptas para instalação de usinas fotovoltaicas; Fonte: [PNE 2050](#)

O segundo mapa ilustra o território brasileiro apto às instalações fotovoltaicas, excluindo as terras de vegetação nativa, preservação ambiental ou de povos indígenas e quilombolas. Apesar da redução visível comparada ao mapa anterior, a magnitude do território brasileiro garante terras suficientes para o sucesso da energia solar no país.

Com o crescimento significativo da energia solar no Brasil e no mundo, observa-se impacto direto no mercado de energia brasileiro, visto que o constante desenvolvimento da tecnologia fotovoltaica e as mudanças na estrutura das usinas solares afetam os preços dos equipamentos a serem importados e concomitantemente impactam os preços dos leilões de concessão para geração elétrica no país. Para analisar o impacto nos leilões nos últimos anos, com dados do CCEE (Câmara de Comercialização de Energia Elétrica), verificam-se os preços de venda atualizados dos leilões de concessão dos anos 2015, 2017, 2018, 2019 e 2021.



Gráfico 8: Preço Médio de Venda Leilões; Dados: Resultado Consolidado Setembro 2021

No gráfico apresentado observa-se queda significativa nos preços dos leilões de concessão de geração elétrica solar no Brasil nos cinco recentes anos observados. Esta redução reflete o movimento do mercado com a entrada de grandes competidores no setor, exemplificados nos gráficos 6 e 7 com a expansão notável da capacidade elétrica por geração fotovoltaica e o alto número de novas usinas solares em construção. Assim, o baixíssimo preço de R\$92,65/MWh evidenciado em 2019, anterior ao primeiro ano de pandemia de 2020, tem como principal causa a constante evolução tecnológica das placas fotovoltaicas nos últimos anos, que impulsionaram redução notável no preço do Watt-pico (Medida de potência energética das células fotovoltaicas) das placas solares. Dessa maneira, com o desenvolvimento das placas solares e a redução do preço dos equipamentos (módulos fotovoltaicos, inversores,..), os altos investimentos do setor

elétrico solar notados pelo alto CAPEX (investimento direto em capital) com a compra de placas fotovoltaicas também reduziram significativamente desde 2015. A título de comparação, seis anos atrás o custo de investimento na usina solar estava internacionalmente na média de US\$1,8/Wp, enquanto em 2019 a expectativa inicial era de US\$0,9/Wp, metade do observado em 2015. Esse efeito relevante de suavização do montante de investimento no setor foi reflexo do barateamento dos módulos fotovoltaicos e inversores. Os módulos em 2015 custavam US\$0,62/Wp, enquanto em 2017 o preço estava em US\$0,31/Wp, 50% mais barato.²

