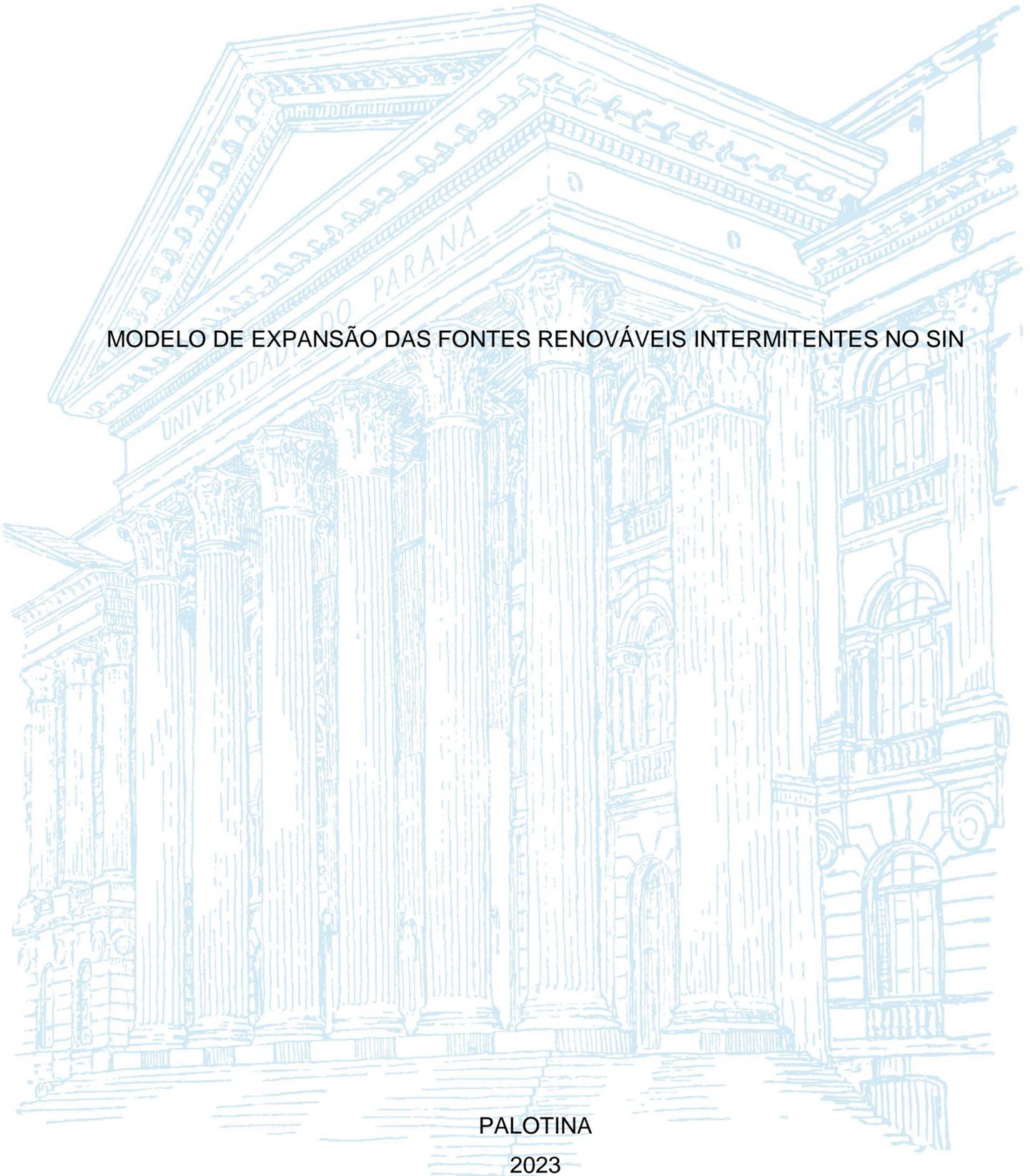


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

VILMAR PEDRO DOS ANJOS

MODELO DE EXPANSÃO DAS FONTES RENOVÁVEIS INTERMITENTES NO SIN



PALOTINA

2023

VILMAR PEDRO DOS ANJOS

MODELO DE EXPANSÃO DAS FONTES RENOVÁVEIS INTERMITENTES NO SIN

TCC apresentada ao curso de Graduação em Engenharia de Energia, Setor Palotina, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Wilson de Aguiar Beninca

PALOTINA

2023



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

## ATA DE REUNIÃO

Aos vinte e oito dias do mês de junho do ano de 2023, no horário às 09h00min , na plataforma virtual Google Meet, link <https://meet.google.com/pjm-zrvh-qzz>, compareceram para defesa pública do Trabalho de Conclusão de Curso, requisito obrigatório para a obtenção do título de Engenheiro de Energia o aluno Vilmar Pedro dos Anjos, tendo como Título do Trabalho de Conclusão de Curso "Modelo de expansão das fontes renováveis intermitentes no SIN". Constituíram a Banca Examinadora os professores: Prof. Dr. Carlos Henrique Coimbra Araújo , Prof. Dr. Maurício Romani e Prof. Dr. Wilson de Aguiar Beninca (Orientador e Presidente da Banca). O orientador e Presidente da Banca concedeu a palavra ao discente, para exposição do seu trabalho. A seguir, foi concedida a palavra em ordem sucessiva aos membros da Banca de Exame, os quais passaram a arguir a discente. Ultimada a defesa, que se desenvolveu nos termos normativos, a Banca de Exame, em sessão secreta, passou aos trabalhos de julgamento, tendo atribuído ao discente as seguintes notas: **Prof. Dr. Carlos Henrique Coimbra Araújo, nota: 90 (oitenta)**, **Prof. Dr. Maurício Romani, nota: 90 (oitenta)** e **Prof. Dr. Wilson de Aguiar Beninca, nota: 90 (oitenta)**. A nota final do discente, após a média aritmética dos três membros da banca de exame, foi **90 (oitenta)** considerando o discente **APROVADO**. As considerações e sugestões feitas pela Banca de Exame deverão ser atendidas pelo discente sob acompanhamento de seu orientador. Nada mais havendo a tratar foi lavrada a presente ata, que, lida e aprovada, vai por todos assinada eletronicamente.



Documento assinado eletronicamente por **CARLOS HENRIQUE COIMBRA ARAUJO, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 30/06/2023, às 17:58, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **WILSON DE AGUIAR BENINCA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 07/07/2023, às 18:00, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **MAURICIO ROMANI, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 27/07/2023, às 16:37, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



A autenticidade do documento pode ser conferida [aqui](#) informando o código verificador **5418987** e o código CRC **79DF7922**.

## **AGRADECIMENTOS**

Nesse momento, gostaria de agradecer a todos os colegas e professores que de alguma forma me auxiliaram a chegar aqui. Passamos por uma pandemia, ensino remoto, semestres curtos e diversas mudanças. Durante todo esse tempo o que mais esteve em meus pensamentos foram os questionamentos e dúvidas sobre finalizar ou não esse curso. Mas durante o caminho encontramos forças para finalizar nossos projetos.

Venho aqui então agradecer ao professor Coimbra, o qual foi meu primeiro orientador de Iniciação Científica, quando eu ainda estava engatinhando no mundo da Cosmologia. De longe, foi o período que mais me desenvolvi intelectualmente e mais me desafiei, tive uma oportunidade de poucos e até hoje sou grato por isso. Quero agradecer também a pessoa que abriu as portas para minha experiência no mundo corporativo, Jadson Siqueira, o qual foi meu mentor nos últimos dois anos e me fez decolar no mundo de marketing, dados e tecnologia. Enquanto eu queria largar a faculdade para focar no meu trabalho, ele foi a pessoa que insistiu para que finalizasse, me disponibilizando horário flexível, home office e me ajudando no dia a dia da empresa.

Nesse meu segundo módulo de UFPR (pós-pandemia) tive a oportunidade de conhecer melhor meu segundo e atual orientador, professor Beninca. Enquanto várias pessoas entendem com maus olhos engenheiros que seguem carreira em áreas profissionais transversais, Beninca foi o primeiro professor que viu potencial e admirou meu trabalho, agradeço pelo tempo e aprendizado cultivado nessa caminhada. Ao meu colega Lucas Silva, meu agradecimento pelo companheirismo e ajuda nesse período, que nossos futuros negócios deslanchem e gerem ótimos frutos. Quero também agradecer à minha namorada Estefany, que esteve ao meu lado durante esse último período de estudo.

Por fim, quero agradecer especialmente à minha mãe que por muito tempo forneceu o seu máximo para que eu pudesse me dedicar aos meus estudos. Se eu pude chegar aonde cheguei devo tudo a ela, agradeço por sempre me apoiar e guiar nas escolhas que sigo, hoje eu dou muito valor por todas as horas de estudo que tive quando era pequeno e vejo o como isso me ajudou no meu desenvolvimento.

## RESUMO

Neste trabalho foi abordado o impacto da expansão das fontes renováveis intermitentes (solar e eólica) e como as mesmas podem expandir dentro da matriz elétrica de um país mantendo o suprimento de eletricidade. Para isso, foi analisado o cenário alemão e o Energiewende, políticas de implementação de fontes renováveis com metas arrojadas para o cenário alemão dentro dos próximos anos. Disposto desses dados foi analisado informações de geração e potência das matrizes elétrica brasileira e alemã, analisando informações como fator de capacidade e porcentagem de representação de fonte no total de geração, compreendendo melhor a realidade de cada país e, posteriormente, modelado um cenário de expansão renovável para o Brasil usando os aprendizados e as metas da Alemanha. Foi apurado pela literatura a necessidade de, ao expandir essas fontes, usar de artifícios para flexibilizar o sistema, o mantendo capaz de atender as nuances de geração dessas fontes. Por fim, foi possível criar um cenário de expansão para o Brasil, no qual, mantendo ainda 50% de geração hidrelétrica na matriz, o somatório das fontes eólica e solar podem chegar a uma representação de 40,87% do total de eletricidade gerada para a realidade brasileira, mantendo pontos de flexibilidade e aprendizados para a manutenção dessas fontes a medida que as mudanças ocorre.

Palavras-chave: fontes renováveis intermitentes; flexibilidade; matriz elétrica.

## **ABSTRACT**

In this work, the impact of the expansion of intermittent renewable sources (solar and wind) was studied and how they can expand within the electrical matrix of a country while maintaining the electricity supply. For this, the German scenario and the Energiewende were analyzed, policies for the implementation of renewable sources with bold targets for the German scenario within the next few years. With these data, generation and power information from the Brazilian and German electrical matrices was analyzed, producing information such as capacity factor and percentage of source representation in the total generation, better understanding the reality of each country and, subsequently, modeling an expansion scenario sustainable for Brazil using learnings and targets from Germany. The literature found the need, when expanding these sources, to use devices to make the system more flexible, keeping it capable of meeting the generation nuances of these sources. Finally, it was possible to create an expansion scenario for Brazil, in which, still maintaining 50% of hydroelectric generation in the matrix, the sum of wind and solar sources can reach a representation of 40,87% of the total electricity generated for the Brazilian reality, maintaining points of flexibility and learning to maintain these sources as changes occur.

Keywords: intermittent renewable sources; flexibility, electric matrix.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - ALGORITMO PAGERANK .....	16
FIGURA 2 – HIERARQUIA DO CONHECIMENTO .....	17
FIGURA 3 - RECORTE DO SIN.....	19
FIGURA 4 - METAS ENERGIEWENDE .....	23
FIGURA 5 - SAZONALIDADE ENTRE FONTES NO BRASIL .....	28
FIGURA 6 - FONTES DE SUPRIMENTO FLEXÍVEL.....	29
FIGURA 7 - TABELAS EIA.....	31
FIGURA 8 - BANCO DE DADOS FORMADO .....	33
FIGURA 9 - BANCO COM MÉTRICAS CALCULADAS .....	34

## LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 - POTÊNCIA INSTALADA NO BRASIL EM GW .....	36
GRÁFICO 2 - GERAÇÃO DE ELETRICIDADE NO BRASIL EM TWh .....	37
GRÁFICO 3 - GERAÇÃO E POTÊNCIA ANO A ANO BRASIL.....	39
GRÁFICO 4 - POTÊNCIA INSTALADA NA ALEMANHA EM GW.....	40
GRÁFICO 5 - GERAÇÃO DE ELETRICIDADE NA ALEMANHA EM TWh .....	41
GRÁFICO 6 - GERAÇÃO E POTÊNCIA ANO A ANO ALEMANHA.....	42
GRÁFICO 7 - GERAÇÃO E POTÊNCIA SOLAR NO BRASIL .....	44
GRÁFICO 8 - GERAÇÃO E POTÊNCIA EÓLICA NO BRASIL .....	44
GRÁFICO 9 - GERAÇÃO E POTÊNCIA EÓLICA NA ALEMANHA.....	45
GRÁFICO 10 - GERAÇÃO E POTÊNCIA SOLAR NA ALEMANHA.....	45

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - FATOR DE CAPACIDADE POR FONTE BRASIL.....	38
TABELA 2 - PORCENTAGEM DE GERAÇÃO POR FONTE BRASIL .....	38
TABELA 3 - FATOR DE CAPACIDADE POR FONTE ALEMANHA.....	42
TABELA 4 - PORCENTAGEM DE GERAÇÃO POR FONTE ALEMANHA .....	43
TABELA 5 - PORCENTAGEM RENOVÁVEL ALEMANHA X BRASIL.....	46
TABELA 6 - PORCENTAGEM DE GERAÇÃO ELÉTRICA ALEMANHA HISTÓRICA .....	47
TABELA 7 - VARIAÇÃO MÉDIA POR FONTE INTERMITENTE ALEMANHA.....	48
TABELA 8 - PROJEÇÃO PARA 2035 ALEMANHA .....	48
TABELA 9 - VARIAÇÃO MÉDIA POR FONTE BRASIL .....	49
TABELA 10 - PROJEÇÃO DE GERAÇÃO BRASIL .....	50
TABELA 11 - PROJEÇÃO ANO A ANO BRASIL .....	50

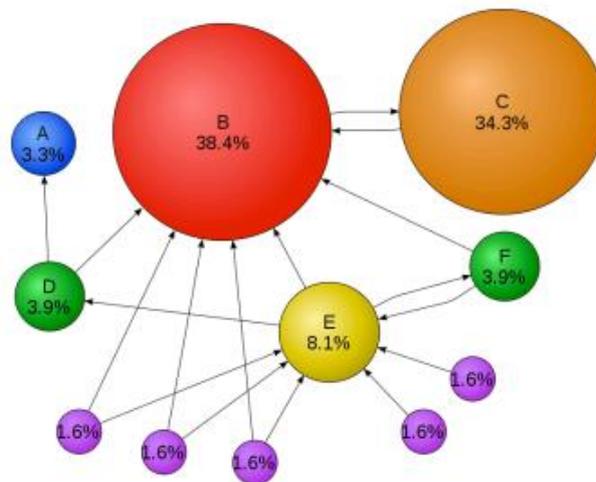
## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>16</b>
1.1 OBJETIVOS .....	19
1.1.1 Objetivo geral .....	19
1.1.2 Objetivos específicos.....	19
1.2 JUSTIFICATIVA .....	19
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>16</b>
2.1 MATRIZ ELÉTRICA MUNDIAL .....	16
2.2 MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA .....	17
2.3 SIN .....	18
2.4 CAPACIDADE E FLEXIBILIDADE .....	20
2.5 O ENERGIEWENDE ALEMÃO .....	22
2.6 ESTUDOS DE CASO .....	25
2.7 DESAFIOS DO BRASIL .....	26
<b>3 MÉTODOS</b> .....	<b>31</b>
3.1 METODOLOGIA DE OBTENÇÃO DOS DADOS .....	31
3.2 TRATAMENTO DE DADOS .....	32
3.3 CRIAÇÃO DO MODELO .....	34
<b>4 RESULTADOS</b> .....	<b>36</b>
4.1 ANÁLISE DOS DADOS.....	36
4.2 CRIAÇÃO DO MODELO .....	46
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>51</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>53</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A constante expansão tecnológica mundial impacta diretamente diversas frentes da nossa realidade. Hoje, ao realizar uma pequena atividade na internet, um indivíduo fornece dados de rastreamento e comportamento que leva a grandes empresas criar previsões de intenção de compra, sugestões de conteúdos, temas de interesse, dentre outras diversas possibilidades que às vezes um usuário comum nem se dá conta de que está sendo atacado diariamente. Facilmente, o algoritmo mais conhecido do senso comum é o “algoritmo do Google”. O Pagerank associa ações subsequentes do usuário nas diversas páginas navegadas, atribuindo uma inteligência por de trás do conteúdo de cada uma, essa análise ao longo do tempo, gera cada vez mais inteligência para o seu próprio motor e o torna cada vez mais inteligente e autônomo em relação a sua capacidade de previsão. (PASQUINELLI, 2017).

