

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

GEAN LUCAS RAFAEL ESPINDOLA

**AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS CAUSADOS POR LIMITAÇÕES
ARBITRADAS DE POTÊNCIA ATIVA EM PLANTAS
EOLIOELÉTRICAS: um estudo de caso inferencial, descritivo e
bayesiano**

FLORIANÓPOLIS, 2023.

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

GEAN LUCAS RAFAEL ESPINDOLA

**AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS CAUSADOS POR LIMITAÇÕES
ARBITRADAS DE POTÊNCIA ATIVA EM PLANTAS
EOLIOELÉTRICAS: um estudo de caso inferencial, descritivo e
bayesiano**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido
ao Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia de Santa Catarina como parte
dos requisitos para obtenção do título de
Engenheiro Eletricista.

Orientador:
Prof. Everthon Taghori Sica, Dr. Eng.

FLORIANÓPOLIS, 2023.

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Espindola, Gean Lucas Rafael

AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS CAUSADOS POR LIMITAÇÕES ARBITRADAS DE POTÊNCIA ATIVA EM PLANTAS EOLIOELÉTRICAS: um estudo de caso inferencial, descritivo e bayesiano / Gean Lucas Rafael Espindola; orientação de Everthon Taghori Sica. - Florianópolis, SC, 2023.

55 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. Bacharelado em Engenharia Elétrica. Departamento Acadêmico de Eletrotécnica.

Inclui Referências.

1. Restrição de Geração. 2. Limitação de Geração.
3. Constrained-off. 4. Curtailment. 5. Margem de Escoamento.
I. Sica, Everthon Taghori. II. Instituto Federal de Santa Catarina. III. AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS CAUSADOS POR LIMITAÇÕES ARBITRADAS DE POTÊNCIA ATIVA EM PLANTAS EOLIOELÉTRICAS.

**AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS CAUSADOS POR LIMITAÇÕES
ARBITRADAS DE POTÊNCIA ATIVA EM PLANTAS
EOLIOELÉTRICAS: um estudo de caso inferencial, descritivo e
bayesiano**

GEAN LUCAS RAFAEL ESPINDOLA

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro Eletricista e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 04 de julho, 2023.

Banca Examinadora:



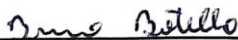
Prof. Everthon Taghori Sica, Dr. Eng.
Instituto Federal de Santa Catarina



Prof. Daniel Tenfen, Dr. Eng.
Instituto Federal de Santa Catarina



Eng. Lucas Nunes
Statkraft Energias Renováveis S.A



Eng. Bruno Botelho
Statkraft Energias Renováveis S.A

Dedico este trabalho à minha mãe Kate, ao meu pai Rafael, que nunca deixaram de me incentivar a estudar e sempre foram a minha base, à minha irmã Jhenifer e ao Gilberto que sempre foram presentes e torceram por mim e, especialmente, à minha amada esposa Liliane que desde o momento que nos conhecemos sempre esteve ao meu lado, constantemente me motivando e me fazendo querer ser uma pessoa melhor.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por permitir aproveitar todas as oportunidades que surgiram em meu caminho.

Agradeço à minha esposa Liliane, que conheci durante a minha passagem no IFSC, se constante apoio e alento têm sido essenciais em minha vida. A ela, meu mais sincero agradecimento por ser minha companheira de vida, confidente e por compartilhar comigo todas as alegrias e desafios.

Agradeço à minha família que me deu estrutura para seguir em frente e vencer todos os desafios que surgiram nessa trajetória. Considero muito as palavras dos meus pais e avós para sempre continuar estudando.

Agradeço aos amigos que adquiri ao longo da graduação, em especial ao Paulo José e Leocardia, pessoas que estiveram sempre comigo.

Agradeço aos professores do IFSC, que sempre se mostraram dispostos a ensinar e contribuir para a minha formação. Sou especialmente grato ao meu orientador, Professor Sica, por estar sempre disponível quando precisei, por ter sido paciente com as minhas limitações e por acreditar no tema escolhido e na minha capacidade de abordá-lo.

Agradeço aos membros da banca, professor Tenfen, professor Sica e meus colegas de trabalho, por terem aceitado avaliar o meu trabalho e por contribuírem no meu aprendizado.

Por fim, agradeço a todos membros do Centro de Operação da Statkraft, principalmente ao Robson Guimarães, ao Bruno Botelho e ao Lucas Nunes por terem me aceitado na equipe e por fazerem questão de impulsionar o meu desenvolvimento profissional e pessoal, espero sempre poder retribuí-los.