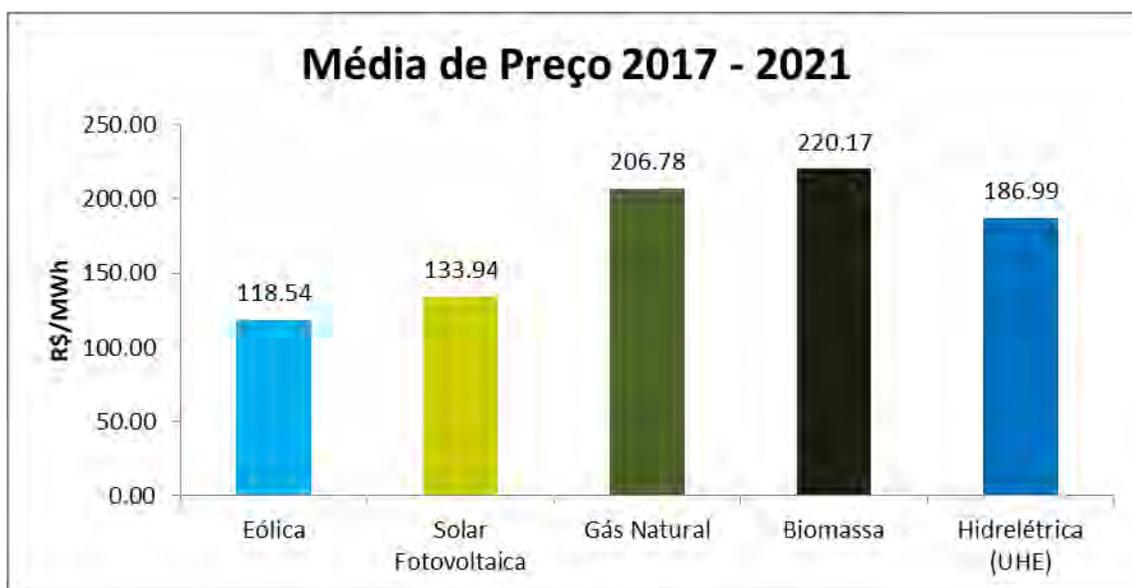


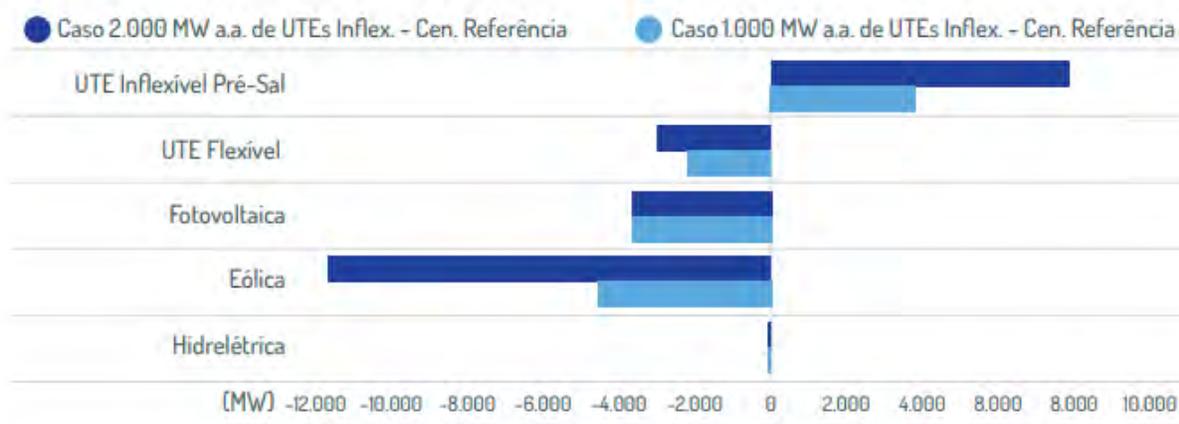
Gráfico 9: Preço Médio de Venda Leilões 2017-2021; Dados: Resultado Consolidado Setembro 2021

Ao comparar as diferentes fontes de energia elétrica nos preços de venda dos leilões de concessão, é visível a vantagem do MWh das energias solar e eólica. Para melhor exemplificação, utilizando a média de preço encontrada nos leilões de 2017 até 2021 (excluindo 2020), as usinas solares adquirem o MWh por R\$133.94, enquanto as usinas termelétricas (Gás Natural no gráfico 9) obtém o MWh por R\$206.78. Com isso, o custo de concessão de gerar 1 MWh nas usinas de gás natural correspondem a 1.5 MWh nas usinas fotovoltaicas. Considerando esta relação, a compra de direito de geração elétrica das termoelétricas é ineficiente ao comparar com a fonte renovável solar, já que retorna relação R\$/MWh superior.

²Benchmark 2015-2017: U.S. Solar Photovoltaic System Cost Benchmark: Q1 2017 / Artigo de Gabriel Konzen

Além disso, esta relação não considera ainda a possível precificação das emissões de gases de efeito estufa, processo que tomará parte dos mercados nas próximas décadas e impactará diretamente na concentração de termelétricas observadas no Brasil, sobretudo nos preços dos leilões apresentados. Com essa expectativa, é visível a perda de competitividade brasileira com a atual aposta nas termelétricas que se tornam cada vez mais ineficientes para o setor elétrico, dado o previsível e esperado aumento dos custos das fontes emissoras de gases poluentes e a não exploração das vantagens competitivas da fonte energética solar em extremo desenvolvimento tecnológico nos últimos anos.

Por fim, é importante assinalar que a nova portaria [459/2020](#) prevista pelo MME em 21 de dezembro de 2020, permite no Art 3º que “Não haverá exigência quanto ao limite de inflexibilidade Operativa Anual para fins de Habilitação Técnica dos empreendimentos”, ou seja, a operação das termelétricas de maneira irrestrita. Esta modificação é crucial no que tange a participação das fontes renováveis na geração elétrica e o compromisso de redução das emissões de gases do efeito estufa, visto a inserção de termelétricas inflexíveis no parque gerador brasileiro. Para maior visibilidade do impacto desta medida no setor elétrico brasileiro, o gráfico abaixo demonstra a expansão da das termelétricas inflexíveis no Brasil de 2027 até 2030 segundo o EPE de 2020 e o Boletim Leilão de Energia Elétrica do IEMA ([Instituto de Energia e Meio Ambiente, 2021](#)).



Fonte: Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisas Energéticas, 2020.

Gráfico 10: Impacto da inserção de termelétricas inflexíveis nas energias renováveis (2027-2030).

No gráfico, o crescimento das termelétricas inflexíveis impacta diretamente no progresso das energias renováveis solar, eólica e hídrica no parque gerador brasileiro. O crescimento de 8.000

MW (2.000 MW/ ano) da fonte poluente resulta na redução de até 18.000 MW da capacidade instalada no país, sendo esses: 12.000 MW da fonte eólica e 3.500 MW das usinas solares. Vale notar que a capacidade instalada das fontes renováveis citadas são no ano de 2020, respectivamente, de 17.131MW e 3.287 MW, reforçando o impacto devastador das termelétricas inflexíveis no crescimento das renováveis na próxima década.

Além disso, é evidente o impacto da operação irrestrita das termelétricas no meio ambiente, com a falta de controle e o crescente número de novas usinas licenciadas (51 em construção no relatório de maio de 2021, gráfico 6) espera-se que as emissões de gases de efeito estufa cresçam significativamente, contrariando a tendência do **Gráfico 4** de suavização da poluição do ar no setor elétrico brasileiro. Faz-se necessária a reversão do Art.3º da Portaria 459/2020 citada anteriormente, visto o efeito negativo nos compromissos socioambientais do país. A facilitação e o incentivo do investimento nas termelétricas são extremamente danosos ao parque gerador brasileiro, que se torna cada vez menos sustentável, ampliando o impacto da crise climática e se demonstra menos eficiente, visto a tendência do aumento dos preços de leilão da fonte energética carbonizada. Vale notar também a necessidade do posicionamento das empresas vencedoras dos leilões de concessão para geração elétrica, que ao se comprometerem com metas e políticas socioambientais tenham transparência no financiamento de fontes energéticas que não agravem a situação climática e ambiental do Brasil.