FIGURA 1 - ALGORITMO PAGERANK



FONTE: PASQUINELLI (2017)

Pode-se constatar que a humanidade então chegou na era do BIG DATA, no qual existe um grande volume de dados, sendo alimentados a uma rápida velocidade e com diversas formas de estruturação (variedade), o chamado 3 V's (ORACLE, 2022). Isso implica em desafios tecnológicos e operacionais nas mais diversas áreas de trabalho, a tecnologia permeia e tangencia qualquer tipo de ação e atividade desenvolvida no mercado, cabe ao profissional em questão a entendê-la e usá-la ao seu favor. Seja no campo ou na indústria, tarefas repetitivas e manuais

podem ser automatizadas e os dados gerados por elas fornecem insights valiosos para quem tem a capacidade técnica no assunto.

Mas afinal, o que são dados? Antes de tudo é necessário elencar uma hierarquia em relação a todo tipo de informação gerada pelo ser humano. O modelo clássico de dado-informação-conhecimento-sabedoria (DIKW) é uma representação gráfica e clássica sobre o tema, nele elencamos uma pirâmide com a base sendo os dados e o topo a sabedoria. Dados são fatos, números, objetos, todos não necessariamente possuem um significado. Já a informação é a própria contextualização de um dado em um significado, uma “coisa”. A geração do conhecimento se dá por algum tipo de interação, seja um aprendizado ou uma assimilação, um processo humano eleva a informação a esse patamar. A inteligência leva o conhecimento a uma tomada de decisão assertiva e otimizada, passando por intuições, conhecimentos prévios, experiência e capacidade de quem está de posse da ação. (RIBEIRO; SANTOS, 2020).

FIGURA 2 – HIERARQUIA DO CONHECIMENTO



FONTE: RIBEIRO (2020)

Diante do exposto, existe uma grande janela entre o mundo da engenharia de energia e a própria associação de uma hierarquização de conhecimento frente ao que é importante para o desenvolvimento profissional do engenheiro. Muito se diz sobre o Brasil possuir uma Matriz Elétrica limpa, mas até que ponto sabe-se de sua viabilidade? O quanto as principais potências do mundo estão longe nessa caminhada de descarbonização? Qual o impacto das fontes renováveis intermitentes dentro de uma matriz elétrica? O que os dados de geração podem gerar de informação, para que um engenheiro com um conhecimento necessário processe a inteligência proposta e tome a melhor decisão dentro de um contexto intercontinental, como é o caso do Brasil?

Esses questionamentos movem futuros engenheiros, que como eu, muitas vezes não possuem acesso e nem noção de onde esse tipo de dado pode ser consumido, visualizado e até mesmo tratado de forma rápida, prática e usual. O setor energético brasileiro fornece, no entanto, dentro de sua hierarquia de poder, diversos dados soltos e dispersos, de não tão fácil entendimento em um primeiro momento. Cabe aqui elencar os dados de geração elétrica da ONS (Operador Nacional do Sistema) e da EPE (Empresa de Pesquisa Energética) pelo BEN (Balanço Energético Nacional).

Segundo o BEN de 2021 (EPE, 2022), 78,1% da Matriz Elétrica Brasileira é composta de Fontes Renováveis, a princípio um número alto. Porém, esse número em relação ao ano anterior é 5% menor, uma queda não vista em um intervalo significativo de tempo. O caso é: um ano de seca afeta diretamente uma Matriz com grande dependência de energia hidráulica e mesmo com crescimentos expressivos das energias eólicas e fotovoltaicas (26,7% e 55,9%) as mesmas ainda não fornecem a segurança energética e despacho das fontes térmicas convencionais.

A essas fontes renováveis de reduzido fator de capacidade, elevada intermitência, alta variabilidade e baixa previsibilidade, chamam-se de Fontes Renováveis Não controláveis e NER (Novas Energias Renováveis), o qual necessitam de estudos mais aprofundados frente à instalação e implementação sem qualquer tipo de política de controle, pois as mesmas requerem maior flexibilidade do parque gerador em questão, um desafio em comum para todos os países que querem se adequar às necessidades dessas fontes. (ROMEIRO; FERRAZ, 2016).

O paradigma das fontes renováveis entra aí: à medida que a inserção delas entra no sistema, maior a necessidade de aumentar as ferramentas capazes de mitigar os riscos elétricos em relação à demanda de carga, o flexibilizando para lidar com a intermitência. Problemas como esse, por um ponto de vista mais conservador, podem ser resolvidos com dois elementos chave: o aumento de fontes despacháveis (no caso brasileiro, hidráulica e térmica) e o aumento de interconexões entre os sistemas. (GIANELLONI; CÂMARA, 2016). Com a limitação da expansão hídrica, restam as fontes térmicas e essas, por muitas vezes, são oriundas de fontes fósseis, assim, as interconexões levam grande peso nessa decisão.

Pondo isso em pauta, é imprescindível entender o que falta para termos um uso mais coerente e eficaz das NER. Sua expansão é incontrolável, porém é dever do Estado regulamentar e ordenar em que passo ela se dará daqui para frente. Os

dados e informações estão por aí, cabe a quem tem a capacidade analítica e técnica de mostrar o caminho para um futuro tanto limpo e renovável, quanto seguro e eficiente, e isso se dá nas decisões que os grandes gestores do país possuem em suas mãos.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

A partir de uma análise prévia de dados de geração de diversos países foi selecionado um país para ser escolhido como parâmetro devido suas características de expansão renovável: a Alemanha. Com isso, o objetivo do trabalho tornou-se, portanto a avaliação dos impactos da expansão das fontes renováveis intermitentes dentro da realidade brasileira usando como modelo os dados históricos alemães, entendendo pontos que devem ser levados em consideração para um aumento consciente das mesmas. Juntamente com um modelo de expansão delas usando como as metas estabelecidas pela Alemanha até 2035, gerando um mix de geração ao final do período.

### 1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos desse trabalho são:

- I. Analisar dados históricos de geração e potência para países selecionados;
- II. Analisar o fator de capacidade histórico por fonte para os países selecionados;
- III. Estimar um modelo de expansão das fontes renováveis intermitentes através do histórico alemão que já as expandiu ao longo dos anos;

## 1.2 JUSTIFICATIVA

A recente expansão das fontes renováveis intermitentes levou o Brasil a um crescimento exponencial de geração eólica e solar. O barateamento dos materiais, junto com a popularização da Geração Distribuída, além do discurso de descarbonização levaram essas fontes a um patamar econômico invejável, movendo

o mercado solar brasileiro a ser o 4º que mais cresceu durante o ano de 2021 e chegando à colocação de 13º lugar em capacidade instalada. (Exame, 2021).

Os dados da EPE mostram uma variação de 55,9% e 26,7% de crescimento das fontes solar e eólica respectivamente nos anos de 2020 para 2021. (EPE, 2022). Em um primeiro momento isso parece um aumento e tanto, porém mesmo com esse crescimento fora da curva dessas fontes o ano de seca baixou os reservatórios e diversas termelétricas movidas a diferentes combustíveis entraram em funcionamento, aumentando a tarifa e levantando a questão: até que ponto as fontes renováveis podem suprir essa demandas requerida na falta de água?

Ninguém quer pagar uma conta de luz mais cara, isso é óbvio. Porém, soluções milagrosas não são vendidas no varejo e muitas vezes isso é o que o novo mercado solar vende para muitos leigos no assunto. Um sistema elétrico pode ser simplificado a necessitar para seu funcionamento de dois pontos chaves: Capacidade e Flexibilidade, um em relação a suprir a quantidade de carga necessária no sistema e outro em relação aos aspectos temporais e de variabilidade sofridos pelo sistema para suas necessidades. (EPE, 2018). Ambos acabam sendo pontos fracos desses tipos de energia pois dependem de aspectos climáticos e ambientais para que estejam gerando eletricidade.

Além disso, países latinos como o Chile e a Colômbia possuem no radar de suas políticas públicas o estudo e a estratégia do limite de introdução dessas fontes para garantir uma maior segurança e confiabilidade de operação (TCU, 2019). Ambos os países possuem adesão percentual bem menor dessas fontes do que o Brasil, o que leva a argumentação de qual o motivo do nosso sistema ainda não estar estudando os impactos dessas fontes de alta variabilidade no sistema.

Para tanto, se faz a justificativa de entender o ponto de equilíbrio da inserção das NER (Novas energias renováveis) dentro do Sistema Brasileiro e entender, avaliando caso de outros países, os possíveis impasses que podemos sofrer nos próximos anos com a expansão das mesmas. Com isso, foi realizado uma análise prévia de diversos países em relação a sua matriz elétrica e evolução ao longo dos anos o que chegou a escolha da Alemanha para ser usada como modelo de comparação com o Brasil. A Alemanha apresentou saltos interessantes de geração intermite mesmo com escassez de recursos renováveis e climáticos. Sendo assim, entendeu-se possível a utilização da Alemanha como um limite superior máximo de expansão.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 MATRIZ ELÉTRICA MUNDIAL

O desenvolvimento humano se deu pelo uso da energia. Seja pela descoberta do fogo ou pelo gasto energético de uma caça para sobrevivência, a energia moveu toda a evolução do ser humano como espécie principalmente na sua habilidade de manuseá-la a seu favor em diversas circunstâncias. E nesse aspecto, todas as revoluções de mudanças do status quo ou paradigma de um determinado tempo levam algum tipo de questionamento energético como base do conflito. Pode-se citar a virada do ser humano em fixar e estabelecer residência fixa no período Neolítico, consolidando a energia em forma de comida - agricultura e domesticação dos animais – aumentando sua capacidade de sobrevivência.

Os tempos modernos levam à Revolução Industrial, a qual foi despertada pelo uso do Carvão Mineral como fonte para a então recém-inventada “Máquina a Vapor”. A eletricidade aparece como possibilidade nas fábricas durante o começo da Segunda Revolução Industrial quando ela começou a ser empregada nas comunicações e na metalurgia. Os nomes de Thomas Edison, Werner Siemens e Nikola Tesla são de extrema importância por suas invenções e contribuições na época, sendo o último, responsável pela criação do motor de corrente alternada que possibilitou o acionamento mecânico das máquinas usadas no período. Juntamente foi se desenvolvendo a tecnologia das turbinas hidráulicas para a substituição das máquinas a vapor da época. (CARVALHO, 2014).

As fontes de eletricidade da época se confundem muito com a tecnologia então oriunda das fontes de energia na geração de vapor. Sendo a eletricidade um marco da Segunda Revolução Industrial, o carvão foi um dos primeiros combustíveis utilizados na geração de eletricidade, o qual foi depois substituído pelo Petróleo e o Gás Natural. (COSMO; GALERIANI; NOVAKOSKI; RICINI, 2020). Infere-se, portanto, uma matriz mundial não renovável em sua gênese e conseqüentemente países sem reservas naturais dos mesmos ou geraram alternativas energéticas ou dependência de importação dos detentores das tecnologias e recursos.

O relatório anual de energia da IEA (Internacional Energy Agency) de 2021 trouxe que as fontes renováveis fazem parte de pouco mais de 25% de toda a demanda elétrica do mundo em 2020, que ainda possui como principal fonte o

carvão mineral. (IEA, 2021). Além disso, a expectativa é que nesse mix de fontes, o somatório das energias renováveis passe de 40% até 2030, levando em consideração um cenário conservador de expansão de demanda.

A eletricidade em si não foi tão afetada com a pandemia do COVID-19, tendo uma queda de apenas 1% no ano de 2020, o que foi muito menor do que a demanda energética de outras áreas. (IEA, 2021). Além disso, com a pandemia a inserção das fontes renováveis intermitentes (Solar e Eólica) teve crescimento histórico, levando a um percentual de fontes fósseis na matriz mundial recorde nos últimos 20 anos e uma participação mínima do carvão dos últimos 50 anos, totalizando um parque renovável instalado de 248 GW. No entanto, o crescimento não foi tão agudo do que o esperado em estudos anteriores e a previsão são de que no ano de 2021, o total de emissões de carbono tenha voltado a normalizar. (IEA, 2021).

## 2.2 MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA

A entrada do Brasil no segmento de produção de eletricidade se dá com a inauguração de uma usina hidrelétrica no final do século XIX no interior de Minas Gerais com o intuito de auxiliar os serviços de mineração da região, sendo assim, o Brasil possui uma matriz elétrica renovável desde seus primórdios. Com o “Código das Águas” de 1934, o Estado tomou conta da expansão energética do país, sendo o principal agente do planejamento e expansão nesse período, chegando a um potencial instalado no início dos anos 70 de 18.133 MW. Com a abertura do mercado brasileiro nos anos 90, entrou em pauta a privatização desses agentes estatais até então intocados. (EPE, 2020).

Até os anos 2000 houve uma crescente linear na demanda interna de eletricidade do Brasil, havendo então uma ruptura no ano de 2001 oriunda de uma crise hídrica e escassez de infraestrutura, levando a não redistribuição do excesso de produção para lugares em escassez elétrica. Nesse ponto começa a discussão sobre a flexibilidade do sistema com a criação de termelétricas a gás natural, carvão e combustíveis fósseis, o que garante segurança energética em períodos de seca. O gás natural foi muito difundido na época devido à recente criação do acordo GASBOL, importando a matéria-prima da Bolívia. Os períodos de instabilidade

política durante 2015-2017 levaram à queda da demanda de eletricidade, o que foi retomado a partir do ano de 2018. (EPE, 2020).

Em relação à renovabilidade do sistema, até os anos 2000 o Brasil oscilava entre mais de 90% da matriz sendo renovável, o que hoje, devido às instabilidades climáticas sofridos nesse século, levaram a faixa de 80%. O Gás Natural estabeleceu o papel de principal fonte de eletricidade nos últimos anos, atingindo um patamar máximo de 14% em 2014. Mesmo com as adversidades, o Brasil ainda está muito a frente das demais potências mundiais em relação ao percentual renovável da eletricidade em sua matriz com um gap de mais de 40% dos países europeus e 50% dos Estados Unidos. Além disso, o Brasil historicamente está na vanguarda das menores taxas de emissão de gases de efeito estufa oriundo do uso energético tanto em números totais, quanto per capita, um país de fato muito mais limpo e menos nocivo ao meio ambiente que os demais. (EPE, 2020).