RESUMO

Por decorrência do aumento dos gases de efeito estufa (GEE), as mudanças climáticas se mostram cada vez mais preocupantes para os países e os motivaram a reduzir suas emissões de GEE e atingir o *net zero* até 2050, conforme estabelecido no Acordo de Paris. Muitos países, principalmente da Europa, buscam cada vez mais novas tecnologias associadas à produção de energia elétrica, cujo modo de produção tem grande impacto na redução do aquecimento global. Porém, a descarbonização do setor energético, principalmente por consequência da produção de energia elétrica através de fontes renováveis, como, eólica e solar, tem evoluído rapidamente com os incentivos para o investimento desses empreendimentos. Isso provocou um descasamento entre a produção de geração de energia elétrica e o sistema de transporte dessas energias, também devido a característica de rápida implementação de construção que as usinas eólicas e solares possuem, diferentemente da velocidade de implementação do sistema de transmissão, que acontece de forma mais lenta. No Brasil, mesmo com a grande capacidade de armazenamento do sistema interligado, devido à grande representatividade das hidrelétricas no Sistema Interligado Nacional (SIN), a insuficiência de margem do escoamento de energia elétrica por linhas de transmissão pode ser condicionada pela celeridade na expansão da geração, fazendo com que os agentes geradores tenham a produção dos seus ativos restringida pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), devido às limitações e à necessidade de reforços no sistema de transmissão. Em razão da natureza de imprevisibilidade dos ventos, as usinas eólicas tendem a sofrer essas restrições de geração recorrentemente. Notavelmente, esse não é o único problema que provoca a limitação arbitrada da potência ativa nos parques eólicos, podendo ocorrer também por conta da diferença entre a oferta e a demanda instantânea de energia, sendo estes dois agentes causadores de restrições denominados *Curtailment*, ou ainda podendo ser causado por falhas nos componentes elétricos do sistema, este último denominado *Constrained-off*. O ONS visa garantir o suprimento da carga do SIN e prezar por operá-lo de forma segura, e na ocorrência dos casos mencionados, cabe ao ONS limitar a produção de energia elétrica para assegurar a estabilidade do SIN. O trabalho denota um estudo de caso das limitações de geração, de um complexo eólico localizado na Bahia, por meio de ferramentas da estatística inferencial, descritiva e análise bayesiana. As restrições foram analisadas de forma a mapear as perdas na produção de energia elétrica provocadas por *Curtailment* e *Constrained-off*, e apontar possíveis alternativas para o aproveitamento dessa energia restringida, com o objetivo de reduzir impactos ao agente gerador eólico.

Palavras-chave: Restrição de Geração. Limitação de Geração. Intercâmbio de Energia. *Constrained-off*. *Curtailment*. Margem de Escoamento.

ABSTRACT

Due to the increase in greenhouse gas emissions (GHGs), climate change is becoming increasingly concerning for countries, prompting them to reduce their GHG emissions and achieve net zero by 2050, as established in the Paris Agreement. Many countries, mainly in Europe, are increasingly seeking new technologies associated with electricity production, the mode of which has a significant impact on reducing global warming. However, the decarbonization of the energy sector, primarily due to electricity production from renewable sources such as wind and solar, has rapidly evolved with incentives for investment in these ventures. This has led to a mismatch between electricity generation and the transmission system, also due to the rapid construction implementation characteristic of wind and solar power plants, unlike the slower pace of transmission system implementation. In Brazil, despite the large storage capacity of the interconnected system, given the significant representation of hydroelectric power plants in the National Interconnected System (SIN), the insufficiency of the electricity flow through transmission lines can be constrained by the speed of expansion of electricity generation. As a result, generating agents may have their asset production restricted by the National Electric System Operator (ONS) due to transmission system limitations and the need for reinforcements. Because of the unpredictable nature of winds, wind power plants tend to experience these generation restrictions frequently. Notably, this is not the only issue that causes arbitrary limitation of active power in wind power plants; it can also occur due to the difference between instantaneous energy supply and demand, both of which are agents causing restrictions known as Curtailment. Additionally, restrictions can be caused by faults in the electrical components of the system, the latter known as Constrained-off. The ONS aims to ensure the supply of SIN's load and operate it safely. In the occurrence of the mentioned cases, it is the responsibility of the ONS to limit electricity production to ensure SIN's stability. This study presents a case study of generation constraints in a wind complex located in Bahia, using inferential statistics, descriptive analysis, and Bayesian analysis tools. The restrictions were analyzed to map the losses in electricity production caused by Curtailment and Constrained-off and to identify possible alternatives for utilizing this restricted energy, with the aim of reducing impacts on the wind generating agent.

Keywords: Generation Restriction. Generation Limitation. Energy Exchange. Constrained-off. Curtailment. Transmission Margin.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Consumo de energia elétrica do Brasil	19
Figura 2 - Balanço de energia do dia 05/02/2022 às 19h57min	20
Figura 3 - Perfil mensal do vento.....	28
Figura 4 - Perfil diário do vento	29
Figura 5 - Gráfico de energia produzida e energia esperada para o dia 10/05/2020	37
Figura 6 - Gráfico de energia produzida e energia esperada para o dia 29/08/2021	39
Figura 7 - Gráfico de energia produzida e energia esperada para o dia 03/04/2022	40
Figura 8 - Histograma das durações dos eventos	42
Figura 9 - Gráfico densidade probabilidade das durações dos eventos	43
Figura 10 - Gráfico distribuição de probabilidade das durações dos eventos	44
Figura 11 - Histograma das limitações de potência ativa	45
Figura 12 - Histograma dos logaritmos naturais dos percentuais de limitação de potência ativa.....	45
Figura 13 - Gráfico densidade dos logaritmos naturais dos percentuais de limitação de potência ativa.....	46
Figura 14 - Gráfico distribuição de probabilidade dos logaritmos naturais doe percentuais de limitação de potência ativa	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Perda de produção de energia elétrica em 2020	37
Tabela 2 - Perda de produção de energia elétrica em 2021	38
Tabela 3 - Perda de produção de energia elétrica em 2022	40
Tabela 4 - Horas acumuladas de limitações por ano	41
Tabela 5 - Valores dos percentis calculados em horas	43
Tabela 6 – Valores dos percentis calculados em MW.....	46
Tabela 7 - Probabilidades de ocorrências individuais por razão e origem	47
Tabela 8 - Probabilidade de ocorrência simultânea entre razão e origem	48
Tabela 9 - Probabilidade de ocorrência condicional entre razão e origem.....	48
Tabela 10 - Probabilidade de eventos de restrição maiores que 1 hora	49