Com isso, as vantagens apresentadas pela energia solar no território brasileiro são unânimes, seja em disponibilidade de localização para instalação, variabilidade de geração elétrica durante o ano, custo para viabilização da usina elétrica e conduta socioambiental. Apesar desta soberania, em um ambiente de evolução tecnológica e redução de custos, propício para a total complementaridade das fontes renováveis na geração elétrica do país, a substituir totalmente o uso emergencial das termelétricas, presencia-se uma nova ata com a permissão da operação irrestrita da principal fonte energética emissora de gases do efeito estufa no parque gerador brasileiro. Tal planejamento do governo brasileiro, reforçado pelas cinquenta e uma novas usinas termelétricas em construção no país (**Gráfico 6**) reafirma, frente à atual crise climática e a possível precificação do carbono, o posicionamento pouco competitivo a ser tomado pelo Brasil no setor elétrico nas próximas décadas.

3.2 Energia Eólica

A geração elétrica pela fonte eólica teve como marco para seu início e crescimento as discussões sobre a crise climática e a necessidade da redução de emissões de gases estufa no Brasil e no mundo. Assim como a energia solar apresentada no capítulo 3.1, a fonte eólica é uma das que mais cresce em capacidade instalada de geração elétrica no mundo (apresentado no IRENA, 2020), representando no país o maior crescimento absoluto em capacidade instalada para geração elétrica no SIN.

Com o início das operações em 2009 através do Leilão de Energia de Reserva, a fonte eolielétrica passou a ser a terceira maior fonte geradora de eletricidade na matriz elétrica brasileira no ano de 2020, representando 9.2% de geração elétrica no ano de 2020 (**Gráfico 3**), superando a geração elétrica proveniente do gás natural. Esse notável crescimento dos parques eólicos *onshore* (no território continental) são resultado da alta disponibilidade do recurso renovável no país, sobretudo na região Nordeste. A evolução das análises a cerca do potencial eólico das regiões brasileiras e a alta competitividade do setor foram essenciais para a redução de preços dos leilões e para o sucesso da fonte energética renovável nos últimos 12 anos. Apesar desse crescimento rápido e representativo na matriz elétrica brasileira (de 1.7% em 2012 para 9.2% em 2020), o potencial dessa fonte renovável não foi amplamente explorado visto a concentração total dos parques eólicos em território continental, enquanto a implantação parques eólicos *offshore* (no território marítimo) significou aumento representativo da geração elétrica em outros países. Com isso, a existente possibilidade de crescimento da energia eólica *onshore* e da expansão expressiva da geração elétrica *offshore* com os ventos mais fortes são fatores promissores para o maior desenvolvimento desta fonte.

O potencial eólico brasileiro foi inicialmente estipulado no ano de 2001 através do “Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, 2001”, considerando apenas instalações de parques eólicos com altura de 50 metros dado a tecnologia disponível no início do século. Nesse primeiro estudo, seguindo premissas estipuladas e a velocidade média dos ventos de no mínimo 7 m/s (sete metros por segundo) nas regiões analisadas, estimou-se potencial disponível de capacidade instalada *onshore* no Brasil de 143 GW. Com a evolução da tecnologia e a maior implementação de parques eólicos no país, em 2013 foram realizadas novas simulações no “Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, 2013”, resultando em análise da ABEEólica (Associação Brasileira de Energia

Eólica) que estimou em 2017 potencial de mais de 500GW em território continental brasileiro, visto a inserção de parques eólicos com alturas de 30, 50,80, 100, 120, 150 e 200 metros nas simulações. Com isso, o número defasado de 2001 de potenciais 143 GW é extremamente relevante ao constituir 84% do parque gerador instalado por todas as fontes elétricas no país em 2020. Assim, ao analisar os potenciais 500GW referentes às estimativas de 2013, nota-se quase o triplo da capacidade instalada no Brasil no início de 2021. Além disso, a partir de estudo do EPE em abril de 2020, **“Eólica Offshore”**, sobre o potencial de geração elétrica pela fonte eólica em território marítimo até 30km da costa brasileira, estimou-se potencial técnico de cerca de 700GW, superando a estimativa observada nos parques eólicos em terra (500GW).

Desse jeito, evidencia-se a alta disponibilidade dos recursos eólicos e o alto potencial da fonte geradora no Brasil em 2021, justificando os altos investimentos na última década e a tendência de crescimento nos próximos anos com a evolução tecnológica e a intensificação no combate à crise climática. Caso não ocorra a limitação de crescimento das fontes renováveis eólica e solar até o ano de 2050, o “PNE 2050” (Plano Nacional de Energia) estipula capacidade instalada de até 195GW dos parques eólicos brasileiros, representando cerca de 33% de toda a capacidade instalada. Caso haja o comprometimento com o crescimento das renováveis variáveis e a limitação do crescimento das hidroelétricas, espera-se que a capacidade instalada seja superada e atinja até 246GW (42% do total). Assim, através dessas simulações, nota-se a importância da energia eólica no futuro do parque gerador brasileiro.

A respeito da alta disponibilidade de recurso viável para geração elétrica no Brasil, é importante analisar a eficiência da geração elétrica oriunda do vento. Assim, vale notar que o fator de capacidade, que representa a proporção de geração efetiva da usina dado a capacidade total em um determinado período de tempo, teve valor médio de 40.6% no ano de 2020 e 42.7% em 2019, como apontado no “Boletim Anual de Geração Eólica” da ABEEólica. O atingimento anual observado é extremamente relevante dado o parque eólico brasileiro completamente *onshore* e o valor ser significativamente superior a média mundial, que variou de 25% a 34% nos anos de 2018 e 2019. Além disso, nota-se o mês de setembro que atingiu a máxima de 59% e as médias diárias que excederam os 80% no fator de capacidade dos parques eólicos brasileiros. Abaixo, verifica-se o fator de capacidade por mês no ano de 2020:

Fator de Capacidade - 2020



Gráfico 11: Fator de Capacidade 2020 das Usinas Eólicas; fonte: “[Boletim Anual de Geração Eólica](#)”