Em relação às fontes renováveis, segundo o BEN de 2022 (EPE, 2022) as capacidades das fontes solares e eólicas estão em crescente exponencial nos últimos anos variando em 40,9% e 21,2% respectivamente nos anos de 2020 para 2021, mesmo assim, a geração termelétrica avançou 24% no mesmo período, com destaque para o gás natural, carvão mineral, derivados de petróleo, as fontes fósseis, e com a queda da geração térmica de biomassa em mais de 8%. No balanço geral do ano, obteve-se um crescimento de 4% da demanda elétrica junto com uma queda de 8,5% da demanda hidráulica, mais uma vez, a flexibilidade do sistema foi respondida com a segurança do gás natural e não com a intermitência das fontes renováveis, que mesmo em expansão, não supriram a queda hídrica. (EPE, 2022)

### 2.3 SIN

Um elemento importante da geração elétrica no Brasil é o SIN: Sistema Interligado Nacional. Ele é o sistema de transmissão e produção de energia elétrica brasileira interligada em quatro grandes subsistemas: Sul, Sudeste/Centro-Oeste, Nordeste e Norte. A interconexão existente entre os subsistemas gera uma independência operacional em intercambiar excedentes entre localidades com maior flexibilidade e capacidade operacional. A ONS (Operadora Nacional do Sistema) é a responsável por operar esse grande sistema continuamente e levar energia elétrica

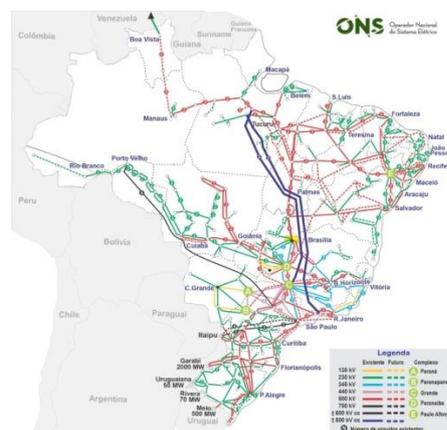
a todo o mercado consumidor brasileiro, independentemente das condições. (ONS, 2022).

O SIN foi uma consequência natural da resolução 351/98 de 1998, no qual estabeleceu a criação do Mercado Livre de Energia e autorizou a ONS a operar o sistema de forma integral. Em muitas formas, o SIN tem diversos benefícios operacionais, além de incentivar o uso de energias renováveis por modular a quantidade de energia durante os picos de cada fonte de energia, no entanto, existem sim desvantagens no sistema. Uma delas é a grande perda energética por percorrer um caminho muito longo, outro seria o desestímulo de investimento em empreendimentos energéticos em pontos que podem ser assistidos por outras localidades e também a complexidade do sistema e sua infraestrutura encarecem o custo das contas de energia elétrica ao longo do país, devido aos custos de transmissão mais elevados. (ESFERAENERGIA, 2021).

O tamanho continental do Brasil leva a incapacidade do SIN em atender lugares muito remotos e ainda hoje existem sistemas isolados de geração não conectados à rede. A maior parte deles está localizada na região Norte e Nordeste e totalizam 212 unidades isoladas no país, que somadas chegam a menos de 1% da demanda total. Por serem instalados em lugares muito remotos e com pouco acesso a tecnologias mais recentes, muitos desses sistemas são ineficientes e movidos a motores a diesel, que possuem baixa conversão com o intuito de geração elétrica e alto custo operacional. (ONS, 2022)

Na Figura 3 é possível ver um esquema do SIN e suas interconexões, tendo um pouco a dimensão do tamanho e complexidade do sistema:

FIGURA 3 - RECORTE DO SIN



FONTE: ONS (2022)

## 2.4 CAPACIDADE E FLEXIBILIDADE

O conceito de Capacidade está relacionado aos recursos que o sistema possui em atender a demanda em todos os momentos possíveis sem levar em consideração as mudanças que ocorrem de um tempo para o outro. É estabelecer que no maior pico de demanda de energia o sistema terá a capacidade de atendê-lo. De forma mais conservadora, para sistemas de despacho controlável, o conhecimento da demanda máxima leva a um bom entendimento da necessidade de capacidade do sistema. No entanto, com o advento das fontes renováveis não controláveis, existe a necessidade de uma maior granularidade temporal ao analisar o sistema, pois o momento com a maior demanda não necessariamente será o momento mais crítico da operação. (EPE, 2018).

Com isso, entra em ação o conceito de carga líquida, uma função probabilística que calcula a redução das fontes não controláveis na redução da demanda. (EPE, 2018). Isso torna a operação muito mais complexa e específica para cada momento de demanda, a trivialidade do controle da geração não mais é uma realidade e mesmo em estudos simplificados, exige um melhor entendimento das curvas diárias de geração.

Já a Flexibilidade está associada ao fato do sistema elétrico conseguir a cada momento adaptar-se às nuances nele submetidas, mantendo uma operação constante e permanente, com o mínimo de perturbações. Ano após ano os sistemas estão cada vez mais complexos e dinâmicos no que tange a demanda, nesse cenário a flexibilidade entra movida por algumas variáveis: Incerteza (previsão de demanda, custos adicionais, entre outros), Restrições (política, social, econômica) e Inovações Tecnológicas. (PASCHOARELLI, 2007).

Os meios de flexibilizar o sistema são vários, todos com o intuito de oferecer segurança e confiabilidade ao mercado consumidor. Desses pode-se citar a construção de unidades geradoras pequenas ao longo da construção de grande empreendimento, impedindo que incertezas quanto a finalização da obra afetem a demanda esperada ao fim do período esperado. Além dessa mecânica, existe também a utilização de caldeira com a possibilidade de uso de variados combustíveis em sua operação, o que possibilita a operação em momentos de crise de algum tipo específico de matéria-prima. (PASCHOARELLI, 2007).

O entendimento do conceito vai ainda além com o progressivo aumento de fontes intermitentes na rede, necessitando analisar a flexibilidade em um nível sistêmico, tornando-a assim uma combinação de: qual a flexibilidade de cada fonte geradora integrada na rede, qual a correlação entre as fontes renováveis e qual o nível de disponibilidade de transmissão na rede. Com isso, o aumento das energias renováveis pode ser de fato um calcanhar de Aquiles para sistemas não tão bem preparados para a problemática, possibilitando o aumento do custo geral da geração, mesmo com um preço de energia renovável barato. Balancear as constantes variações da geração renovável é um paradigma ambiental, pois em momentos de seca a carga térmica não necessariamente atenderá a flexibilidade que a carga hídrica fornece da mesma forma. (WARTSILLA, 2021).

Alternativas propostas para amortizar as perturbações geradas pelas fontes renováveis são então usinas com capacidade de operar a cargas mínimas de geração com eficiência. Essa característica de operação está presente em unidades geradoras movidas a gás natural, motores de combustão interna e hidrelétricas, caracterizando-as então como altamente flexíveis. Em contrapartida, unidades térmicas movidas a vapor (majoritariamente carvão mineral e nuclear) são menos flexíveis por possuírem uma inércia térmica nas caldeiras, diminuindo a capacidade de aumentar ou diminuir a operação de forma rápida. (TOLMASQUIM, 2017)

A análise temporal feita para a flexibilidade pode ser feita em dois níveis de granularidade: mensal ou intradiária. A análise mensal leva em conta as variações ao longo de meses, principalmente em relação às variações hídricas, fechando assim previsões de despachos térmicos para determinadas perturbações ao longo de um período. Cabe ressaltar aqui que as fontes térmicas nesse contexto oferecem flexibilidade operacional, pois não atingem um nível de restrição em variações temporais mais robustas. A intradiária analisa variações em escalas menores e requer um ponto de vista instantâneo de verificação, criando até mesmo a necessidade do acionamento de unidades até então desligadas. Nesse caso então é avaliado o tempo de resposta para o acionamento ou desligamento de uma unidade na rede, no caso de térmicas com inércia térmica, sua flexibilidade agora sim passa por requisitos operacionais, que a levam a um período maior de resposta. As fontes não controláveis entram em um papel probabilístico de comportamento em conjunto com a demanda e nesse contexto, não necessariamente aumento a necessidade de fontes controláveis no sistema, mesmo assim, uma análise

aprofundada deve ser levantada para entender o impacto de cada fonte a cada momento. (EPE, 2018)

## 2.5 O ENERGIEWENDE ALEMÃO

A Alemanha possui um amadurecimento precoce frente a transição energética em busca de uma menor emissão de carbono, com uma política forte e bem estabelecida à opinião popular, o Energiewende (em tradução "mudança de política energética" ou mesmo "transição energética") é o responsável por isso. Voltando um pouco no tempo, em dois momentos da história o Governo Alemão se sentiu otimista em relação ao desenvolvimento energético do país: primeiro com a expansão nuclear nos anos 60 e posteriormente com a onda renovável que vive agora. (MILLSAP, 2018).

Nesse primeiro momento, a expansão nuclear teve seu enfraquecimento em 1986 com o acidente de Chernobyl, o qual deu força para o então recém-criado partido verde iniciar três anos depois uma campanha antinuclear, culminando em uma aliança junto com o partido social democrata gerando força suficiente para a decisão de, no ano de 2000, iniciar o desmanche de todas as usinas nucleares do país até o ano de 2020, criando assim o "EEG" ("Renewable Energy Act"). (MILLSAP, 2018). Além disso, a decisão fixava o valor de venda de qualquer fonte renovável acima do preço de mercado. Após o acidente, mais nenhum reator foi construído no país.

Em adição, outro desastre nuclear também intensificou e mudou ações governamentais frente à transição energética Alemã. Poucos meses antes do desastre de Fukushima em 2011, o governo Alemão (liderado no momento pela ala liberal-conservadora) iniciou uma conversa referente à celeridade dos *phase-outs* nucleares e uma revisão da medida então aceita pelo parlamento, o que foi refutado e anulado de imediato no pós-acidente. A possível pressão popular e das frentes progressistas obrigaram a decisão mais óbvia: manter o desmanche (mesmo assim adiado seu fim em dois anos, 2022) e uma escolha ainda mais agressiva de desligamento de 5 GW de plantas no período de 3 meses ("Moratorium on nuclear power"), a fonte então perdeu a defesa da maiorias das frentes políticas e populares. (GROWITSCH; HOFFLER, 2019)

Até esse ponto, é perceptível um caráter questionador e inquieto alemão, a segurança energética das fontes não renováveis não foi impedimento para que a força popular e política precocemente reivindicassem por opções menos danosas ao meio ambiente. Todos os acontecimentos até Fukushima foram uma espécie de prelúdio e primeira versão da *Energiewende*, essenciais para as decisões posteriores tomadas pelo governo e a então reformulação e revisão do conceito *Energiewende* pela então primeira Ministra Angela Merkel, um marco para o país e aos vizinhos europeus dependentes de carvão e energia nuclear. (HOCKENOS, 2015).

O que é então a *Energiewende*? Em súpula, é toda a movimentação alemã em relação à transição energética do país para uma economia de baixo carbono e sem uso nuclear. O impacto dessas ações transcende o setor elétrico, com a expansão de fontes renováveis e desmanche de usinas movidas à fontes fósseis, engloba também todos os setores da economia rumo a uma adaptação de pensamento, unindo a sustentabilidade junto com o crescimento - um ponto que a Alemanha desempenhou bem ao longo do processo. (CLEW, 2017).

Os principais objetivos e marcos de alcance do movimento foram resumidos pela Instituição Agora *Energiewende* (2019) como ilustra a Figura 4:

FIGURA 4 - METAS ENERGIEWENDE

		Status quo (2018)	2020	2025	2030	2035	2040	2050
<b>Emissões de gases de efeito estufa</b>	Redução das emissões de GEE em todos os setores, comparada aos níveis de 1990	-31,7%	-40 %		-55 %		-70 %	-80 – 95 %
<b>Abandono progressivo da energia nuclear</b>	Fechamento gradual de todas as centrais nucleares até 2022	12 unidades fechadas	Desligamento gradual dos 7 reatores restantes (2022)					
<b>Energias renováveis</b>	Porcentagem de consumo final de energia	14%*	18 %		30 %		45 %	mín. 60 %
	Porcentagem de consumo bruto de eletricidade	38,2%*		40 – 45 %		55 – 60 %		mín. 80 %
<b>Eficiência energética</b>	Redução do consumo de energia primária comparada aos níveis de 2008	-5,5%*	-20 %					-50 %
	Redução do consumo bruto de eletricidade comparada aos níveis de 2008	-3,2%*	-10 %					-25 %

AUTOR: AGORA ENERGIEWENDE (2019)

Existe então um planejamento em longo prazo, iniciado em 2011 e que finalizaria em 2050. Citando sobre os objetivos, o primeiro é relacionado a diminuição da emissão de gases de efeito estufa em comparação ao patamar de 1990, levando a um patamar extremamente alto no fim do período. O fechamento das usinas nucleares possuía uma pretensão até o ano de 2022, o que não se tornou realidade. Além disso, foi estipulado níveis de redução de consumo primário e bruto de eletricidade, os quais os níveis ainda são baixos para os esperados no período atual. Por fim, os objetivos de inserção de fontes renováveis na matriz elétrica e energética estão extremamente avançados, visto que a meta de 40% em questão a eletricidade é para 2025.

No entanto, contratempos existiram e deixaram suas marcas na população alemã. O alto investimento em fontes renováveis levou a elas serem responsáveis por 46% da geração de energia elétrica no país no ano de 2020, isso acarretou em uma das tarifas mais caras da Europa também. Além disso, a instabilidade renovável com o fechamento das usinas fósseis leva a uma resposta pelo gás natural, o qual possui diversos problemas de instabilidade preço por aspectos geopolíticos. (HOCKENOS, 2020).

O preço pago pela transição é um valor 43% maior que os demais 27 países da União Europeia pela tarifa de eletricidade, além de uma conta de 600 bilhões de dólares estimada entre 2022 e 2025 para manter a estabilidade da rede, segundo auditoria Federal do governo Alemão. Enquanto países como França e Inglaterra mantiveram uma visão positiva de seu potencial nuclear, o Energiewende levou a uma transição energética radical e por vezes imprudente, vide o valor pago pela população. (LOHMANN, 2021).

Em dezembro de 2022, foi anunciado o atraso do desligamento das duas últimas usinas nucleares alemãs. Fruto de problemas geopolíticos da guerra na Rússia e possibilidades de falta de suprimento de eletricidade no ano de 2023, o governo estimou que em cenários pessimistas existisse a possibilidade de falta de eletricidade e essas duas usinas ficariam em Stand-by até segunda ordem, sem estarem necessariamente em funcionamento. (CONNOLLY, 2022) Por fim, o descomissionamento final de todas as plantas nucleares alemãs ocorreu no dia 15 de abril de 2023, representando um marco dentro dos objetivos do Energiewende. (BASE, 2023).

Os principais aprendizados da transição energética alemã são oriundos de uma adaptabilidade da inserção das fontes renováveis intermitentes (Solar e Eólica) junto com um sistema mais flexível, com capacidade de adaptação às rápidas mudanças de oferta e demanda dessas fontes (AGORA ENERGIWENDE, 2019). A Flexibilidade se torna portanto o paradigma principal para qualquer matriz em transição renovável, necessitando a integração de fontes mais flexíveis na medida que as fontes renováveis se expandem. (AGORA ENERGIWENDE, 2018). Com isso, a Alemanha busca ampliar fontes renováveis flexíveis (Hidrelétrica e Biomassa) junto com a expansão intermitente, gerando um crescimento sustentável para a rede. (FACTO ENERGY, 2018).

## 2.6 ESTUDOS DE CASO

O estudo de Lustfeld (2022) analisou dados históricos de geração de eletricidade alemã dos anos de 2015 a 2021 e demonstrou ser possível para a Alemanha, como pouca capacidade de armazenamento de energia, suprir sua demanda elétrica apenas com geração eólica e solar. No entanto, a demanda física de instalação de placas e turbinas seria exorbitante: placas deveriam existir a cada duas casas e a instalação de 135 mil turbinas de 6 GW seriam necessárias para tal possibilidade, gerando um aumento de 100% no custo de geração.

Outro estudo de Castro e Medeiro (2020) elenca possibilidades de metodologias para suportar a expansão de fontes intermitentes como o Nowcasting e o Machine Learning. O Nowcasting consiste em uma análise meteorológica prévia juntamente com a capacidade humana de inferir possibilidades de eventos em até seis horas no futuro, é a junção de um pré-processamento de máquina junto com o entendimento empírico de caso. Já o Machine Learning consiste em aproveitar da existência de um grande volume de dados e prever incertezas e possibilidades de furos na geração das fontes intermitentes, sabendo onde seria necessária a complementaridade de outras fontes.