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACL	Ambiente de Contratação Livre
ACR	Ambiente de Contratação Regulado
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BMC	Conjunto Eólico Brotas de Macaúbas
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
CMSE	Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico
CNF	Razão de Atendimento a Requisitos de Confiabilidade Elétrica
CNPE	Conselho Nacional de Política Energética
ENE	Razão Energética
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GEE	Gases de Efeito Estufa
LOC	Restrição de Origem Local
MAC	Usina de Energia Eólicoelétrica Macaúbas
MAE	Mercado Atacadista de Energia Elétrica
MME	Ministério de Minas e Energia
MUST	Montante de Uso do Sistema de Transmissão
NHZ	Usina de Energia Eólicoelétrica Novo Horizonte
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PIE	Produtor Independente de Energia
REL	Razão de Indisponibilidade Elétrica
SEA	Usina de Energia Eólicoelétrica Seabra
SEB	Sistema Elétrico Brasileiro
SIS	Restrição de Origem Sistêmica

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Justificativa	13
1.2	Definição do Problema	15
1.3	Objetivo Geral.....	16
1.4	Objetivos Específicos	16
1.5	Estrutura do Trabalho.....	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1	Intercâmbio de Energia Elétrica.....	18
2.2	Limitações de Produção de Energia Elétrica.....	21
2.3	Indisponibilidade Técnica e Operacional.....	22
2.4	Aspectos Regulatórios no Brasil	23
2.5	Curtailment e Constrained-off em Parques Eólicoelétricos no Cenário Mundial.....	25
2.5.1	China.....	25
2.5.2	Irlanda	26
2.5.3	Japão	26
3	ESTUDO DAS LIMITAÇÕES DE POTÊNCIA ATIVA EM UM COMPLEXO EÓLICO NA BAHIA	27
3.1	Conjunto Eólico Brotas de Macaúbas	27
3.1.1	Perfil do Vento.....	27
3.1.2	Aerogerador	29
3.1.3	Subestação Elevadora	29
3.1.4	Ponto de Conexão	30
3.2	Metodologia do Estudo de Caso.....	30
3.2.1	Primeira Abordagem	31
3.2.2	Segunda Abordagem	32
4	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS E ANÁLISE DO ESTUDO DE CASO.....	36
4.1	Análise e discussão dos resultados da primeira abordagem	36
4.1.1	Perdas por limitação arbitrada de potência ativa em 2020	36
4.1.2	Perdas por limitação arbitrada de potência ativa em 2021	38
4.1.3	Perdas por limitação arbitrada de potência ativa em 2022	39
4.2	Análise e discussão dos resultados da segunda abordagem	41
4.2.1	Estudo das durações dos eventos	41
4.2.2	Estudo dos valores de limitação dos eventos	44
4.2.3	Probabilidades condicionais.....	47
4.2.4	Estatística Bayesiana.....	49
5	CONCLUSÃO	51
5.1	Proposta de trabalhos futuros	52
	REFERÊNCIAS	53

1 INTRODUÇÃO

Com o contínuo desenvolvimento e crescimento econômico do país, a demanda por energia elétrica tem se tornado cada vez mais premente e crucial. Ao passo que o consumo de energia elétrica aumenta, o Sistema Elétrico Brasileiro (SEB) é gradativamente expandido ou confrontado com opções de gerenciamento pelo lado da demanda, de resposta da demanda e de conservação e eficiência energética (EPE, 2021).

Com o aumento da oferta de energia elétrica, espera-se uma expansão da rede de transmissão, para que o transporte dessa energia seja efetuado de forma segura e confiável. Em razão disso, o tema sobre a falta de margem para o escoamento de energia elétrica nos pontos mais críticos do sistema de transmissão, que por muitas vezes propiciam cortes arbitrados de geração em parques eólicos, é recorrente entre os agentes do setor de energia elétrica.

Como todo sistema têm limitações operativas, muitas vezes não é possível entregar toda a energia que um gerador é capaz de produzir para um ponto de consumo. Isso pode ocorrer devido a própria capacidade de transporte de energia elétrica das linhas de transmissão, pela indisponibilidade de algum dispositivo ou equipamento que constituem essas linhas, ou ainda por uma falha nesses equipamentos que não provoquem sua indisponibilidade, mas que trazem algum tipo de restrição para o seu correto funcionamento, afetando a sua performance e a sua confiabilidade (ANEEL, 2021).