No gráfico acima, percebe-se certa sazonalidade na geração elétrica eólica, explicada pela variação de intensidade das correntes de ar, notando valores relativamente inferiores a média mundial nos primeiros quatro meses do ano de 2020. Apesar desta menor eficiência no início do ano, é esperada a redução desse efeito com a evolução do setor, visto a projeção de aumento significativo do fator de capacidade das usinas eólicas no mundo, como identifica o relatório “[FUTURE OF WIND](#)” do IRENA em 2019. Dentre as projeções observadas, estima-se que o fator de capacidade em 2030 para os parques eólicos *onshore* obtenham valores de 30% a 55%, como resultado da constante evolução das turbinas eólicas e da implementação de maiores lâminas. De maneira semelhante, os parques *offshore* (marítimos) apresentarão fatores de capacidade de 36% a 58% em 2030. Este crescimento no continente e no território marítimo são significantes, visto as médias de 2019 de 34% na terra e 43% no mar. Com isso, é notável que o cenário positivo de 2020 de eficiência dos parques eólicos brasileiros tenda a melhorar com a evolução das turbinas e a possível expansão para a geração elétrica no território *offshore*.

A seguir, com o visível crescimento e as promissoras projeções das eolioelétricas no mercado de energia, torna-se importante a análise dos preços dos Leilões de concessão de geração elétrica no Brasil nos últimos anos. Deve-se considerar o impacto da constante evolução tecnológica no setor e a alta competitividade como fatores de suma importância nos preços do MWh nesses leilões. Abaixo podemos identificar a variação do preço MWh nos últimos quatro anos (2017-2021, excluindo 2020) a partir dos leilões de concessão de geração elétrica renovável.



Gráfico 12: Preço Médio de Venda Leilões; Dados: Resultado Consolidado Setembro 2021

Observa-se no gráfico a variação do preço do MWh em torno da média de R\$118.54, que representa o MWh mais barato de todas as fontes energéticas nos leilões dos últimos 5 anos, como apresentado no **Gráfico 9**. O preço constante e inferior às outras fontes energéticas é reflexo da constante evolução tecnológica das turbinas eólicas (que aumentam sua eficiência energética), e da alta competitividade na busca de concessão de geração elétrica eólica, dado a consolidação das eolioelétricas no parque gerador brasileiro. Além disso, a alta eficiência da geração elétrica pela força dos ventos apresentada no **Gráfico 11** são pontos que mantêm a superioridade desta fonte energética em comparação a solar, justificando os menores preços dos leilões. Desse jeito, para título de comparação, obtém-se a partir dos leilões de concessão de geração elétrica o MWh por R\$ 118.54 nas usinas eólicas, enquanto nas termelétricas (notavelmente o gás natural no **Gráfico 9**) adquire-se por R\$ 206.78. Logo, a geração de 1 MWh nas termelétricas custa na concessão de geração elétrica aproximadamente 1.7 MWh, evidenciando a vantagem comparativa dos leilões de concessão para a fonte renovável eólica, que apresenta relação R\$/MWh estritamente superior às usinas emissoras de gases poluentes.

Apesar da vantagem nos preços, a potência comprada nos leilões (MW total) expõe nos últimos cinco anos a superioridade do gás natural nos leilões de concessão de geração elétrica. Esta relação pode ser observada no gráfico abaixo.