Outro caso analisado por Medeiro (2018) usa um método de regressão linear múltipla usando dados geográficos e de geração com o intuito de gerar uma distribuição espacial de campos solares. O autor confirma a tese de que a suavização espacial com implementação de plantas de diferentes potências, porém com uma potência total estabelecida, pode ajudar a previsibilidade de geração solar.

No estudo de Flávio (2015) é abordado um planejamento de transmissão considerando um alto grau de NERs analisado em duas etapas, com a separação do aproveitamento renovável do atendimento da demanda, modelando a característica estocástica das fontes de forma adequada. A partir de um fluxo de potência cronológico, o autor encontrou reforços robustos para manter a volatilidade do sistema e manter a curva de carga.

No trabalho de Peron (2018) foi analisado pelo perfil de consumo e geração da região Nordeste do Brasil a complementaridade de fontes intermitentes junto com fontes hídricas e térmicas, analisando correlações entre elas e mensurando um ponto ótimo de expansão para cada uma delas. Foi constatado que pelo perfil linear, o crescimento térmico juntamente com o renovável é suficiente para suprir a demanda. Santos, Jong, Costa e Torres (2020) falam também sobre a combinação de fontes eólica e solar em uma usina híbrida, juntamente com a fonte hídrica, na segurança energética da região nordeste. O estudo evidenciou complementaridade das fontes e possibilidades da construção de plantas em conjunto no mesmo empreendimento com viabilidade econômica. Monforti, Huld, Bódis, Vitali, Disidoro e Lacal-Aránzaga (2014) também chegaram à conclusão de complementaridade de fontes eólica e solar para o perfil climático Italiano. Hoicka e Rowlands (2010) também evidenciaram esse perfil em Ontário, Canadá. No entanto, foi analisada que existe ainda uma menor variabilidade na produção de eletricidade quando as fontes estão no mesmo local, do que quando estão em locais distintos.

Dito isso, é evidente alguns pontos essenciais. As fontes intermitentes não vão de fato tomar o lugar das demais e representar toda a fatia de produção de eletricidade, porém, o uso em conjunto da energia eólica e solar, juntamente com fontes flexíveis e de despacho controlável, suavizam as possibilidades de interrupções, faltas de energia e incertezas oriundas da não possibilidade de armazenamento em larga escala dessas fontes.

## 2.7 DESAFIOS DO BRASIL

A expansão das fontes renováveis intermitentes, ou também renováveis não despacháveis, gera desafios operacionais e técnicos para qualquer país que deseja usufruir das mesmas, isso é oriundo de algumas características existentes nas mesmas: Variabilidade de disponibilidade climática elevada, investimento e

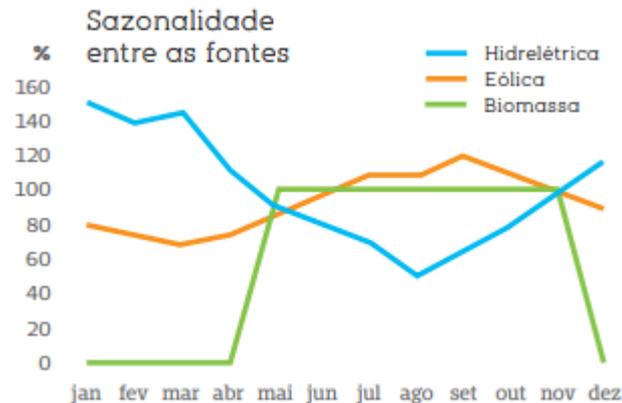
baixo custo operacional, geração de inatividade e onerosidade de fontes térmicas e deslocamento do despacho de fontes mais caras, distribuição desigual de potenciais ao longo do território, modularidade pela instalação de pequenas unidades, níveis de tensão alterados - geração distribuída impacta na perspectiva de fluxos médios de tensão, necessitando maior robustez na rede - e ausência de sincronismo. (IEMA, 2016).

Essa última característica impacta diretamente nos serviços ancilares fornecidos por fontes térmicas e grandes hidrelétricas, os quais contribuem para o controle de potência, tensão, frequência, entre outros, para a rede toda. Uma expansão necessita de um caráter gradual e de que usinas eólicas, por exemplo, com novos tipos de controles, passem a suprir esses serviços, sendo necessários também, investimentos em transmissão à medida que essa expansão ocorra. (PASTOR; MACÊDO, 2020).

As estratégias de expansão dessas fontes podem ser guiadas por 3 pontos de compensação de variabilidade, usados em conjunto ou paralelamente. O primeiro é o efeito de portfólio. O posicionamento geográfico dessas fontes, principalmente a eólica, impacta na possibilidade de geração ao longo do dia, assim, em um país de grande extensão territorial como o Brasil, a instalação em vários pontos se beneficia de que o total de potência instalada gera menos variabilidade de geração que as usinas, se analisadas individualmente. O segundo ponto é capacidade de armazenamento de energia. De fato, não existe uma tecnologia escalável e sustentável de baterias que suprisse o armazenamento em larga escala dessas fontes, porém, o grande potencial hídrico instalado no Brasil se beneficia do aumento dessas fontes ao poder aumentar seus reservatórios em períodos de cheia. O terceiro ponto a ser elencado é o de usar fontes despacháveis como reserva. No caso Alemão, por exemplo, existe um potencial de 30 GW de usinas térmicas neste modo. (ECOIA, 2016).

O Brasil hoje amortiza a variação das fontes usando um mix dos dois primeiros pontos. Existe uma sinergia de portfólio entre as fontes térmica renovável e eólica (na região Nordeste) as quais produzem mais em períodos de seca, com o aumento de vento coincidindo com o período de safra da cana de açúcar. Assim, existe uma possibilidade maior de utilização dos reservatórios hidrelétricos como grandes armazenadores de energia. (ECOIA, 2016). A Figur 5 mostra um pouco desse perfil:

FIGURA 5 - SAZONALIDADE ENTRE FONTES NO BRASIL



FONTE: ECOA (2016)

Com isso, fica evidente uma nova possibilidade de usinas de backup em períodos de seca. Hoje o sistema utiliza as térmicas fósseis para cumprir esse papel, no entanto, o fato de a expansão hídrica ter levado em conta um sistema robusto e interligado, além de reservatórios de grande porte, comporta com o comportamento variável das fontes de despacho não controlável por beneficiarem um backup menos custoso a rede: energia potencial da água. (LOSEKAN, 2016).

Nesse caso, o incentivo dessas fontes acaba por trazer segurança ao sistema devido à complementaridade de ventos e safra com os períodos de seca, com uma ampliação da geração de eletricidade, diminuindo possíveis impactos ambientais ao trocar a segurança térmica fóssil por melhor manutenção de reservatórios e geração renovável intermitente. (WWF, 2012).

Outro desafio a ser atendido é o de responder a demanda horária. A característica intermitente modula a geração controlável a pontos de não necessariamente maior demanda, mudando o perfil da operação. Existe uma grande variação hora a hora, até mesmo minuto a minuto, o que necessita, portanto, de fontes com flexibilidade operativa, que podem encarecer a geração (TOLMASQUIM, 2016).

Portanto, o maior desafio de fato para a expansão dessas fontes é a ampliação de fontes flexíveis. Os recursos de flexibilidade do sistema podem ser elencados em 5 pontos: suprimento (implementação em si de fontes flexíveis), armazenamento, infraestrutura de rede, gerenciamento de demanda e operação do sistema. A questão do armazenamento no Brasil está ligada na capacidade de

manter reservatórios de água ao longo dos anos, visto que tecnologias disruptivas de baterias ainda estão em desenvolvimento. As redes de transmissão, além do próprio desafio da expansão renovável, já são um problema da realidade brasileira com problemas de conexões e leilões, transcendendo o tema do estudo aqui abordado. O gerenciamento da demanda é trabalhado no Brasil pelo viés de incentivos tarifários e programas de eficiência energética. Já a operação do sistema é beneficiada por essas fontes por trazer benefícios econômicos em períodos de abundância das mesmas com redução de custos sistêmicos na expansão aliada a fontes flexíveis. (IEMA, 2016).

O suprimento por fontes flexíveis pode ser caracterizado por 3 características: a capacidade de dosar níveis de geração pela necessidade do sistema, carga em rampa (velocidade que o nível de geração varia) e o tempo de espera (tempo de início de funcionamento da usina). Assim, uma usina com alta carga de rampa, baixo tempo de espera e com capacidade de adaptabilidade de geração pode suprir de forma flexível o sistema (IEA, 2014).

FIGURA 6 - FONTES DE SUPRIMENTO FLEXÍVEL



FONTE: IEMA (2016)

O Brasil possui um parque extremamente flexível pela abundância de potencial hídrico instalado e a medida tomada de suprimento flexível, caso limitações climáticas ocorram, são as térmicas flexíveis. No entanto, é possível garantir a seguridade do sistema com a contribuição Solar-eólica-Hídrica frente a Térmica-hídrica, minimizando a necessidade de fontes térmicas na rede com uma projeção de até 46% do total de geração intermitente e 50% hidrelétrico. (SCHMIDT; CANCELLA; PEREIRA, 2016).

Em contrapartida, o aumento do percentual dessas fontes para além de 30% do total de geração elétrica mostrou aumentar ainda mais a necessidade de flexibilidade no sistema afetando a carga líquida total do sistema, no entanto, a análise foi realizada a países separados da Europa e essa queda diminui com a possibilidade de interconexões de rede robustas, como é o caso do Brasil. (HUBER; DIMKOVA; HAMACHER, 2014). O limite teórico de 30% pode ser sim uma realidade para diversos países, porém, para o Brasil e seu sistema interligado, juntamente do potencial flexível já instalado pode ser ultrapassado. (PRADO, 2021)

### 3 MÉTODOS

#### 3.1 METODOLOGIA DE OBTENÇÃO DOS DADOS

O presente trabalho tem como principal foco a análise de dados de potência instalada e geração de energia elétrica para a criação de um modelo de expansão entre as fontes de energias renováveis intermitentes. Para tanto, primeiramente foi estabelecido uma fonte única de captação desses dados para a criação dessa análise. O EIA (Energy Information Administration) é uma agência estatística dentro do Departamento de Energia dos Estados Unidos da América, fornecendo previsões, inteligência de mercado e dados históricos referentes ao tema (EIA, 2011). Primordialmente, a agência oferece dados internos de diferentes atributos energéticos para o país de origem, porém também existe uma tabulação de dados Internacionais.

O EIA então fornece diversos dados e os que foram usados no trabalho foram as tabelas de “Capacidade Instalada” (em GW) e “Geração Elétrica” (em TWh) dos países, tanto do Brasil quanto da Alemanha, com dados dos anos de 2011 até 2021 para a realização do estudo. As tabelas foram exportadas e posteriormente tratadas para a geração de indicadores relevantes para o tema. Indicadores são nada mais do que quantificação de métricas e/ou processos com o intuito de entender a realidade de um objeto ou negócio. (FERNANDES, 2004). A imagem abaixo exemplifica como os dados são fornecidos pela agência:

FIGURA 7 - TABELAS EIA

PIN	API		1990	1991	1992	1993	1994
		China					
		Generation (billion kWh)	590	643	716	796	880
		Nuclear (billion kWh)	0	0	0.5	2.5	14
		Fossil fuels (billion kWh)	465	519	585	644	701
		Renewables (billion kWh)	125	124	130	149	166
		Hydroelectricity (billion kWh)	125	124	130	149	165
		Non-hydroelectric renewables (billion kWh)	(s)	(s)	(s)	(s)	0.4
		Geothermal (billion kWh)	0	0	0	0	0
		Solar, tide, wave, fuel cell (billion kWh)	(s)	(s)	(s)	(s)	(s)
		Tide and wave (billion kWh)	0	0	0	0	0
		Solar (billion kWh)	(s)	(s)	(s)	(s)	(s)
		Wind (billion kWh)	(s)	(s)	(s)	(s)	(s)
		Biomass and waste (billion kWh)	0	0	0	0	0.3

FONTE: EIA (2023)

Todos os dados nacionais fornecidos dentro do site são retirados de órgãos e agências de seus respectivos países e conectados via API (*application programming interface* - interface simplificada de conexão entre aplicações, viabilizando uma comunicação sem precisar saber dos pormenores dela) (IBM, 2020).

### 3.2 TRATAMENTO DE DADOS

As tabelas do EIA foram fornecidas ao longo dos anos com as seguintes fontes de geração e potência:

- Nuclear;
- Fóssil;
- Hidráulica;
- Geotérmica;
- Ondas e marés;
- Solar;
- Eólica;
- Biomassa.

Assim, para melhorar a visualização dos resultados as fontes “Geotérmicas” e “Ondas e Marés” foram excluídas devido à ausência das mesmas em ambos os países, a fonte “Fóssil” foi reescrita como “Térmica Fóssil” e a fonte de “Biomassa” como “Térmica Renovável”. Esses dados foram exportados para o Google Planilhas, no qual foram dimensionados para um uso coerente dos mesmos com o intuito de virar um banco de dados para as consultas necessárias durante todo o trabalho ou trabalhos futuros. Com isso em mãos, tornou-se necessário a transposição desses dados de uma forma em que os mesmos possuíssem dimensões de caráter qualitativo, juntamente com as métricas de valor que já existem dentro do dado exportado e futuros cálculos necessários. As dimensões propostas foram as seguintes: Ano, País e Tipo de fonte.

Com essas dimensões estabelecidas, foi associado às métricas necessárias que dão o norte do trabalho para dar continuação a análise:

- Valor de Geração (em TWh);
- Valor de Potência (em GW);

A estrutura do banco pode ser visualizada pela imagem abaixo:

FIGURA 8 - BANCO DE DADOS FORMADO

Ano	País	Tipo de fonte	Potência	Geração
2011	Brasil	Térmica Renovável	9,0	32,4
2011	Brasil	Térmica Fóssil	31,2	49,1
2011	Brasil	Solar	0,0	0,0
2011	Brasil	Nuclear	1,9	14,8
2011	Brasil	Hidrelétrica	82,5	428,3
2011	Brasil	Eólica	1,4	2,7
2012	Brasil	Térmica Renovável	9,9	35,8
2012	Brasil	Térmica Fóssil	32,8	75,8

FONTE: AUTOR (2023)

Com os dados em mãos, também foi calculado mais três métricas relacionadas a cada uma dessas linhas: “Fator de Capacidade por fonte por país por ano”, “% do total de geração da fonte no ano” e “% total de potência instalada da fonte no ano”. A partir desse ponto, foram criadas consultas para os gráficos e demais análises necessárias para a criação do modelo, no qual, por país, as mesmas métricas foram colocadas ano a ano com colunas de “Tipo de fonte”, sendo assim, melhor dimensionada para a construção das visualizações. Os gráficos foram feitos também pela mesma plataforma e dispuseram apenas dos dados presentes no banco criado. O fator de capacidade é um índice que demonstra o quanto uma usina gera em relação ao seu máximo possível (ENERGIAHOJE, 2022). E pode ser calculado pela equação 1 que refere a divisão da energia total gerada em um ano dividido pela potência instalada multiplicada pelas horas do ano:

$$Fator\ de\ Capacidade = \frac{Energia_{anual}}{Pot_{instalada} * 8760} \quad (1)$$

O recorte final do banco com todas as métricas pode ser visto na imagem abaixo:

FIGURA 9 - BANCO COM MÉTRICAS CALCULADAS

Ano	País	Tipo de fonte	Potência	Geração	Fator de Capacidade	Percentual Geração	Percentual Potência
2011	Brasil	Térmica Renovável	9,0	32,4	41,01%	6,15%	7,16%
2011	Brasil	Térmica Fóssil	31,2	49,1	17,95%	9,32%	24,79%
2011	Brasil	Solar	0,0	0,0	0,00%	0,00%	0,00%
2011	Brasil	Nuclear	1,9	14,8	89,65%	2,81%	1,49%
2011	Brasil	Hidrelétrica	82,5	428,3	59,30%	81,22%	65,42%
2011	Brasil	Eólica	1,4	2,7	21,65%	0,51%	1,13%
2012	Brasil	Térmica Renovável	9,9	35,8	41,15%	6,54%	7,59%
2012	Brasil	Térmica Fóssil	32,8	75,8	26,40%	13,86%	25,07%

FONTE: Autor (2023)

### 3.3 CRIAÇÃO DO MODELO

A metodologia por detrás do modelo segue o referencial teórico apresentado anteriormente neste trabalho: o modelo de expansão alemão para as fontes intermitentes aprendeu com o tempo que a Flexibilidade é o ponto chave para a melhor inserção das mesmas. Com isso em mente, foi pego o recorte de 2021 da Alemanha e analisado o quão flexível a matriz era em porcentagem de geração. Desse total, foi feito um cálculo proporcional de crescimento para o quanto a matriz intermitente cresceu, estabelecendo um limite mínimo a partir desse valor final. Além disso, estimar um valor mínimo de contribuição hidrelétrica de 50% como mostra em Schmidt, Cancelli e Pereira (2016).