Sabendo que estes eventos de restrição são arbitrados e, portanto, considerados pelo agente gerador responsável pela gestão do ativo afetado, como perdas não-gerenciáveis nos seus indicadores, é de suma importância o seu mapeamento para identificação do impacto causado e realizar estudos buscando alternativas para solucionar o problema.

1.1 Justificativa

O Sistema Elétrico Brasileiro (SEB) é composto pelas unidades consumidoras, bem como pelos sistemas de geração, transmissão e distribuição, sendo que as linhas de transmissão estão interligadas. Assim, a expansão da

transmissão deve acompanhar a expansão da geração, pois o sistema de transmissão deve suportar o transporte e suprimento de energia. Contudo, a celeridade na expansão da geração pode ser condicionada pela falta da margem de escoamento de energia nas Linhas de Transmissão (LT). Dessa forma, os empreendimentos atuais de geração de energia elétrica podem ter restrições de produção devido à lentidão nas ampliações e nos reforços das linhas de transmissão (EPE, 2021).

Por conta disso, o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), responsável pela operação do Sistema Interligado Nacional (SIN), ocasionalmente, solicita a redução da produção de energia elétrica para os agentes de geração, conforme as seguintes classificações de limitação: as restrições de produção em função da indisponibilidade de equipamentos exógenos à usina; a insuficiência na capacidade de transporte de energia das linhas de transmissão; e as restrições por razão energética, quando a oferta de geração supera a demanda energética (ANEEL, 2021).

Dentre as fontes que compõem a matriz de energia elétrica, a hídrica é a que mais produz eletricidade no Brasil, seguida por fontes de geração térmica e pela fonte de geração eólica (EPE, 2022). Dado o elevado grau de dependência das hidrelétricas, o SIN torna-se vulnerável diante das crises hídricas, nesse sentido, a diversificação das fontes para a produção de energia elétrica se torna indispensável. As usinas eólicas de grande porte têm um custo de implementação relativamente baixo, quando comparadas com usinas que utilizam outras fontes (EPE; MME, 2021). Porém, elas apresentam uma característica de variabilidade na geração de eletricidade, pois dependem da incidência do vento em velocidade ideal para tanto.

A principal função do ONS é controlar o SIN em função da minimização do custo marginal de operação, mantendo o equilíbrio entre a oferta e a demanda de energia elétrica e os padrões de tensão e frequência, visando o equilíbrio dinâmico das LTs (ONS, 2021). À vista disso, a incapacidade de escoamento das LTs pode acarretar cortes de geração de usinas dotadas de recursos primários de elevada variabilidade.

Dessa forma, supondo hipoteticamente um aumento da demanda de energia no subsistema Sudeste/Centro-Oeste (SE/CO), uma oferta maior de energia do subsistema Nordeste (NE), que tem um cenário ideal para a produção de energia

eólica, poderia ser limitada pela insuficiência das LTs, ou por outro tipo de restrição já mencionado, para o intercâmbio desta energia. Para esse caso, por exemplo, existe a possibilidade de um impedimento da produção energética de uma usina eólicoelétrica, que poderia ofertar mais energia. Esse impedimento é denominado *curtailment*, que pode variar o impacto causado ao agente gerador eólico dependendo da dimensão da limitação imposta (GODOI; MONTENEGRO, 2021).

Devido ao *constrained-off*, a disponibilidade operativa dos parques eólicos, bem como outros indicadores de confiabilidade, pode sofrer variações negativas, consideradas de caráter exógeno à usina. Portanto, a busca por alternativas para o aproveitamento da energia restringida, com o objetivo de reduzir os impactos financeiros que o agente sofreria por não estar produzindo toda a energia que poderia, tornou-se um fator importante a ser estudado (GODOI; MONTENEGRO, 2021).

1.2 Definição do Problema

Em março de 2021, foi publicada a Resolução Normativa (REN) nº 927/2021 da ANEEL, que estabelece os procedimentos e os critérios para apuração e pagamento de restrição de operação por *constrained-off* de usinas eólicoelétricas. A resolução afirma que o agente de geração pode ser financeiramente ressarcido quando a restrição de geração é motivada pela indisponibilidade em instalações exógenas à respectiva usina, ao qual o agente representa (ANEEL, 2021). Em contrapartida, para casos de insuficiência na capacidade de transporte de energia das linhas de transmissão e para o caso de razão energética, o agente não é amparado com o ressarcimento, pois estas são classificações de limitação que desviam dos critérios definidos na resolução.

Por esse motivo, existe uma grande preocupação dos agentes de geração em garantir a confiabilidade dos aerogeradores, visto que a indisponibilidade operacional ou o menor aproveitamento do recurso eólico provocado pelas limitações, podem causar perdas financeiras significativas. Nesse sentido, para compreender a dimensão das perdas e melhorar a gestão dos ativos, sugere-se verificar a relação entre estes cortes arbitrados na produção de energia eólicoelétrica e a disponibilidade operacional de usinas eólicas, bem como as consequências e os impactos que isto

pode representar para elas, assim como as possibilidades de aproveitamento da energia restringida.