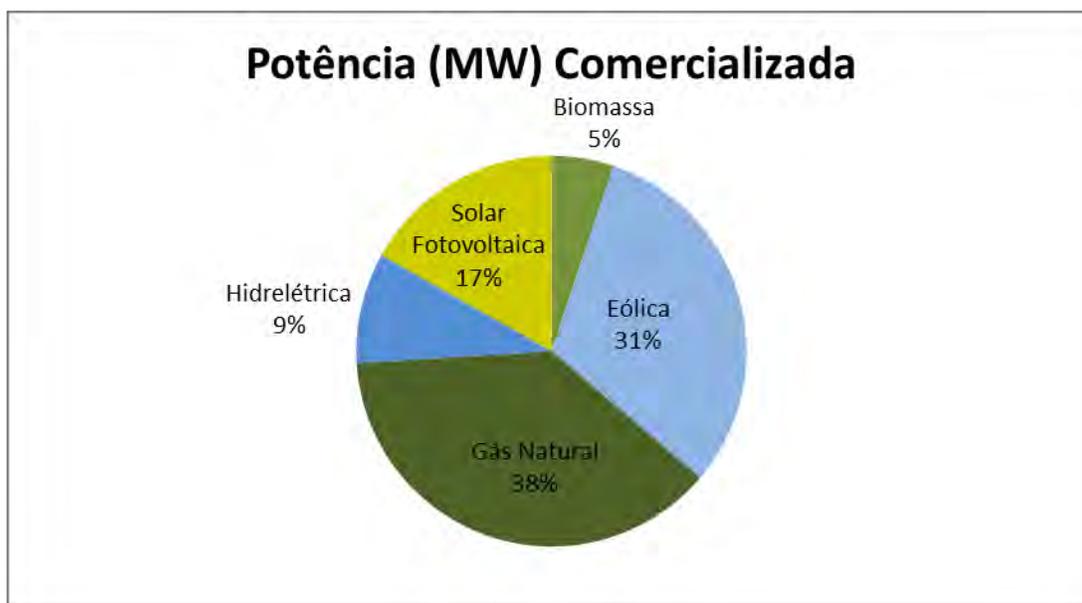


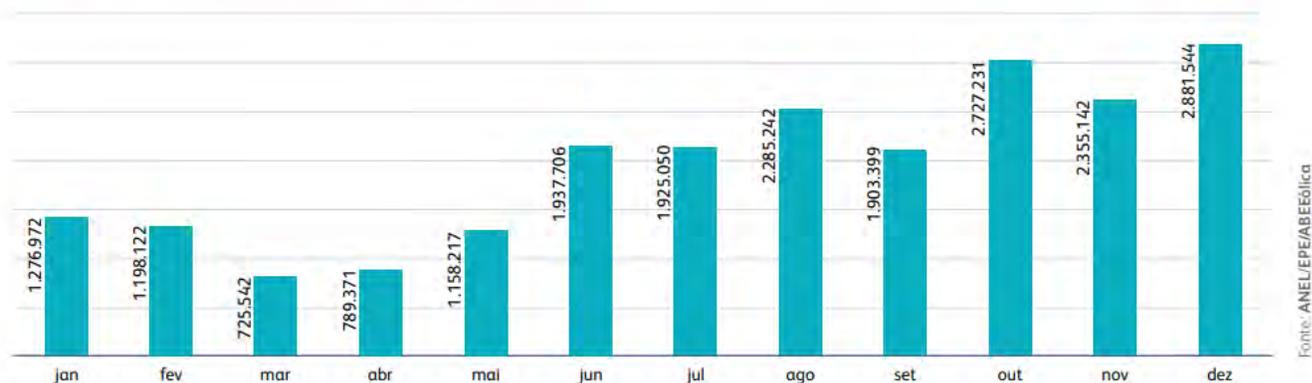
Gráfico 13: Potência Comercializada 2017-2021; Dados: Resultado Consolidado Setembro 2021

Ao analisar a distribuição de vendas do MW entre as fontes energéticas nos últimos cinco anos, nota-se a dominância do gás natural nos leilões identificados até setembro de 2021. Essa relevância e superioridade comparada às energias renováveis pode ser explicada pela composição dos leilões aprovados para venda de concessão de geração elétrica no período observado. Os doze leilões aprovados e efetuados dividem-se em dois grupos: LEE (Leilões de Energia Existentes) e LEN (Leilões de Energia Nova), denotando objetivos divergentes para a constituição da matriz elétrica brasileira em crescimento. Enquanto os LEN's se destinam a novos empreendimentos de geração elétrica que formarão a base da expansão do parque gerador do país, os LEE's destinam-se à recomposição de contratos de leilões de energia nova realizados nas décadas anteriores. Com isso, os LEE's observados desde o ano de 2017 destinam-se majoritariamente a contratos de fontes termelétricas, visto que reiteram os leilões que ocorreram na primeira década do século XXI e não constituíam projetos de fontes renováveis. Dado essa seletividade, a fonte de gás natural através dos LEE's soma 2088 MW (dois mil e oitenta e oito) de potência comercializada, cerca de 40% do total comercializado observado no **Gráfico 13**. Assim, caso fossem considerados apenas os leilões de ampla concorrência, a energia eólica representaria 36% de toda potência comercializada nos últimos cinco anos, enquanto o gás natural constituiria 27%, logo a frente da energia solar com 20%.

Com essa comparação e observação sobre a exclusividade das termelétricas nos leilões, nota-se a importância de reversão do panorama de aprovação dessa seletividade na concessão de geração elétrica no Brasil. Considerando a nova portaria [459/2020](#) prevista pelo MME em 21 de dezembro de 2020 (mencionada no capítulo 3.1), projeta-se um futuro de retrocesso para o país com a predominância das termelétricas (gás natural) nos leilões brasileiros. Este crescimento da maior fonte elétrica contribuinte para a emissão de gases do efeito estufa no país é extremamente prejudicial no combate à crise climática, visto o crescimento direto das emissões de GEE e indireto com a inibição do crescimento das fontes renováveis eólica e solar no parque gerador brasileiro, como apresentado no **Gráfico 10** Com isso, é prevista relevante perda de competitividade do Brasil no mercado global de emissões de GEE, tendo em observação a provável precificação das emissões ou a implementação do sistema de créditos de carbono no país e no mundo.

Considerando a perda de competitividade brasileira com a menor concentração dos investimentos e emendas políticas voltadas ao crescimento da geração elétrica limpa no país, é imprescindível notar o impacto atual da energia eólica nas emissões de GEE (gases do efeito estufa) no Brasil. No gráfico abaixo notamos a redução de emissões de CO₂ (gás carbônico) na atmosfera dada a geração elétrica através das eolielétricas.

Emissões de CO₂ evitadas por mês (Toneladas)



Toneladas de CO₂ evitadas em 2020: 21,2 milhões de toneladas

Fonte: ANEEL/EPE/ABEEólica

Gráfico 14: Emissões de CO₂ evitadas por mês; fonte: “Boletim Anual de Geração Eólica”

No ano de 2020, foram evitadas 21,2 milhões de toneladas de gás carbônico na atmosfera brasileira, cerca de 43% de toda a emissão de gás de efeito estufa no setor elétrico brasileiro no ano observado (**Gráfico 4**). Caso a previsão do impacto das termelétricas inflexíveis seja concretizado, espera-se que toda a redução da emissão de CO₂ apresentada no gráfico acima constitua nas próximas décadas acréscimo significativo na poluição da atmosfera. Considerando o estudo do IEMA apresentado no **Gráfico 10**, a concretização de uma redução de 12.000 MW na capacidade instalada das usinas eólicas representa 70% do quadro das emissões evitadas na geração elétrica de 2020, notando o impacto indireto negativo das termelétricas inflexíveis no plano socioambiental de combate à crise climática. Com isso, o estudo prevê aumento de 25% das emissões totais de CO₂ no setor elétrico brasileiro até 2030.