Com um limite inferior definido, foi criado um modelo de expansão das fontes alemãs até o ano de 2035, o qual, sua meta é de possuir uma porcentagem de geração elétrica renovável de 60%. Levando em conta linearidades históricas da fonte térmica renovável e hidrelétrica, as mesmas foram estimadas pela média dos dados coletados, a nuclear zerada a partir de 2023 e assim, a modulação de geração fica entre o crescimento das fontes intermitentes contra o crescimento térmico até um ponto em 2035 que o somatório renovável de geração chegue em 60%. Foi calculado um coeficiente de ponderação entre as fontes solar e eólica a partir da média da variação ano a ano do percentual de participação de cada uma na matriz elétrica alemã, assim, ambas aumentaram proporcionalmente ao que já cresceram no passado. As equações dessa ponderação podem ser conferidas nas equações 2, 3, 4 e 5:

$$MÉDIA SOLAR = \frac{\sum_{i=2016}^{n=2020} G_{Si+1} - G_{Si}}{(n-i)} \quad (2)$$

$$MÉDIA EÓLICA = \frac{\sum_{i=2011}^{n=2020} G_{Si+1} - G_{Si}}{(n-i)} \quad (3)$$

$$PONDERAÇÃO SOLAR = \frac{MÉDIA SOLAR}{MÉDIA SOLAR + MÉDIA EÓLICA} \quad (4)$$

$$PONDERAÇÃO EÓLICA = \frac{MÉDIA EÓLICA}{MÉDIA SOLAR + MÉDIA EÓLICA} \quad (5)$$

Com uma porcentagem da participação intermitente na Alemanha no ano de 2035 estimado, os mesmos processos foram estimados para o Brasil, com um proporcional das fontes com menor variação em relação ao percentual possível de demanda elétrica ao longo desses anos a partir de uma regressão linear. Para a fonte térmica renovável e nuclear foi estimada uma média e feito um proporcional do projetado ano a ano. Posteriormente, foi realizada uma diminuição da fonte térmica fóssil e depois hidrelétrica para a expansão das fontes renováveis intermitentes, chegando a um valor de projeção.

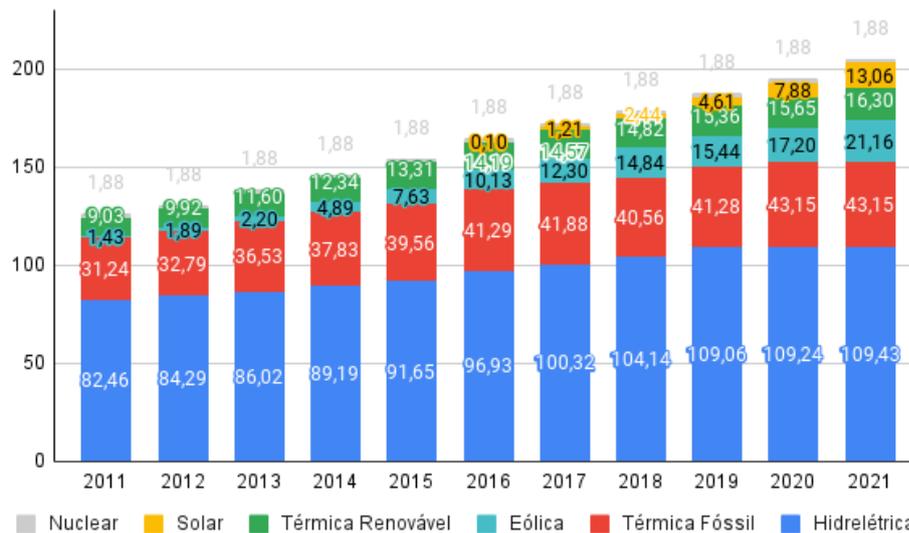
Após isso, foi verificada a flexibilidade do sistema em relação ao ponto estimado no começo e validando a possibilidade ou não dessa proposta de projeção. A partir de uma porcentagem de geração intermitente para o Brasil, foi calculada a geração total ano a ano e, a partir do fator de capacidade histórico médio por fonte, calculado a potência instalada necessária para tal geração.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 ANÁLISE DOS DADOS

Nesse primeiro momento foram expostos os dados referentes à geração de eletricidade e potência instalada no Brasil e Alemanha, na medida de entender suas peculiaridades e possíveis analogias de modelos de comparação como o intuito de gerar uma previsão para a matriz elétrica Brasileira.

GRÁFICO 1 - POTÊNCIA INSTALADA NO BRASIL EM GW



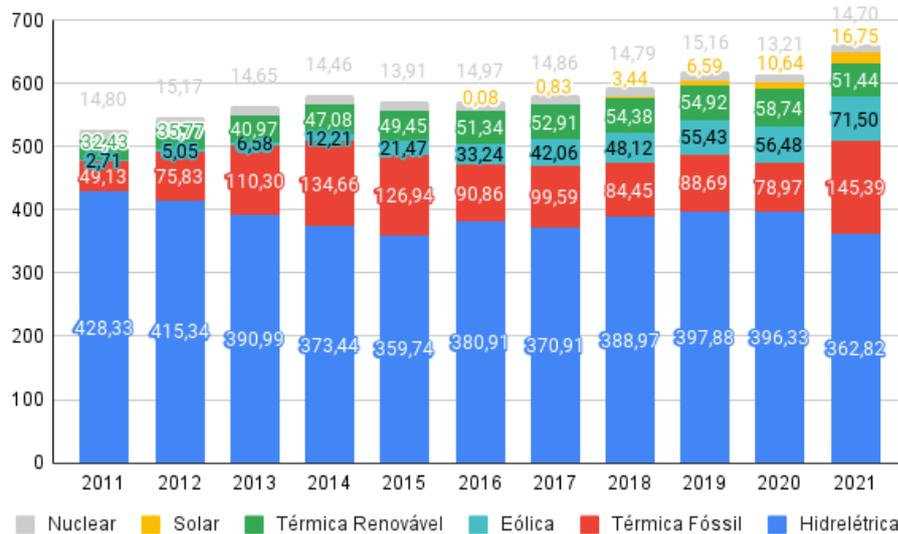
FONTE: elaborado pelo autor com dados do EIA (2023)

No Gráfico 1 foi possível verificar a potência instalada no Brasil no recorte de 2011-2021. Os dados mostram essa predominância hídrica ao longo dos anos, mesmo assim com um crescimento não tão relevante nessa década. As fontes térmicas fósseis e renováveis apresentam um crescimento linear, elucidando um caráter mais oneroso de operação e construção das mesmas. Além disso, falando das fontes intermitentes, existe a expansão e o crescimento tanto da fonte eólica quanto solar nesse período.

A fonte eólica em 2011 já era uma realidade para a matriz, porém, a partir de 2014 tem-se um crescimento agressivo da fonte, a qual chegou em 21,16 GW instalados no ano de 2021 - 10,23% da potência instalada total. Já a fonte solar começou a se desenvolver a partir de 2016 e seu grande crescimento ocorreu nos

dois últimos anos do período, chegando a 13 GW instalados - 6,37% da potência instalada total.

GRÁFICO 2 - GERAÇÃO DE ELETRICIDADE NO BRASIL EM TWh



FONTE: elaborado pelo autor com dados do EIA (2023)

Já no Gráfico 2, a geração de fato de eletricidade pela matriz gera análises mais interessantes e menos lineares. Enquanto a potência instalada das fontes de certa forma apresentava uma expectativa cartesiana de crescimento, no intuito de geração as flutuações são maiores e as parcelas variáveis não controladas pelo homem afetam de fato o todo. Sobre a fonte hidráulica, existe uma geração flutuante com pontos baixos no ano de 2015 e 2021. No entanto, a geração total em 2021 é maior que a de 2015, o que deixou esse impacto bem mais relevante quando em quesitos percentuais do total da geração (62,75% contra 54,76%).

Essas oscilações hidrológicas são acompanhadas de incentivos na fonte térmica fóssil, caracterizando o fato de elas serem o backup do sistema para esses tipos de ocasiões. Ambos os anos, a porcentagem total dessa fonte na geração chegou próximo dos 22%, contra uma média do período de 16,7%. Outro ponto relevante é o fato do crescimento na potência renovável intermitente não se revelar na mesma intensidade para a geração de eletricidade.

A fonte eólica gerou em 2021 um total de 71,50 TWh de eletricidade, um feito interessante levando ao fato de que 10 anos antes apenas 2,71 TWh foram oriundos dessa fonte. Já a energia solar teve um pico de 16,75 TWh de geração e

uma desproporção de crescimento bem mais acentuada que a fonte eólica na relação potência x geração, chegando em apenas 2,53% da geração total e a eólica em 10,71%. A essa relação entre a capacidade instalada e a geração de eletricidade se dá o termo Fator de Capacidade que é o quanto foi gerado pela potência instalada em relação ao quanto teoricamente geraria em seu máximo em um determinado período de tempo, nesse caso, ano a ano.

TABELA 1 - FATOR DE CAPACIDADE POR FONTE BRASIL

<b>Ano</b>	<b>Térmica Renovável</b>	<b>Nuclear</b>	<b>Térmica Fóssil</b>	<b>Eólica</b>	<b>Hidrelétrica</b>	<b>Solar</b>
<b>2017</b>	41,44%	90,02%	27,14%	39,02%	42,21%	7,82%
<b>2018</b>	41,89%	89,64%	23,77%	37,01%	42,64%	16,13%
<b>2019</b>	40,83%	91,86%	24,52%	40,98%	41,65%	16,30%
<b>2020</b>	42,85%	80,04%	20,89%	37,49%	41,42%	15,42%
<b>2021</b>	36,02%	89,09%	38,46%	38,57%	37,85%	14,65%

FONTE: elaborado pelo autor com dados do EIA (2023)

Na Tabela 1 é possível entender essa desproporção. Enquanto a fonte eólica apresenta fator de capacidade próximo de 40%, a fonte solar chega a um valor próximo de 15%. Além disso, em 2021 é possível ver que com o aumento de geração fóssil devido à queda hídrica, o fator de capacidade para as térmicas fósseis teve um aumento significativo e o hidrelétrico uma queda, isso devido a ociosidade das potências instaladas, hora por um lado no caso de ficar em espera e do outro por estar com falta de água.

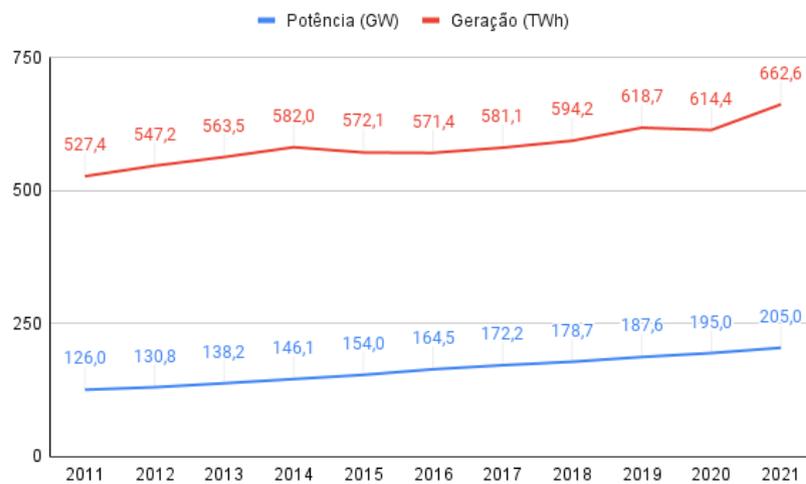
TABELA 2 - PORCENTAGEM DE GERAÇÃO POR FONTE BRASIL

<b>Ano</b>	<b>% Térmica Renovável</b>	<b>% Nuclear</b>	<b>% Térmica Fóssil</b>	<b>% Eólica</b>	<b>% Hidrelétrica</b>	<b>% Solar</b>
<b>2017</b>	9,10%	2,56%	17,14%	7,24%	63,82%	0,14%
<b>2018</b>	9,15%	2,49%	14,21%	8,10%	65,47%	0,58%
<b>2019</b>	8,88%	2,45%	14,34%	8,96%	64,31%	1,06%
<b>2020</b>	9,56%	2,15%	12,85%	9,19%	64,51%	1,73%
<b>2021</b>	7,76%	2,22%	21,94%	10,79%	54,76%	2,53%

FONTE: elaborado pelo autor com dados do EIA (2023)

Na Tabela 2 foi possível analisar o caráter da geração das fontes. Enquanto as fontes térmicas renováveis e nucleares possuem uma estabilidade enquanto a geração no percentual total da matriz, a fonte hidrelétrica é responsiva a características naturais. Já a fonte eólica, mesmo com um crescimento expressivo, não possui uma variação significativa na porcentagem do total gerado ao longo dos anos. Também, a energia solar representa uma parcela pequena do total de geração.

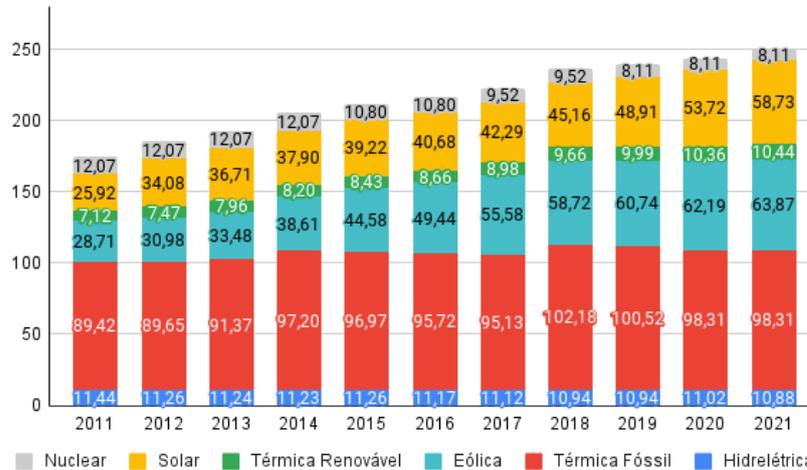
GRÁFICO 3 - GERAÇÃO E POTÊNCIA ANO A ANO BRASIL



FONTE: elaborado pelo autor com dados do EIA (2023)

A partir do Gráfico 3 ficou também entendido o caráter extremamente linear da instalação de novas usinas - potência - ao longo dos anos e a flutuação de geração por conta de fatores externos. No ano de 2020, por exemplo, existiu uma queda na geração no período de pandemia, o que foi rapidamente revertido em 2021, com um crescimento acima da média dos anos anteriores.