1.3 Objetivo Geral

Verificar os impactos que os cortes arbitrados da produção de energia eolioelétrica causam para os agentes detentores de concessão de parques eólicos, utilizando os dados de classificação de ocorrências de uma usina eólica como base para o estudo, a fim de validar a busca por alternativas para o aproveitamento da energia frustrada.

1.4 Objetivos Específicos

Para atingir a finalidade do estudo e fracionar o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos do trabalho são:

- a) identificar as principais causas que dão origem aos cortes de geração eolioelétrica;
- b) realizar o tratamento estatístico dos dados das ocorrências de *constrained-off* e *curtailment* que a usina eólica sofreu num período de três anos;
- c) estudar os impactos provocados pelas restrições de geração e;
- d) comprovar a necessidade de abordar outras formas de uso da energia frustrada.

1.5 Estrutura do Trabalho

Inicialmente é apresentado o cenário e a temática em que o estudo proposto para o trabalho se enquadra, evidenciando um aumento da oferta de energia elétrica nos últimos anos, e que por decorrência desse aumento de demanda, espera-se que sejam promovidos avanços tanto na produção de energia elétrica, quanto no desenvolvimento dos sistemas de transmissão, para suportar o atendimento da carga

de forma segura e confiável. A definição do problema também é inicialmente apresentada, assim como os objetivos propostos para trabalho.

No capítulo 2 é realizada uma revisão da literatura para compreensão e embasamento dos assuntos abordados posteriormente no trabalho, principalmente sobre as questões regulatórias que foram impulsionadas pela falta de margem de escoamento de energia elétrica no SEB.

O capítulo 3 apresenta o estudo de caso, bem como as metodologias utilizadas nas abordagens realizadas sobre as limitações de potência ativa.

No capítulo 4 são demonstrados os resultados das abordagens realizadas no estudo de caso, que foi apresentado no capítulo anterior.

O capítulo 5 expõe as conclusões extraídas dos estudos realizados ao longo do trabalho e, por fim, são apontadas algumas propostas de trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Segundo a EPE (2021), a potência instalada de energia elétrica renovável em 1980 no Brasil era de aproximadamente 27,6 GW renovável e de 5,8 GW de energia elétrica não renovável. Por decorrência do aumento populacional ao longo dos anos, a expansão da geração tornou-se significativa, no ano de 2022, o país estava com 83% das usinas sendo consideradas sustentáveis, sendo que aproximadamente 12% da capacidade instalada era proveniente de fontes eólica, fazendo com que a matriz fosse considerada hidro-térmica-eólica. (ANEEL, 2022).

Um dos principais fatores do rápido crescimento de fontes eólicas no Brasil foi por decorrência da Lei Nº 9.427/1996, que trouxe incentivos aos agentes geradores para a produção de energia renovável no país. Além disso, o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA) desempenhou um papel significativo nesse sentido, impulsionando a rápida construção de empreendimentos eólicos e contribuindo para o grande crescimento dessa fonte no país (SANTOS, 2022).

O rápido crescimento da expansão da geração de energia eólica apresenta um desafio, uma vez que o sistema de transmissão não consegue acompanhar esse crescimento de forma imediata. Isso ocorre devido à demora na implantação do sistema de transmissão, principalmente dos trâmites regulatórios e ambientais. Como resultado, os empreendimentos de geração de energia elétrica existentes podem enfrentar restrições de produção devido à necessidade de ampliação e reforço das linhas de transmissão (SANTANA, 2015).

Entretanto, esse crescimento ocorre de maneira descentralizada, o que significa que os pontos de produção nem sempre estão próximos dos pontos de consumo. Nesse sentido, a característica de interligação entre os subsistemas do SIN torna-se uma vantagem, conforme abordado no subtópico a seguir.