Logo, novamente as medidas e posicionamentos do governo brasileiro indicam plano de sustentação do setor elétrico baseado na fonte energética mais custosa e sem compromisso com a redução das emissões de GEE. Vale notar que o efeito negativo do protagonismo das termelétricas não é totalmente amparado, visto que além do impacto climático, o aumento do custo no total de investimento observado nos planos decenais (custo de instalação e operação) não consideram o impacto futuro da precificação das emissões de gases do efeito estufa, como identifica o estudo do IEMA.

Por fim, nota-se a consolidada posição da energia eólica no setor elétrico brasileiro no ano de 2021, e a promissora projeção de crescimento da fonte, amparada pela disponibilidade de crescimento territorial e as recorrentes evoluções tecnológicas que sustentam a maior eficiência da geração elétrica e maior viabilidade financeira. Apesar desses indícios e da firme posição alcançada pelas eolioelétricas no parque gerador brasileiro no decorrer da primeira e segunda década do século XXI, o favorecimento conservador das termelétricas via leilões “exclusivos” e portarias que permitem amplo funcionamento dessas usinas tornam o cenário brasileiro cada vez menos competitivo. Assim, novamente o planejamento brasileiro quanto a geração elétrica vende o longo prazo em troca do imediatismo, favorecendo a implementação de termelétricas para compensação da falta de planejamento das décadas anteriores para a formação de uma matriz elétrica totalmente renovável. As escolhas apresentadas por todo o estudo apontam para o direcionamento de crescimento das emissões de gases do efeito estufa e de cada vez menos amparo renovável no setor elétrico brasileiro.

4. Conclusão

Considerando a situação apresentada no estudo, o combate à crise climática no setor elétrico através da redução das emissões de GEE se porta como improvável ao observarmos a concentração de investimentos na geração elétrica através das termelétricas. Como observado no **Gráfico 6**, o número de empreendimentos em construção de termelétricas em setembro de 2021 é o segundo maior, atrás apenas das eólicas. Além disso, como observado no **Capítulo 3.2**, apesar dos maiores preços, a potência (MW) vendida nos leilões de concessão de geração elétrica são na maior parcela (38%) designados às termelétricas, justificado principalmente pela repetitiva execução de LEE's (Leilões de Energia Existente), designados quase exclusivamente para a concessão da geração termelétrica por gás natural. Para reiterar a posição favorável e próspera das termelétricas movidas à gás natural no país, identifica a quarta maior fonte elétrica do país em capacidade instalada, apresentando crescimento inesperado de 12% no ano de 2020. Esse posicionamento do setor elétrico brasileiro indica que o planejamento dos próximos anos não condiz com uma transição para um parque gerador de energia totalmente renovável ou para a redução das emissões de gás carbônico na geração elétrica.

Além dos claros aspectos de uma falta de planejamento para eliminação ou redução das emissões de gases de efeito estufa nas próximas décadas, a recente mudança na operação das termelétricas no Brasil através da Portaria 459/2020 prevista pelo MME precede impacto direto e significativo nas emissões e na futura distribuição das fontes no parque gerador brasileiro. Com o fim dos limites de inflexibilidade das termelétricas, é esperado que as emissões de gás carbônico aumentem cerca de 25% (em relação aos dados de 2019) até 2030 com a manutenção desta portaria. Além do impacto direto nas emissões, torna-se importante evidenciar o efeito negativo nas energias flexíveis eólica e solar, que terão seu crescimento esperado limitado pela concentração da ação das termelétricas inflexíveis na próxima década. Logo, é possível que haja retrocesso no crescimento atual das fontes renováveis, o que será crucial no planejamento de longo prazo do setor elétrico brasileiro, visto que ao apostar nas fontes emissoras de gases poluentes, o país não considera os compromissos socioambientais a serem atingidos com a maior participação das fontes renováveis de geração elétrica e não internaliza as vantagens a serem obtidas no futuro mercado mundial de carbono.

Sem considerar os impactos ambientais sustentados pela insistência da geração elétrica através das termelétricas, a média dos preços dos leilões de concessão de geração elétrica tornam a vantagem das fontes solar e eólica evidentes, visto a menor variabilidade e média nos preços do MWh comercializados. Como apontado no **Capítulo 3**, a fonte poluente nos últimos cinco anos teve o segundo MWh mais caro, em média por R\$ 206.78, enquanto as usinas eólicas e fotovoltaicas apresentaram os preços médios mais baratos, respectivamente de R\$ 118.54 e R\$ 133.94 o MWh. Esta discrepância na relação MWh e preço entre as renováveis e poluentes tende a aumentar significativamente nos próximos anos, observado pelas constantes evoluções tecnológicas na geração elétrica das fontes solares e eólicas, pela alta competitividade observada nos leilões de Energia Nova e pela futura precificação das fontes de carbono. Desse jeito, no Brasil a existente vantagem da energia limpa nos custos direciona aos prejuízos a serem tomados nas próximas décadas pelo favorecimento das termelétricas, pautado apenas no impacto de curto prazo desta fonte energética. Com isso, sem claro planejamento de descarbonização para as próximas décadas, o país toma postura ineficiente quanto ao seu grande potencial de geração elétrica limpa, como destacado nos capítulos de energia eólica e solar.