GRÁFICO 4 - POTÊNCIA INSTALADA NA ALEMANHA EM GW

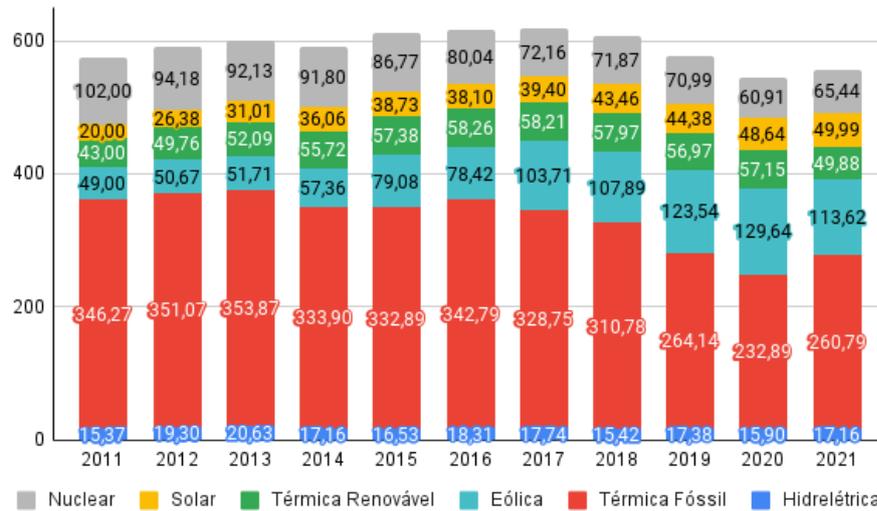


FONTE: elaborado pelo autor com dados do EIA (2023)

Já em relação à potência instalada na Alemanha, ocorrem alguns pontos diferentes. As fontes hídrica e térmica Renovável possuíram crescimento tímido em relação à expansão das demais renováveis (Solar e Eólica). Já a potência nuclear manteve-se viva nas últimas usinas existentes, que finalizaram a operação em abril de 2023, mas que de fato ficaram mais de backup do que em si com uma demanda fixa. Já existe uma oscilação de potência das térmicas fósseis, que acabam por ser o ponto de maior flexibilidade das demais para a inserção das fontes intermitentes na rede.

Já as fontes eólica e solar cresceram de forma consistente nesse período. A fonte solar chegou ao fim do período em 23,46% e a fonte eólica a 25,51% da potência total da matriz alemã. Somando das demais fontes renováveis, a potência instalada alemã chega próximo dos 60% em renovabilidade, o que não necessariamente reflete na geração de eletricidade com é possível ver no Gráfico 5:

GRÁFICO 5 - GERAÇÃO DE ELETRICIDADE NA ALEMANHA EM TWh



FONTE: elaborado pelo autor com dados do EIA (2023)

Ao analisar a geração elétrica alemã, a representatividade da fonte solar e da fonte da eólica é menor do que em relação à proporção da potência instalada em si. Tem-se com grande participação a fonte térmica fóssil, que mesmo em anos de diminuição de potência, teve aumento de geração na relação ano-a-ano. A geração nuclear foi diminuindo ao longo do tempo, toda a pressão da energiewende foi essencial para tal acontecimento, no entanto, não foi motivo para a maior produção de 2021 em relação a 2020.

As fontes hídrica e térmica renovável possuem um caráter fixo e estável para a matriz, gerando uma linearidade no sistema. Já as fontes eólica e solar, mesmo beirando os 50% da potência instalada, não chegam, somando ambas, em 30% da geração total, além disso, a participação de ambas caiu de 2020 para 2021. Ao analisar o parâmetro de Fator de Capacidade e comparar com o Brasil chega-se nos seguintes pontos:

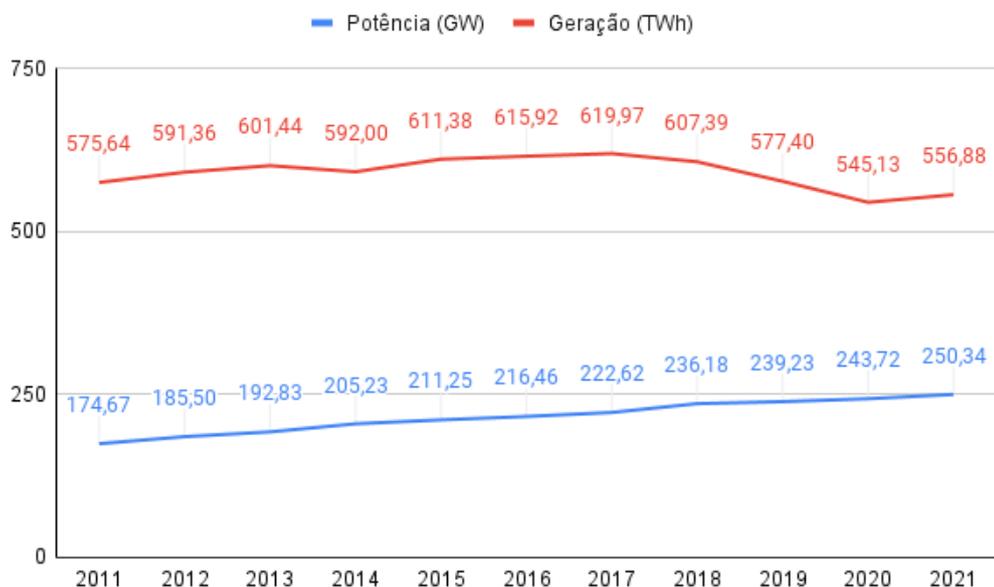
TABELA 3 - FATOR DE CAPACIDADE POR FONTE ALEMANHA

Ano	Térmica Renovável	Nuclear	Térmica Fóssil	Eólica	Hidrelétrica	Solar
2017	73,98%	86,57%	39,45%	21,30%	18,21%	10,63%
2018	68,49%	86,23%	34,72%	20,97%	16,09%	10,99%
2019	65,07%	89,96%	30,00%	23,22%	18,14%	10,36%
2020	62,95%	85,70%	27,04%	23,80%	16,47%	10,34%
2021	54,55%	92,08%	30,28%	20,31%	18,00%	9,72%

FONTE: elaborado pelo autor com dados do EIA (2023)

Os fatores para a fonte eólica e fonte solar são significativamente menores em relação ao Brasil. Enquanto no Brasil o fator para a fonte eólica beira os 40%, na Alemanha esse valor pouco passa de 20%, ou seja, o dobro do potencial é aproveitado na média para 1 GW de potência instalada no Brasil. Já para a energia solar a diferença segue uma proporção de 1:1,5, enquanto a média alemã é de 10%, a brasileira é de 15%. Vemos então, uma capacidade superior do Brasil em gerar energia oriunda dessas fontes de fato com dados de geração, entendendo um pouco da motivação de um dos motivos da expansão dessas fontes no Brasil: os benefícios climáticos, principalmente em comparação a outras realidades.

GRÁFICO 6 - GERAÇÃO E POTÊNCIA ANO A ANO ALEMANHA



FONTE: elaborado pelo autor com dados do EIA (2023)

Já o caráter de evolução da potência e da geração elétrica na Alemanha segue tendências parecidas com a brasileira: enquanto a potência cresce linearmente, a geração segue de algumas oscilações. De 2017 a 2020 houve uma diminuição da geração de eletricidade no país, porém houve uma revertida no cenário no ano de 2021, pós-pandemia.

TABELA 4 - PORCENTAGEM DE GERAÇÃO POR FONTE ALEMANHA

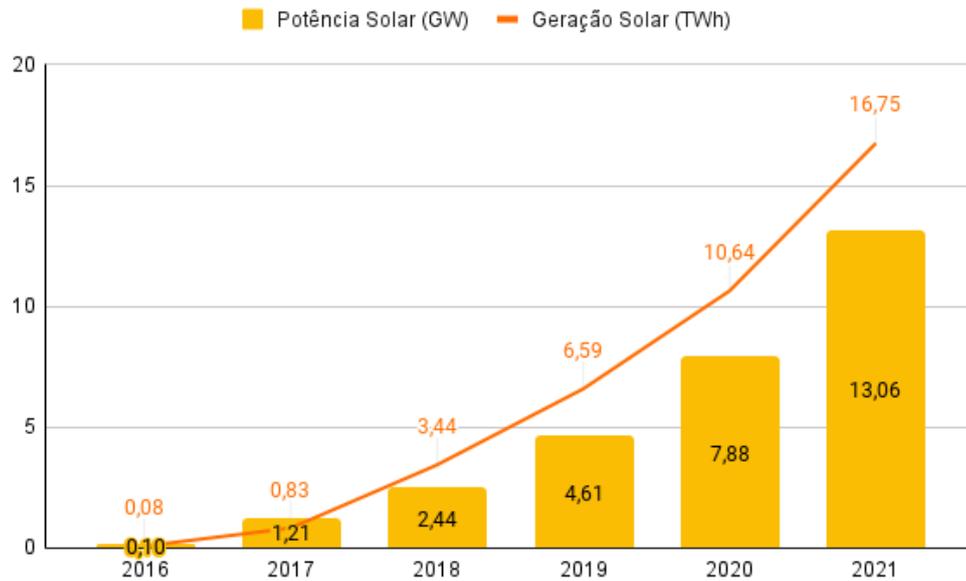
Ano	% Térmica Renovável	% Nuclear	% Térmica Fóssil	% Eólica	% Hidrelétrica	% Solar
2017	9,39%	11,64%	53,03%	16,73%	2,86%	6,36%
2018	9,54%	11,83%	51,17%	17,76%	2,54%	7,16%
2019	9,87%	12,29%	45,75%	21,40%	3,01%	7,69%
2020	10,48%	11,17%	42,72%	23,78%	2,92%	8,92%
2021	8,96%	11,75%	46,83%	20,40%	3,08%	8,98%

FONTE: elaborado pelo autor com dados do EIA (2023)

Ao analisar o percentual de geração por fonte na Alemanha, diferentemente do Brasil, as variações em relação à participação de cada fonte foram mais discretas. De fato, com uma menor participação das fontes nucleares, o pilar da geração elétrica do país ainda é o Térmico Fóssil. Um ponto interessante, devido o ponto em que a toda a política pública de expansão renovável alemã vende uma matriz de fato limpa, o que em um primeiro momento se faz verdade para a potência instalada, o mesmo cenário não possui o mesmo peso para a geração, principalmente devido o *gap* entre o percentual de geração e potência em relação a matriz da fonte Solar e seu fator de capacidade baixo.

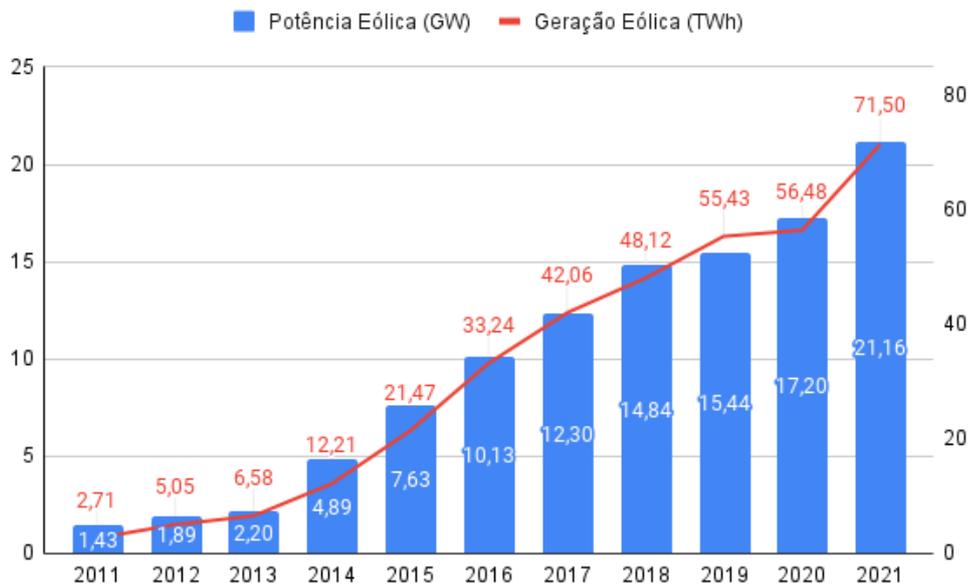
Em relação às fontes intermitentes no Brasil, existe uma curva de crescimento diferente das demais tendências da matriz. A fonte solar, desde 2016, cresceu em uma quase perfeita curva exponencial, um ponto interessante de expansão, mesmo com uma participação geral na geração elétrica pequena, a tendência é de crescimento acelerado para a fonte. Já a fonte eólica também apresenta uma característica de curva semelhante, no entanto, não tão acentuada. Ambas estão em expansão acelerada com inserção relevante na matriz.

GRÁFICO 7 - GERAÇÃO E POTÊNCIA SOLAR NO BRASIL



FONTE: elaborado pelo autor com dados do EIA (2023)

GRÁFICO 8 - GERAÇÃO E POTÊNCIA EÓLICA NO BRASIL

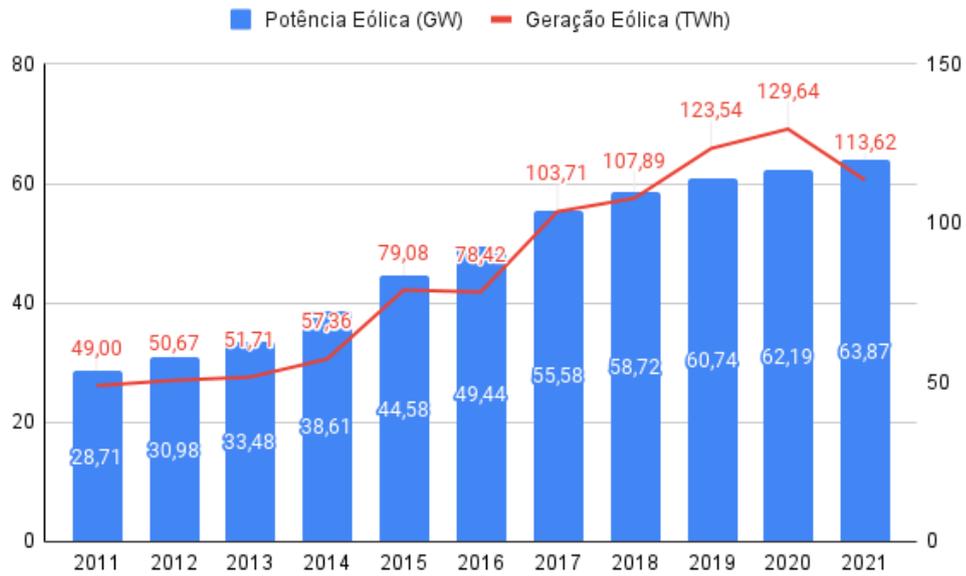


FONTE: elaborado pelo autor com dados do EIA (2023)

Já as curvas alemãs não foram tão agressivas. Embora com crescimento expressivo de geração - ambas próximas de o dobro de geração em cada fonte nos últimos 10 anos - o mesmo não reflete no ritmo de crescimento de potência,

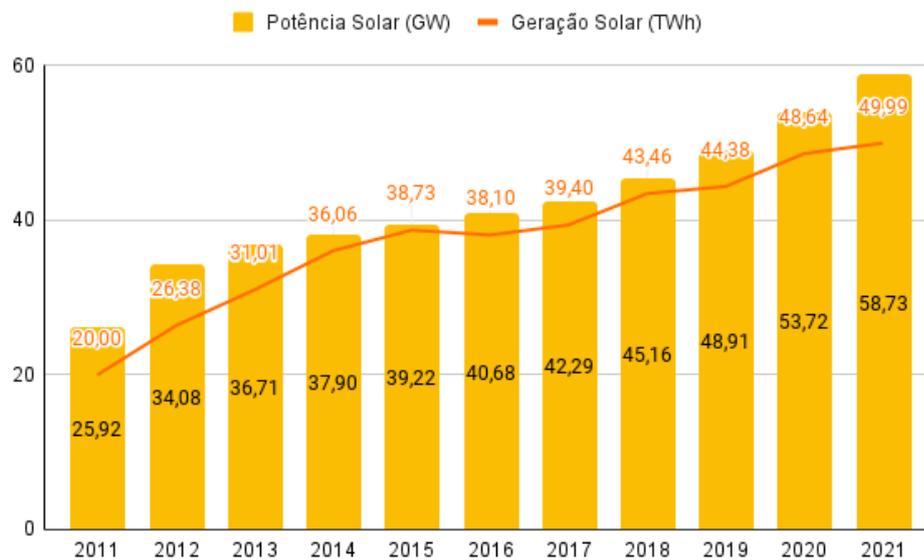
participação da matriz e, se em relação à realidade brasileira, o fator climático incidente na relação do fator de capacidade é relevante.