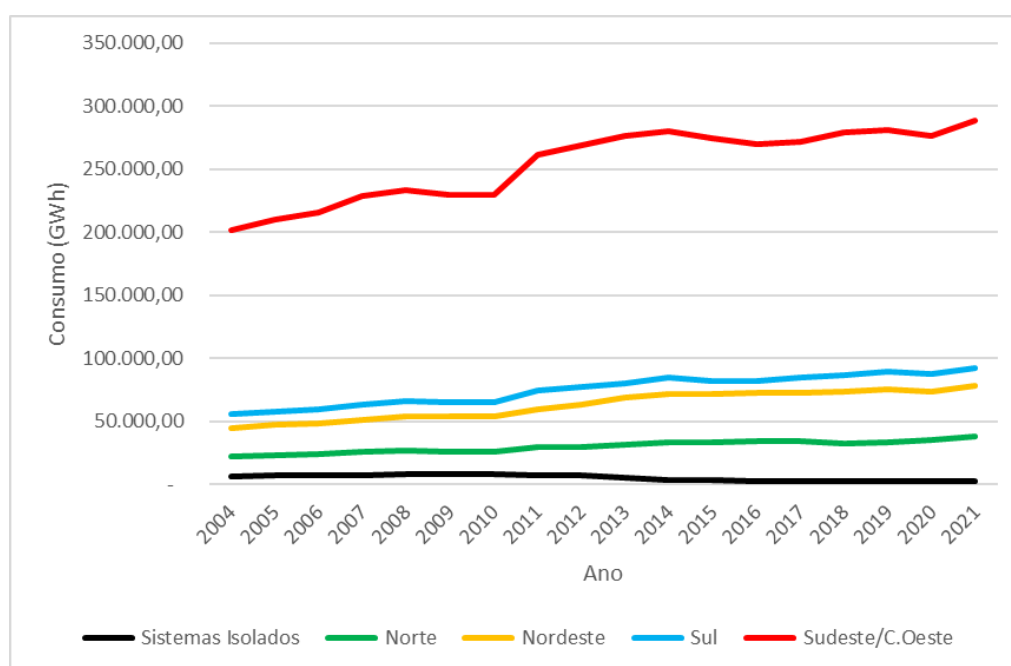
2.1 Intercâmbio de Energia Elétrica

Em razão da extensão territorial do país, o SIN é decomposto em subsistemas, sendo eles: Sul, Sudeste/Centro-Oeste, Nordeste e Norte. Cada subsistema possui particularidades quanto ao perfil de geração e de consumo. Uma

das vantagens de o sistema ser interligado é a possibilidade de haver intercâmbio de energia elétrica entre os subsistemas, assim um subsistema que produz mais do que consome, pode transferir o excedente produzido para outro subsistema que necessita deste suprimento.

O subsistema SE/CO é o maior consumidor de energia elétrica do SIN, conforme ilustrado na Figura 1, uma vez que estas duas regiões geográficas acumulam os maiores centros de carga do país.

Figura 1 - Consumo de energia elétrica do Brasil



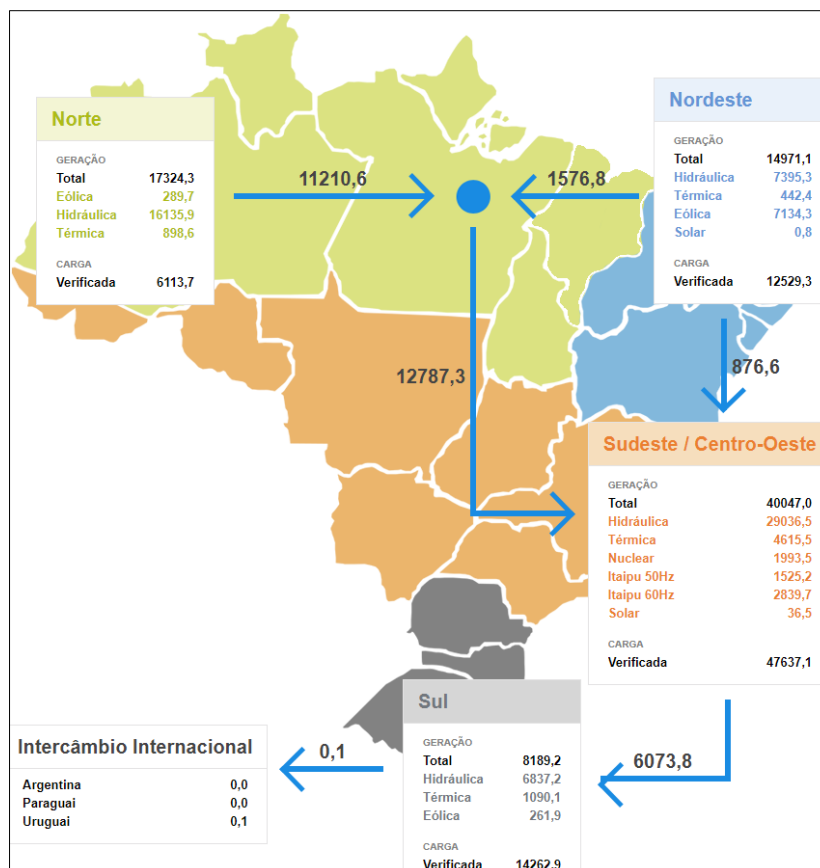
Fonte: EPE, 2022.

No ano de 2020, o subsistema SE/CO foi responsável por aproximadamente 43,3% de toda a produção de energia elétrica do Brasil, seguido pelos subsistemas Nordeste, Norte e Sul, com 19,6%, 19,5% e 17,6%, respectivamente (EPE, 2021b). Já em relação ao consumo de energia elétrica, o subsistema NE foi responsável por 15,4% do atendimento à demanda, ou seja, o restante desta energia foi escoado para outro subsistema, dinâmica que se torna possível devido as interligações do SIN (EPE, 2022).

É possível verificar um exemplo dessa situação na Figura 2, que mostra os dados instantâneos de geração e carga para cada subsistema e o valor de intercâmbio de energia entre eles para o dia 05/02/2022 às 19h57min. Nota-se que o subsistema NE está produzindo mais energia que consumindo e o subsistema SE/CO está

consumindo mais do que produzindo. Neste sentido, parte da energia produzida pelo subsistema NE é transferida para o subsistema SE/CO.