Apesar da projeção de retrocesso com o aumento das emissões de gás carbônico, contrariando o caminho observado desde 2012 (**Gráfico 4**) de redução de 5% na emissão anual de GEE até 2020, a consolidação das fontes renováveis no parque gerador brasileiro sustentam a possibilidade do crescimento da energia limpa no Brasil e a manutenção da descarbonização do setor. Com o posicionamento do governo contra o favorecimento das termelétricas (Gás Natural) nas próximas décadas, e com o planejamento de redução gradual da atuação das usinas movidas a GN do setor elétrico, espera-se que haja maior controle sobre o desafio da variabilidade nas fontes renováveis, observada com clareza nas crises hídricas e nos fatores de capacidade da energia eólica e solar. Com a evolução tecnológica das usinas renováveis, advinda do desenvolvimento do mercado de baterias, espera-se que a cada ano o fator de capacidade aumente na geração elétrica, limitando a cada inovação a variabilidade das fontes limpas, que será desafio de todos os países na transição da matriz elétrica e energética.

Além da posição consolidada da energia eólica no Brasil e os grandes investimentos nas usinas fotovoltaicas, não foi testemunhada a exploração de todo o potencial de geração elétrica limpa do território brasileiro. Como apresentado nos **Capítulos 3.1 e 3.2**, a capacidade de geração

elétrica no país através das fontes eólicas e solar são enormes, seja pela grande extensão territorial apta à incidência solar mínima ou pelas correntes de ar que atingem velocidade mínima de 7 m/s (sete metros por segundo) para instalação dessas usinas. Com início recente de crescimento na matriz elétrica brasileira, as usinas fotovoltaicas tem enorme potencial, visto sua evolução tecnológica recorrente no mercado mundial, impactando na redução constante dos preços das placas solares e aumentando a capacidade de geração elétrica dessa promissora fonte de energia. Em contraposição, as usinas eolioelétricas que denotam posição consolidada no parque gerador brasileiro também são extremamente promissoras no país, sobretudo pela alta disponibilidade de áreas para instalação das usinas e pela constante otimização da tecnologia existente, com a instalação de torres cada vez mais altas e hélices com maior área de atuação. Ademais, a energia eólica possui potencial único de expansão, podendo ocupar o território marítimo brasileiro, onde se destacam taxas significativamente maiores de eficiência na geração elétrica e custos menores na construção das usinas, tendo como desafio principal a logística necessária para instalação e manutenção no *offshore*. Vale notar que o desenvolvimento das zonas portuárias e do sistema de logística apropriado para o funcionamento de um parque gerador *offshore* é necessário e de grande potencial para o panorama do setor elétrico brasileiro frente a precificação do carbono. Como apontado no **Capítulo 3.2**, a estimativa de potencial técnico a ser explorado para geração elétrica nos parques eólicos marítimos atinge 700GW, valor significativo ao compararmos com toda a capacidade instalada no país de aproximadamente 174GW em 2020.

O Brasil em 2020 apresentou 84.8% de sua matriz elétrica oriunda de fonte renovável, com aproximadamente 64% das usinas hidrelétricas, evidenciando os períodos de crise na geração elétrica pela variabilidade de sua principal fonte geradora. Devido a esse cenário, fortaleceu à composição do parque gerador brasileiro a atuação das termelétricas, tendo como protagonistas na emissão de GEE o carvão mineral e o gás natural, observáveis no **Gráfico 5**. Tendo em vista o objetivo de descarbonização e o desafio da variabilidade das fontes renováveis no curto prazo, é inegociável frente aos efeitos climáticos a erradicação da participação do carvão na matriz elétrica brasileira. Apesar da participação pequena de 2% na geração elétrica em 2020, compôs aproximadamente 34% das emissões de CO₂ do setor no mesmo período, expondo sua ineficácia perante o contexto de crise climática e a necessidade da redução imediata nas emissões de GEE.

Por fim, para a progressão do setor elétrico brasileiro, visando a instauração de um planejamento claro de transição para uma matriz elétrica totalmente renovável, denotam-se de suma importância, a inutilização do carvão mineral como fonte de geração elétrica, a proporcionar efeito significativo na redução das emissões de gás carbônico (10 Mt de CO₂ em 2020), corroborando com a descarbonização do setor. Para além do carvão, é necessária a limitação de atuação das termelétricas inflexíveis de GN, que projetam cenário desastroso para o parque gerador brasileiro, ao inibirem o crescimento das fontes renováveis e ao aumentarem as emissões de GEE em até 25% no ano de 2030 (comparativo a 2019). Para complemento do controle dessas usinas, deve-se reduzir a quantidade de Leilões de Energia Existente designados apenas às fontes poluentes, a concentrar a concessão de geração elétrica através dos Leilões de Energia Nova, que expõem a energia eólica como principal fonte de potência comercializada, enquanto o GN rivaliza com as usinas fotovoltaicas. Visando o crescimento da matriz elétrica renovável no país, é importante a regularização da implantação de parques eólicos em território marítimo, respaldado pelo alto potencial de geração elétrica a ser explorado no *offshore*.

Com isso, caso ocorra a transição do setor elétrico brasileiro para uma composição totalmente limpa nas próximas décadas, o Brasil pode se tornar pioneiro no processo de descarbonização do subsetor de energia. Este posicionamento capacitado pelas vantagens geográficas de alto potencial de geração elétrica renovável pode tornar o país em exemplo no combate à crise climática, assim como evitar prejuízos atribuídos a futuras políticas mundiais de redução de danos, visando o aumento de temperatura global em apenas 2°C, através da precificação do carbono ou a estipulação de metas na redução de emissões de GEE por setor. Vale notar que o último encontro mundial referente ao clima e meio ambiente, sediado em [Glasgow na COP 26](#), teve como resultado a proposta insuficiente de “redução” da utilização do carvão no mundo, assim como maior comprometimento na redução dos GEE (principalmente o metano) até 2030. Apesar da finalização ineficaz na amenização direta do aquecimento global, fica evidente o desenvolvimento de uma postura intolerante à utilização de combustíveis fósseis, sustentado pela proposta inicial de “eliminação” da utilização do carvão. Desse jeito, é notória a relevância de um planejamento do setor elétrico brasileiro sem a sustentação por fontes energéticas poluentes, a garantir posicionamento vantajoso do país nas subseqüentes limitações e precificações da utilização dos combustíveis fósseis.