GRÁFICO 9 - GERAÇÃO E POTÊNCIA EÓLICA NA ALEMANHA



FONTE: elaborado pelo autor com dados do EIA (2023)

GRÁFICO 10 - GERAÇÃO E POTÊNCIA SOLAR NA ALEMANHA



FONTE: elaborado pelo autor com dados do EIA (2023)

TABELA 5 - PORCENTAGEM RENOVÁVEL ALEMANHA X BRASIL

Tipo	País	Solar + Eólica	% Renovável	% Fóssil
Potência	Brasil	16,69%	78,03%	21,97%
	Alemanha	48,97%	57,49%	42,51%
Geração	Brasil	13,32%	75,84%	24,16%
	Alemanha	29,38%	41,42%	58,58%

FONTE: elaborado pelo autor com dados do EIA (2023)

Por fim, ao analisar para o ano de 2021, o percentual de fonte solar e eólica frente ao total renovável e fóssil da matriz para os dois países tem-se o seguinte. O parque solar e eólico do Brasil possui um *gap* de potência para geração próxima a 3%, enquanto isso, o alemão beira os 20%, uma quebra significativa quando levada em consideração a análise de porcentagem renovável no sistema. A Alemanha possui uma matriz, em relação a potência, mais renovável do que fóssil, com 57,49%, mas sua geração reflete em apenas 41,42% de caráter renovável. Enquanto isso no Brasil, a mesma proporção é bem menor, com um *gap* próximo de 3% também para a porcentagem total.

Isso leva a pontos essenciais a serem colocados em pauta. Os desmanches de usinas nucleares alemãs e política de expansão renovável oriunda da *energiewende* reflete bem na opinião pública, no entanto, se analisarmos uma efetividade de transição em relação a investimento e abolição de uma geração majoritariamente fóssil existem pontos de atenção. Como mencionado no arquivo no de Benchmarking internacional (FACTO ENERGY, 2018), a expansão renovável alemã deveria ser acompanhada da expansão também da fonte hídrica e térmica renovável. Tirando a primeira da pauta por limitações físicas, um aumento na geração térmica com o uso de fontes renováveis é um ponto de melhoria latente, levando em conta a inércia da mesma quanto a aumento de potência, geração e porcentagem de produção de eletricidade no país.

#### 4.2 CRIAÇÃO DO MODELO

O cenário de modelo de expansão foi caracterizado pela estipulação de expansão renovável intermitente do governo Alemão, além da característica flexível das fontes presentes em ambos os países. De antemão foi necessário elencar um

ponto: a matriz brasileira por si só é mais flexível que a Alemã (devido ao grande potencial hidrelétrico instalado no país), assim, as inserções renováveis são bem mais facilitadas para a realidade do Brasil. No entanto, existem peculiaridades a serem levadas em consideração.

A meta de crescimento de eletricidade bruta gerada por fontes renováveis até 2035 é de 60% para a Alemanha (AGORA ENERGIEWENDE, 2019). O recorte de geração dos últimos anos é demonstrado na Tabela 6:

TABELA 6 - PORCENTAGEM DE GERAÇÃO ELÉTRICA ALEMANHA HISTÓRICA

Ano	% Térmica Renovável	% Nuclear	% Térmica Fóssil	% Eólica	% Hidrelétrica	% Solar
2011	7,47%	17,72%	60,15%	8,51%	2,67%	3,47%
2012	8,41%	15,93%	59,37%	8,57%	3,26%	4,46%
2013	8,66%	15,32%	58,84%	8,60%	3,43%	5,16%
2014	9,41%	15,51%	56,40%	9,69%	2,90%	6,09%
2015	9,39%	14,19%	54,45%	12,93%	2,70%	6,33%
2016	9,46%	13,00%	55,66%	12,73%	2,97%	6,19%
2017	9,39%	11,64%	53,03%	16,73%	2,86%	6,36%
2018	9,54%	11,83%	51,17%	17,76%	2,54%	7,16%
2019	9,87%	12,29%	45,75%	21,40%	3,01%	7,69%
2020	10,48%	11,17%	42,72%	23,78%	2,92%	8,92%
2021	8,96%	11,75%	46,83%	20,40%	3,08%	8,98%

FONTE: elaborado pelo autor com dados do EIA (2023)

Os pontos levantados nesse cenário são os seguintes: estimar uma média para as fontes térmicas renováveis e hidrelétricas no caso alemão devido uma baixa variação e a partir de 2023 a geração nuclear será igual à zero. Com isso, a projeção das fontes ficou determinada apenas pelas fontes térmica fóssil, solar e eólica.

Ao ver o quanto o sistema é flexível temos a análise é a seguinte: adotar a fonte hidrelétrica e as térmicas fósseis e renováveis movidas a gás (Gás Natural e Biogás) e renovável movida biocombustível líquido como flexíveis, a porcentagem das renováveis flexíveis é de 80% (FNR, 2020) e 35% nas térmicas fósseis (AGEB, 2023). Com isso, leva-se em conta uma porcentagem de fontes flexíveis que deve ser mantido ao longo dessa projeção para que as fontes intermitentes sejam

inseridas de forma adequada. Ao analisar o ano de 2021, estipulando ele como uma base de análise tem-se um total do percentual de geração 26,64% flexível, será usado esse valor para estabelecer o limite mínimo a partir do percentual de crescimento. O valor encontrado então foi de 54,4%.

Para estimar o quanto as fontes crescem foi analisado a média da variação anual da solar e da eólica pelo período:

TABELA 7 - VARIAÇÃO MÉDIA POR FONTE INTERMITENTE ALEMANHA

Fonte	Varição Média	% do Total
<b>Solar</b>	0,55%	32%
<b>Eólica</b>	1,19%	68%

FONTE: elaborado pelo autor com dados do EIA (2023)

Com isso, foi usada a porcentagem do total como um índice de ponderação no crescimento de ambas ao longo dos anos. Com isso, chegou-se na equação de expansão para a Alemanha:

$$\text{Expansão solar Ano } x = \frac{[0,6 - (G_e(2021) + G_s(2021) + \text{Média}(G_H) + \text{Média}(G_{TR}))]}{14} * 0,32 + G_s(x-1) \quad (5)$$

$$\text{Expansão eólica Ano } x = \frac{[0,6 - (G_e(2021) + G_s(2021) + \text{Média}(G_H) + \text{Média}(G_{TR}))]}{14} * 0,68 + G_e(x-1) \quad (6)$$

No qual  $G_e$  corresponde a geração eólica,  $G_s$  a geração solar,  $G_H$  a geração hidrelétrica e  $G_{TR}$  a geração Térmica Renovável.

Assim, o valor projetado para 2035 de porcentagem de eletricidade é de:

TABELA 8 - PROJEÇÃO PARA 2035 ALEMANHA

Ano	% Térmica Renovável	% Nuclear	% Térmica Fóssil	% Eólica	% Hidrelétrica	% Solar
<b>2035</b>	9,19%	0,00%	40,00%	32,98%	2,94%	14,89%

FONTE: elaborado pelo autor com dados do EIA (2023)

Para manter a flexibilidade, a ideia seria a manutenção da porcentagem térmica fóssil via gás natural junto com o desmanche das fontes a carvão, mantendo

o nível mínimo estimado para esse caso. De qualquer forma, se todas as usinas a carvão fossem substituídas para usinas flexíveis e ainda todas as térmicas renováveis possuírem alta flexibilidade, a proporção de flexibilidade com esse crescimento em relação a 2021 não é estabelecida, faltando flexibilidade no sistema alemão. Para parâmetros de criação do modelo, o total de 60% para a Alemanha será mantido para a projeção brasileira. Assim, chega-se a uma porcentagem de eletricidade partilhada entre fontes eólica e solar de 47,87%, usando esse valor como meta no Brasil. O índice de proporcionalidade das fontes no Brasil gerado foi de:

TABELA 9 - VARIAÇÃO MÉDIA POR FONTE BRASIL

Fonte	Varição Média	% do Total
Solar	0,50%	33%
Eólica	1,03%	67%

FONTE: elaborado pelo autor com dados do EIA (2023)

Seguindo uma projeção linear para o Brasil nos anos seguintes, as fontes térmicas renováveis e nucleares mantiveram uma média com a mesma proporção em relação ao aumento de geração. À medida que as fontes intermitentes cresceram a fonte térmica fóssil foi diminuindo a chegar a zero e assim o restante foi subtraído da fonte hidrelétrica, que seguiu a mesma lógica das primeiras fontes, porém com uma diminuição à medida que as fontes solar e eólica crescessem em excesso. Com isso, chega-se também nas equações de projeção para as fontes intermitentes com os coeficientes e metas de geração do Brasil.

$$\text{Expansão solar Ano } x = \frac{[0,4787 - (G_e(2021) + G_s(2021) + \text{Média}(G_H) + \text{Média}(G_{TR}))]}{14} * 0,33 + G_s(x-1)$$

(7)

$$\text{Expansão eólica Ano } x = \frac{[0,4787 - (G_e(2021) + G_s(2021) + \text{Média}(G_H) + \text{Média}(G_{TR}))]}{14} * 0,67 + G_e(x-1)$$

(8)

TABELA 10 - PROJEÇÃO DE GERAÇÃO BRASIL

Ano	% Térmica Renovável	% Nuclear	% Térmica Fóssil	% Eólica	% Hidrelétrica	% Solar
2035	6,55%	1,84%	0,74%	29,25%	50,00%	11,62%

FONTE: elaborado pelo autor com dados do EIA (2023)

Assim, mantendo um valor de 50% da fonte hidrelétrica, somados das fontes flexíveis renováveis, temos então uma possibilidade bem próxima de um limite estabelecido de transposição de matriz. Além disso, é perceptível o retorno da inserção térmica fóssil à medida que o limite hidrelétrico foi estabelecido. A partir do ano de 2033, o crescimento intermitente em questão de geração seria estagnado devido à limitação de flexibilidade das hidrelétricas baseados na literatura. De qualquer forma, com essa limitação o total intermitente na matriz fica projetado em 40,87%, estabelecendo assim um modelo possível de ser implementado frente à flexibilidade do Brasil. Assim, usando o fator de capacidade médio para as fontes chegamos à geração de eletricidade e potência instalada da fonte nos anos subsequentes na Tabela 11 de:

TABELA 11 - PROJEÇÃO ANO A ANO BRASIL

Ano	Geração Total (TWh)	Geração Eólica (TWh)	Geração Solar (TWh)	Potência Eólica (GW)	Potência Solar (GW)
2022	662,60	82,46	22,15	27,44	16,18
2023	662,60	93,41	27,54	31,08	20,12
2024	668,13	105,24	33,22	35,02	24,27
2025	678,53	118,10	39,26	39,30	28,68
2026	688,94	131,30	45,47	43,69	33,22
2027	699,34	144,85	51,85	48,20	37,88
2028	709,75	158,74	58,41	52,82	42,67
2029	720,15	172,97	65,13	57,56	47,58
2030	730,56	187,55	72,02	62,41	52,61
2031	741,0	202,48	79,08	67,38	57,77
2032	751,4	217,74	86,31	72,46	63,05
2033	761,8	222,81	88,50	74,14	64,65
2034	772,2	225,85	89,71	75,16	65,54
2035	782,6	228,90	90,92	76,17	66,42

FONTE: elaborado pelo autor com dados do EIA (2023)

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após analisar dados de geração de eletricidade do Brasil e da Alemanha foi possível estimar um modelo de projeção das fontes renováveis intermitentes para o Brasil usando como parâmetro políticas públicas alemãs e a manutenção da flexibilidade da matriz elétrica.

Além disso, os dados dispostos mostraram a superioridade da realidade climática brasileira frente à Alemanha a partir de um fator de capacidade superior para as fontes eólica e solar. Foi também constatado o acelerado crescimento de potência instalada dessas fontes da Alemanha não é transposto da mesma forma para a Alemanha, chegando em uma limitação operacional que ainda a deixa dependente de fontes fósseis.

O modelo foi então projetado para um *mix* de geração de fontes intermitentes somadas em 47,87% até o ano de 2035. A projeção para a Alemanha acabou extrapolando o proporcional referente ao ano de 2021. Para o Brasil, ao estabelecer um limite de 50% para a fonte hidrelétrica, as fontes intermitentes param de expandir na porcentagem de geração no ano de 2033, totalizando em 40,87% de geração intermitente na matriz como ponto máximo. A partir de um fator de capacidade médio serão necessários de 76,17 GW eólicos instalados e 66,42 GW solares instalados. O valor da porcentagem total de geração para a Alemanha apresenta números complexos para a manutenção da flexibilidade do sistema, como mostra o limite de 30% das fontes em Huber, Dimkova e Hamacher (2014) No entanto, devido às características brasileiras de possuir um sistema interconectado e alta carga de fontes flexíveis, o valor encontrado chega abaixo da porcentagem total proposta por Schmidt, Cancelli e Pereira (2016) de 46%.

O aumento das fontes renováveis intermitentes acarretaria em uma mudança sistêmica da rede ao adotar reservatórios hídricos como armazenamento de energia e backup de geração, ao passo que elas aumentem sua penetração no sistema devido a complementaridade proposta em WWF (2012), mudando um perfil hídrico-térmico para hídrico-solar-eólico.

Por fim, é essencial um avanço gradual de outros pontos latentes de flexibilidade do sistema como a manutenção das redes de transmissão, métodos de operação, gerenciamento de demanda e armazenamento, que devem andar

juntamente com a manutenção do suprimento elétrico flexível, potencializando a inserção das fontes renováveis intermitentes no SIN.