Figura 2 - Balanço de energia do dia 05/02/2022 às 19h57min



Fonte: ONS, 2022.

No entanto, ainda na Figura 2, percebe-se que o subsistema Norte também produz mais energia que consome, mas ainda assim recebe a outra parte da energia excedente produzida pelo subsistema Nordeste. Isto ocorre porque existem limitações do sistema de transmissão para efetuar o intercâmbio de energia entre os subsistemas NE e SE/CO.

Quando não é possível escoar toda a energia que se pode produzir em um subsistema para outro, o ONS restringe a geração deste subsistema para controlar o fluxo de energia nas condições suportadas pelas linhas de transmissão responsáveis pelo intercâmbio de energia (ONS, 2020).

Dessa forma, para restringir a energia que poderia ser produzida em um subsistema, o ONS precisa limitar a geração de usinas deste subsistema. Por possuir uma característica de variabilidade na produção de energia, as usinas eólicas tendem

a sofrer mais com esse tipo de limitação, já que nada garante que o montante de energia gerado em um instante de tempo será produzido em um instante de tempo à frente (ONS, 2020).

2.2 Limitações de Produção de Energia Elétrica

Conforme mencionado anteriormente as fontes renováveis como, eólica e solar, são fontes cuja construção ocorre mais rapidamente, diferentemente do sistema de transmissão de escoamento dessa energia, acarretando o descasamento entre a expansão da geração e do sistema de transmissão (SANTANA, 2015).

O sistema de transmissão do SIN enfrenta problemas devido à falta de margem de escoamento de energia elétrica, deste modo os agentes de geração estão sendo afetados por cortes de geração. Para esse caso, por exemplo, existe a possibilidade de um impedimento da produção energética de uma usina eolioelétrica, que poderia ofertar mais energia. Esse impedimento é denominado *constrained-off*, ou frustração de geração, que ocorre em ocasiões de corte de geração de energia, chamado de *curtailment* (GODOI; MONTENEGRO, 2021).

A ANEEL está regulamentando os procedimentos e os critérios para apuração das restrições de operações motivados por *constrained-off* de usinas eolioelétrica através da REN 927/2021 (ANEEL, 2021), revogada pela REN Nº 1.030/2022.

Segundo a REN Nº 1.030/2022, o ONS é responsável por classificar e calcular os cortes de geração e deve disponibilizar informações utilizadas nos cálculos ao público. O ONS classifica essas restrições em três tipos: restrição de produção por decorrência da indisponibilidade de equipamentos exógenos à usina; insuficiência na capacidade de transporte de energia das linhas de transmissão e restrições por razão energética, quando a oferta de geração supera a demanda energética. A contabilização e o pagamento financeiro relativo aos eventos por *constrained-off* são de responsabilidade da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), com base nas informações recebidas do ONS.

Dentre os três tipos de eventos, apenas a razão classificada como indisponibilidade exógena às instalações da usina é passível de ressarcimento

financeiro, vale ressaltar, que o ressarcimento ocorre a partir de certa quantidade de horas de corte de geração, onde essa quantidade de horas é atualizada pelo ONS todos os anos, desta forma os agentes de geração são assegurados a partir da quantidade de horas de cortes, apenas de limitações de razão elétrica. Portanto, esses agentes arcam com o prejuízo dessa energia frustrada (ANEEL, 2019).

2.3 Indisponibilidade Técnica e Operacional

Para classificar os eventos mencionados anteriormente, o ONS em conjunto com o agente gerador efetua o levantamento de dados de ocorrências de disponibilidade e indisponibilidade operativa. Para tanto, é necessário entender a diferença entre disponibilidade e indisponibilidade técnica e operacional.

A disponibilidade operacional é entendida como a fração de um determinado período em que um aerogerador está produzindo. As horas de operação perdidas por qualquer motivo são incluídas como indisponibilidade operacional. Já a disponibilidade técnica é entendida como a fração de um determinado período em que um aerogerador está operando de acordo com suas especificações de projeto, e a fração de um determinado período em que o aerogerador não está operando motivado por uma ação corretiva planejada ou por interrupção forçada é compreendida como indisponibilidade técnica (IEC, 2019).

Com base no que foi exposto acima, entende-se que, sempre que o aerogerador está fora de operação, o período é contabilizado no cálculo da disponibilidade operacional, ou seja, qualquer tipo de indisponibilidade afeta a disponibilidade operacional da máquina. Diferentemente da disponibilidade técnica, já que somente são contabilizados os períodos de parada por manutenções corretivas planejadas ou interrupções forçadas. Assim, observa-se que os eventos de *constrained-off* e *curtailment* não afetam a disponibilidade técnica de uma usina eolielétrica, apenas a disponibilidade operacional dela.

Dessa forma, busca-se realizar uma classificação precisa das ocorrências de indisponibilidade, facilitando a identificação dos aerogeradores em operação no momento da restrição. Isso permite uma estimativa mais precisa da energia disponível, levando em consideração a curva de produtividade de cada aerogerador

ativo durante o evento de limitação, os dados anemométricos das estações instaladas no parque eólico, a garantia física da usina e os registros dos valores de limitação de geração solicitados em tempo real pelo ONS (ANEEL, 2019).