5. Metodologia

Para o desenvolvimento do estudo e a definição de conclusões, será necessário estabelecer uma série de análises quantitativas e qualitativas sobre tópicos da crise climática mundial e do setor elétrico brasileiro. Com isso, para maior entendimento do tema e conhecimento do subsetor de energia, será apresentada e demonstrada a evolução da matriz elétrica brasileira nos últimos anos.

Com a apresentação da crise climática e a inevitabilidade da transição para o baixo carbono, a análise das emissões de gás carbônico no setor elétrico brasileiro proporcionará a realização do estado que o Brasil direciona, evidenciando a necessidade da substituição de fontes sustentadas pelos combustíveis fósseis pelas renováveis.

Para que aconteça a substituição da participação das termelétricas pelas usinas eólicas e solares na geração de energia do Brasil, será necessária a demonstração da evolução das fontes renováveis no país, com o intuito de fortalecer o crescimento já observado dessas matrizes elétricas. Além disso, é relevante apresentar o potencial de expansão das fontes limpas e sua capacidade de geração de eletricidade no território nacional, para a possível total sustentação elétrica brasileira.

Por fim, para considerar a possibilidade da maior implementação das fontes renováveis, deve-se analisar os custos imbutidos na licitação para geração elétrica, servindo de comparação com as fontes emissoras de GEE, e de conclusão para a viabilidade financeira de um planejamento de transição para uma matriz elétrica totalmente renovável.

6. Dados

Para a realização do estudo serão necessárias bases do setor elétrico brasileiro, envolvendo capacidade elétrica, custo das diferentes matrizes elétricas, sendo essas:

- Emissões de gases de efeito estufa (principalmente gás carbônico) pelo setor elétrico brasileiro na última década por fonte energética, com o intuito de observar a progressão das emissões no período escolhido, disponível no [Site](#) em formato .csv do EPE (Empresa de Pesquisa Energética).
- Série histórica da quantidade de potência (MW) de usinas termelétricas no Brasil, disponível pelo [Site](#) da EPE (Empresa de Pesquisa Energética) em formato .csv. O objetivo é observar a potência das usinas termelétricas como parâmetro para viabilidade de serem substituídas pelas fontes renováveis.
- Evolução histórica anual da potência (MW) instalada no Brasil, disponível no [Site](#) da EPE (Empresa de Pesquisa Energética) em formato .xlsx, demonstrando a necessidade de crescimento do setor elétrico a cada ano.
- Histórico do volume de energia elétrica (GWh) produzida no Brasil, classificada por fontes renováveis ou não, disponível no [Site](#) da EPE em formato .xlsx, para estabelecer a atual relação de distribuição das matrizes elétricas no país.
- Número de Empreendimentos em construção no [Site](#) do EPE (Empresa de Pesquisa em Energia). Base de dados disponível em .xlsx, indicando o investimento direcionado no parque gerador brasileiro no ano de 2020/2021.

- Preço de Venda atualizado em setembro de 2021 dos Leilões de concessão de geração elétrica no Brasil desde 2004. Essa informação foi extraída das bases consolidadas de resultado dos Leilões no relatório de Setembro de 2021, disponível no [Site](#) do CCEE em formato xlsx.
- Potência comercializada (MW) dos Leilões de concessão de geração elétrica por fonte energética no Brasil desde 2004. Essa informação foi extraída das bases consolidadas de resultado dos Leilões no relatório de Setembro de 2021, disponível no [Site](#) do CCEE em formato xlsx.

7. Referências

Balanco Energético Nacional 2021. MME/EPE (Ministério de Minas e Energia / Empresa de Pesquisa Energética)

PNE 2050 PLANO NACIONAL DE ENERGIA, Ministério de Minas e Energia, capítulo “Energia Solar”.

“Energia Renovável”, MAURICIO T. TOLMASQUIM,EPE.

U.S. Solar Photovoltaic System Cost Benchmark: Q1 2017, Solar System Cost Benchmark.

“Renewable Capacity Highlights”, IRENA, 31 March 2020.

“Impacts of 1.5°C global warming on natural and human systems”, IPCC (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas).

“Cut Global Emissions by 7.6 Percent Every Year for Next Decade to Meet 1.5°C Paris Target - UN Report”, UNFCC (Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima).

“Global Greenhouse Gas Emissions Data” , EPA (Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos).

“Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, 2001”, CRESESB.

“Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, 2013”, ELETROBRAS, CEPEL (Centro de Pesquisas de Energia Elétrica).

Roadmap, EÓLICA OFFSHORE, EPE (Empresa de Pesquisa Energética).

Boletim Anual de Geração Eólica 2020, ABEEólica (Associação Brasileira de Energia Eólica).

“Boletim Anual de Geração Eólica” , ABEEólica (Associação Brasileira de Energia Eólica).

“FUTURE OF WIND,2019”, IRENA, Outubro 2019.

Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2021., Empresa de Pesquisa Energética (EPE).

Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2020., Empresa de Pesquisa Energética (EPE).

Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2019., Empresa de Pesquisa Energética (EPE).

Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2018., Empresa de Pesquisa Energética (EPE).

Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2017., Empresa de Pesquisa Energética (EPE).

Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2016., Empresa de Pesquisa Energética (EPE).

Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2015., Empresa de Pesquisa Energética (EPE).

Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2014., Empresa de Pesquisa Energética (EPE).

Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2013., Empresa de Pesquisa Energética (EPE).

Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2012., Empresa de Pesquisa Energética (EPE).