## REFERÊNCIAS

- AGEB. **Gross electricity production in Germany**. 2023. Disponível em: <https://www.destatis.de/EN/Themes/Economic-Sectors-Enterprises/Energy/Production/Tables/gross-electricity-production.html>. Acesso em: 01 maio 2023.
- AGORA ENERGIEWENDE. **A Energiewende em resumo: 10 perguntas e respostas sobre a transição energética alemã**. 10 perguntas e respostas sobre a transição energética alemã. 2019. Disponível em: [https://emaisenergia.org/wp-content/uploads/2021/03/156\\_A-Energiewende-em-resumo\\_PT\\_WEB.pdf](https://emaisenergia.org/wp-content/uploads/2021/03/156_A-Energiewende-em-resumo_PT_WEB.pdf). Acesso em: 01 maio 2023.
- AGORA ENERGIEWENDE. **UMA PALAVRA SOBRE FLEXIBILIDADE**. 2018. Disponível em: <https://emaisenergia.org/wp-content/uploads/2021/03/Uma-palavra-sobre-flexibilidade.pdf>. Acesso em: 01 maio 2023.
- BASE. **The nuclear phase-out in Germany**. 2023. Disponível em: [https://www.base.bund.de/EN/ns/nuclear-phase-out/nuclear-phase-out\\_node.html#:~:text=The%20last%20three%20nuclear%20power%20plants%20in%20Germany%20were%20shut,April%202023%20at%20the%20latest..](https://www.base.bund.de/EN/ns/nuclear-phase-out/nuclear-phase-out_node.html#:~:text=The%20last%20three%20nuclear%20power%20plants%20in%20Germany%20were%20shut,April%202023%20at%20the%20latest..) Acesso em: 01 maio 2023.
- CARVALHO, Joaquim Francisco de. Energia e sociedade. **Estudos Avançados**, [S.L.], v. 28, n. 82, p. 25-39, dez. 2014. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0103-40142014000300003>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ea/a/GYqnmvDvtGtr8N5zdsYdj5j/?lang=pt>. Acesso em: 1 maio 2023.
- CASTRO, Nivalde de; MEDEIRO, Luiz Homero C.. **Análise de Metodologias para suportar a expansão das fontes intermitentes de Energia Renovável na Matriz Elétrica**. 2020. Disponível em: <https://www.canalenergia.com.br/artigos/53128214/analise-de-metodologias-para-suportar-a-expansao-da>. Acesso em: 01 maio 2023.
- CLEW. **Germany's Energiewende in brief**. 2017. Disponível em: <https://www.cleanenergywire.org/germanys-energiewende-brief>. Acesso em: 01 maio 2023.
- CONNOLLY, Kate. **Germany to delay phase-out of nuclear plants to shore up energy security**. 2022. Disponível em: <https://www.theguardian.com/world/2022/sep/05/germany-to-delay-phase-out-of-nuclear-plants-to-shore-up-energy-security>. Acesso em: 01 maio 2023.
- COSMO, Bruno Marcos Nunes; GALERIANI, Tatiani Mayara; NOVAKOSKI, Fabiula Patricia; RICINI, Bruna Martins. Carvão mineral. **Revista Agronomia Brasileira**, [S.L.], v. 4, n. 1, p. 1-10, 2020. Revista Agronomia Brasileira. <http://dx.doi.org/10.29372/rab202001>. Disponível em: <https://www.fcav.unesp.br/Home/ensino/departamentos/cienciasdaproducaoagricola/laboratoriomatologia-labmato/revistaagronomiabrasileira/rab202001.pdf>. Acesso em: 1 maio 2023.

ECO.A. **A Energia que queremos**. 2016. Disponível em: [https://ecoa.org.br/wp-content/uploads/2017/05/998f41\\_16a988bd6cff45399bfaa6181e938ec4.pdf](https://ecoa.org.br/wp-content/uploads/2017/05/998f41_16a988bd6cff45399bfaa6181e938ec4.pdf). Acesso em: 01 maio 2023.

EIA. **ABOUT EIA**. 2011. Disponível em: <https://www.eia.gov/about/>. Acesso em: 01 maio 2023.

ENERGIA HOJE. **Fator de Capacidade**. 2023. Disponível em: <https://energiahoje.editorabrasilenergia.com.br/glossario/fator-de-capacidade>. Acesso em: 05 maio 2023.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **BEN 50 anos**. Brasília: Epe, 2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Documents/BEN%2050%20anos.pdf>. Acesso em: 01 maio 2023.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **BEN: relatório síntese 2022**. Brasília: Epe, 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao>. Acesso em: 01 maio 2023.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Flexibilidade e Capacidade: conceitos para a incorporação de atributos ao planejamento**. Brasília: Epe, 2018. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-316/NT\\_EPE\\_DEE-NT-067\\_2018-r0.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-316/NT_EPE_DEE-NT-067_2018-r0.pdf). Acesso em: 01 maio 2023.

ESFERA ENERGIA. **Sistemas Interligado Nacional: como funciona e quais são os prós e contras do sin. como funciona e quais são os prós e contras do SIN**. 2021. Disponível em: <https://blog.esferaenergia.com.br/fontes-de-energia/sistema-interligado-nacional>. Acesso em: 01 maio 2023.

EXAME. **Energia solar fotovoltaica: Brasil é o 4º país que mais cresceu em 2021**. 2022. Disponível em: <https://exame.com/esg/energia-solar-fotovoltaica-brasil-e-o-4o-pais-que-mais-cresceu-em-2021/>. Acesso em: 01 maio 2023.

FACTO ENERGY. **Benchmarking Internacional: expansão da geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis**. Rio de Janeiro: [S.l.], 2018.

FERNANDES, Djair Roberto. Uma contribuição sobre a construção de indicadores e sua importância para a gestão empresarial. **Revista da Fae**, [s. l.], v. 7, n. 1, p. 1-18, jan. 2004.

FLÁVIO, Silvan Antônio. **PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO DE SISTEMAS DE TRANSMISSÃO COM ELEVADA PARTICIPAÇÃO DE FONTES RENOVÁVEIS**. 2015. 175 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2015.

FNR. **BIOENERGY IN GERMANY FACTS AND FIGURES 2020**. 2020. Disponível em: [https://www.fnr.de/fileadmin/allgemein/pdf/broschueren/broschuere\\_basisdaten\\_bioenergie\\_2020\\_engl\\_web.pdf](https://www.fnr.de/fileadmin/allgemein/pdf/broschueren/broschuere_basisdaten_bioenergie_2020_engl_web.pdf). Acesso em: 01 maio 2023.

GIANELLONI, Francesco Tommaso; CÂMARA, Lorrane da Silva Costa. Desafios Da Difusão De Fontes De Geração Não Controláveis No Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO, 10., 2016, Rio de Janeiro. **Anais [...] .** Gramado: Cbpe, 2016. p. 1-13. Disponível em: [https://gesel.ie.ufrj.br/app/webroot/files/publications/47\\_xcbpe0139.pdf](https://gesel.ie.ufrj.br/app/webroot/files/publications/47_xcbpe0139.pdf). Acesso em: 01 maio 2023.

GROWITSCH, Christian; HÖFFLER, Felix. Fukushima and German Energy Policy 2005 – 2015/2016. **Ewi Working Paper**, Köln, v. 19, n. 2, p. 1-17, jan. 2019. Disponível em: [https://www.ewi.uni-koeln.de/cms/wp-content/uploads/2019/02/EWI\\_WP\\_19-02\\_Fukushima\\_and\\_German\\_Energy\\_Policy\\_2005bis2015-2016.pdf](https://www.ewi.uni-koeln.de/cms/wp-content/uploads/2019/02/EWI_WP_19-02_Fukushima_and_German_Energy_Policy_2005bis2015-2016.pdf). Acesso em: 1 maio 2023.

HOCKENOS, Paul. **Is Germany Making Too Much Renewable Energy?** 2021. Disponível em: <https://foreignpolicy.com/2021/02/10/is-germany-making-too-much-renewable-energy/>. Acesso em: 01 maio 2023.

HOCKENOS, Paul. **The social impact of Germany's energy transition.** 2014. Disponível em: <https://www.cleanenergywire.org/dossiers/social-impact-germanys-energy-transition>. Acesso em: 01 maio 2023.

HOICKA, Christina E.; ROWLANDS, Ian H.. Solar and wind resource complementarity: advancing options for renewable electricity integration in ontario, canada. **Renewable Energy**, [S.L.], v. 36, n. 1, p. 97-107, jan. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2010.06.004>.

HUBER, Matthias; DIMKOVA, Desislava; HAMACHER, Thomas. Integration of wind and solar power in Europe: assessment of flexibility requirements. **Energy**, [S.L.], v. 69, p. 236-246, maio 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2014.02.109>.

IBM. **O que é uma API de REST?** 2020. Disponível em: <https://www.ibm.com/br-pt/topics/rest-apis>. Acesso em: 01 maio 2023.

IEA - INTERNACIONAL ENERG AGENCY. **World Energy Outlook 2021.** [S.l.]: Iea, 2021. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/4ed140c1-c3f3-4fd9-acae-789a4e14a23c/WorldEnergyOutlook2021.pdf>. Acesso em: 01 maio 2023.

IEA. **The Power of Transformation.** 2014. Disponível em: [https://iea.blob.core.windows.net/assets/b6a02e69-35c6-4367-b342-2acf14fc9b77/The\\_power\\_of\\_Transform](https://iea.blob.core.windows.net/assets/b6a02e69-35c6-4367-b342-2acf14fc9b77/The_power_of_Transform). Acesso em: 01 maio 2023.

IEMA. **Prioridades para a integração das fontes renováveis variáveis no sistema elétrico.** 2016. Disponível em: <https://energiaeambiente.org.br/wp-content/uploads/2016/01/FS-INTEGRACAO.pdf>. Acesso em: 01 maio 2023.

LOHMANN, Sarah. **Germany Has a Math Problem, and It's about to Get Worse.** 2021. Disponível em: <https://www.aicgs.org/2021/09/germany-has-a-math-problem-and-its-about-to-get-worse/>. Acesso em: 01 maio 2023.

LOSEKANN, Luciano. **A intermitência da geração renovável:** A trajetória do sistema elétrico brasileiro. 2016. Disponível em: <https://editorabrasilenergia.com.br/intermitencia-da-geracao-renovavel-trajetoria-do-sistema-eletrico-brasileiro/>. Acesso em: 01 maio 2023.

LUSTFELD, Hans. Energy supply based on wind-solar power in Germany. **Discover Energy**, [S.L.], v. 2, n. 1, p. 1-12, 5 abr. 2022. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s43937-022-00007-9>. Disponível em: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s43937-022-00007-9.pdf>. Acesso em: 1 maio 2023.

MEDEIROS, Luiz Homero Câmara. **ANÁLISE ESTATÍSTICA COM EMPREGO DA REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA DA SUAVIZAÇÃO DA VARIABILIDADE DA ENERGIA GERADA POR AGREGADOS DE PLANTAS FOTOVOLTAICAS CONECTADAS AO SIN.** 2018. 87 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/32045/1/DISSERTA%C3%87%C3%83O%20Luiz%20Homero%20C%C3%A2mara%20Medeiros.pdf>. Acesso em: 01 maio 2023.

MILLSAP, Rachel Elizabeth. **The German Gamble:** an analysis of the energiewende policy and its implications for energy security in europe. 2018. 149 f. Tese (Doutorado) - Curso de Mestrado em Ciência, Missouri State University, University City, 2018.

MONFORTI, F.; HULD, T.; BÓDIS, K.; VITALI, L.; D'ISIDORO, M.; LACAL-ARÁNTGUI, R.. Assessing complementarity of wind and solar resources for energy production in Italy. A Monte Carlo approach. **Renewable Energy**, [S.L.], v. 6363, n. 1, p. 576-586, mar. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2013.10.028>.

ONS - Operador Nacional do Sistema. **O que é o SIN?** Disponível em: <https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-que-e-o-sin>. Acesso em: 01 maio 2023.

ONS - Operador Nacional do Sistema. **Sistemas Isolados.** 2022. Disponível em: <https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/sistemas-isolados>. Acesso em: 01 maio 2023.

OACLE. **O que é Big Data?** Disponível em: <https://www.oracle.com/br/big-data/what-is-big-data/>. Acesso em: 01 maio 2023.

PASCHOARELI JUNIOR, Dionizio. **Introdução aos Sistemas Flexíveis e Controladores.** São Paulo: Unesp, 2007. Color. Disponível em: <https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/facts.pdf>. Acesso em: 01 maio 2023.

PASQUINELLI, Matteo. **O algoritmo do PageRank do Google**:: um diagrama do capitalismo cognitivo e da exploração da inteligên. Londres: Transaction Publishers, 2017. Disponível em: [http://matteopasquinelli.com/docs/Pasquineli\\_PageRank\\_pt.pdf](http://matteopasquinelli.com/docs/Pasquineli_PageRank_pt.pdf). Acesso em: 01 maio 2023.

PASTOR, João Cesar Silva; MACEDO, Ana Vitória de Almeida. PANORAMA ATUAL E PERSPECTIVAS FUTURAS DAS FONTES DE ENERGIA RENOVÁVEIS INTERMITENTES NO NORDESTE BRASILEIRO. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 8., 2020, Cabo de Santo Agostinho. **Anais [...]**. Fortaleza: [S.l.], 2020. p. 1-11.

PERON, Alexandre Mattos. Análise da complementaridade das gerações intermitentes no planejamento da operação eletro-energética da região nordeste brasileira. **Unicamp**, [S.L.], v. 1, n. 1, p. 1-119, ago. 2017. Universidade Estadual de Campinas - Repositorio Institucional. <http://dx.doi.org/10.47749/t/unicamp.2017.989064>.

PRADO, Fernando Amaral de Almeida. How much is possible? An integrative study of intermittent and renewables sources deployment. A case study in Brazil. **Renewable-Energy-Driven Future**, [S.L.], p. 511-538, 2021. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-820539-6.00017-0>.

RIBEIRO, Anna Carolina Mendonça Lemos; SANTOS, Carlos Denner dos. Isso não é uma pirâmide:: revisando o modelo clássico de dado, informação, conhecimento e sabedoria. **Revista Ciência da Informação**, Brasília, v. 49, n. 2, p. 67-87, 01 jun. 2020. Disponível em: <https://revista.ibict.br/ciinf/article/view/5066/5247>. Acesso em: 1 maio 2023.

ROMEIRO, Diogo Lisboa; FERRAZ, Clarice. O PROTAGONISMO DAS NOVAS ENERGIAS RENOVÁVEIS E O DESAFIO DE REMUNERAR A MAIOR FLEXIBILIDADE EXIGIDA AOS SISTEMAS ELÉTRICOS. **Revista Brasileira de Energia**, Rio de Janeiro, v. 22, n. 2, p. 68-83, fev. 2016. Disponível em: <https://sbpe.org.br/index.php/rbe/article/view/359/340>. Acesso em: 1 maio 2023.

SANTOS, José Alexandre Ferraz de Andrade; JONG, Pieter de; COSTA, Caiuby Alves da; TORRES, Ednildo Andrade. Combining wind and solar energy sources: potential for hybrid power generation in brazil. **Utilities Policy**, [S.L.], v. 67, n. 1, p. 84-101, dez. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jup.2020.101084>.

SCHMIDT, Johannes; CANCELLA, Rafael; PEREIRA, Amaro O.. An optimal mix of solar PV, wind and hydro power for a low-carbon electricity supply in Brazil. **Renewable Energy**, [S.L.], v. 85, p. 137-147, jan. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2015.06.010>.

TCU - Tribunal de Contas da União. **Energias Renováveis**: auditoria coordenada. Brasília: Tcu, 2019. Disponível em: [https://portal.tcu.gov.br/data/files/8F/42/72/E2/A500371055EB6E27E18818A8/Energias\\_renovaveis\\_portugues.pdf](https://portal.tcu.gov.br/data/files/8F/42/72/E2/A500371055EB6E27E18818A8/Energias_renovaveis_portugues.pdf). Acesso em: 01 maio 2023.

TOLMASQUIM, Mauricio T.. **PRINCIPAIS MECANISMOS DE VIABILIZAÇÃO DAS FONTES INTERMITENTES NO SISTEMA ELÉTRICO LATINOAMERICANO::** medidas operacionais e geração flexível. Caracas: Caf, 2017.

TOLMASQUIM, Mauricio Tiomno. **Energia Renovável:** hidráulica, biomassa, eólica, solar, oceânica. Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica. 2016. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-172/Energia%20Renov%C3%A1vel%20-%20Online%2016maio2016.pdf>. Acesso em: 01 maio 2023.

WARTSILA. **Valor da flexibilidade em sistemas com uma alta participação de hidrelétricas:** o caso do brasil. [S.l.]: Wartsila, 2021. Disponível em: <https://www.wartsila.com/docs/default-source/power-plants-documents/downloads/white-papers/americas/the-value-of-flexibility-in-power-systems-brazil-pt.pdf>. Acesso em: 01 maio 2023.

WWF. **Além de grandes hidrelétricas:** políticas para fontes renováveis de energia elétrica no brasil. Políticas para fontes renováveis de energia elétrica no Brasil. 2012. Disponível em: [https://d3nehc6yl9qzo4.cloudfront.net/downloads/alem\\_de\\_grandes\\_hidreletricas\\_su\\_mario\\_para\\_tomadores\\_de\\_decisao.pdf](https://d3nehc6yl9qzo4.cloudfront.net/downloads/alem_de_grandes_hidreletricas_su_mario_para_tomadores_de_decisao.pdf). Acesso em: 01 maio 2023.