2.4 Aspectos Regulatórios no Brasil

A primeira estruturação do SEB teve início por volta da década de 70 através da publicação da Lei Nº 5.655/71, que trouxe o "custo do serviço" nas tarifas dos consumidores, com o intuito de cobrir custos dos agentes de geração, distribuição e transmissão. Até o início da década de 90 o modelo do SEB tinha empresas predominantemente estatais, onde os recursos do financiamento desses empreendimentos eram recursos públicos, ou seja, não havia competição no SEB, acarretando uma estagnação do setor (CCEE, 2010).

A partir desse momento o governo tomou outras medidas, a fim de trazer mais competição e o setor privado para o SEB, esse marco teve início com a Lei Nº 9.074/1995 criando a figura do Produtor Independente de Energia (PIE), trazendo a possibilidade de uma empresa privada produzir e comercializar energia elétrica no país (CCEE, 2010).

Na sequência o governo instaurou a reestruturação do SEB, onde identificou-se a necessidade de criação de um órgão regulador ANEEL de um operador para o sistema elétrico nacional o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) e um órgão responsável pela compra e venda de energia elétrica o Mercado Atacadista de Energia Elétrica (MAE), hoje reestruturado e chamado de Câmara de comercialização de Energia Elétrica (CCEE), entidades constituídas por meio das Leis nº 9.427/96 e nº 9.648/98, dos Decretos nº 2.335/97 e nº 2.655/98 e da Resolução ANEEL nº 351/98 (CCEE, 2010).

Em 2001 o país passou por uma grave crise de racionamento de energia elétrica, trazendo vários questionamentos dos agentes do setor e da população de como o setor elétrico estava sendo implementado, então o governo publicou a Leis Nº 10.847/2004, 10.848/2004 e o Decreto Nº 5.163/2004 que implementou vários setores institucionais em busca de uma maior segurança do setor (SANTANA, 2015).

Destacam-se a criação da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), cuja sua principal função é realizar os estudos voltados para o planejamento energético nacional, do Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico (CMSE) responsável pelo monitoramento para garantir a segurança do suprimento de energia no país, Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) cujo objetivo é a formulação de políticas nacionais e diretrizes de energia, Ministério de Minas e Energia (MME) seu principal objetivo é a formulação e implementação, no âmbito federal, da política energética nacional (SANTANA, 2015).

Essa nova reestruturação buscava três objetivos principais: Promover a modicidade tarifária; garantir a segurança do suprimento de energia elétrica; e promover a inserção social no Setor Elétrico Brasileiro, em particular pelos programas de universalização do atendimento (CCEE, 2010).

Com o novo modelo do SEB, foram criados dois ambientes para realizar os contratos de compra e venda de energia elétrica, ambos são registrados na CCEE. O Ambiente de Contratação Regulado (ACR), no qual a contratação de energia é realizada através de leilões de energia regulados e realizados pela ANEEL, nesse ambiente participam agentes de geração, de comercialização e os agentes de distribuição, que representam os consumidores cativos de energia elétrica. Já o segundo Ambiente de Contratação Livre (ACL), participam agentes de geração, comercialização, importadores e exportadores de energia elétrica e os consumidores livres, onde realizam suas transações bilateralmente, sem intervenção da ANEEL (CCEE, 2023).

Após os diversos incentivos do governo para fontes renováveis de geração de energia e o acelerado processo de construção desses empreendimentos, o sistema de transmissão do SIN tem enfrentado problemas devido à falta de capacidade para escoar energia elétrica. Isso resulta em cortes de geração que afetam os agentes geradores, gerando discussões no SEB sobre as restrições de geração e a necessidade de uma regulamentação mais sólida no país. No entanto, é importante ressaltar que o Brasil não é o único país a enfrentar cortes de geração, como será abordada a seguir a situação enfrentada por outros países.

2.5 Curtailment e Constrained-off em Parques Eólicoelétricos no Cenário Mundial

Conforme mencionado anteriormente, muitos países do mundo tiveram um rápido aumento de geração de energia renovável, especialmente eólica e solar, acarretaram uma grande demanda do sistema de transmissão e que em muitas vezes o sistema de transmissão não suporta toda essa geração de energia que é produzida, trazendo cortes e/ou restrições de gerações chamados de *constrained-off*.

A seguir serão abordados alguns países que sofrem com esse tipo de problema de cortes de geração.

2.5.1 China

Na China, a capacidade eólica instalada atingiu 77,16 GW em 2013, e aproximadamente 10,7% de energia eólica foram cortados em toda a China. As restrições foram mais severas em alguns regiões com altas concentrações de geração eólica, porém há uma baixa demanda de energia elétrica, acarretando uma baixa capacidade de transmissão, impedindo o transporte para outras partes do sistema onde a demanda é maior. Além disso, não há mecanismos flexíveis de precificação de energia que permita a flexibilização do uso da energia elétrica pelo lado da demanda. Em busca de enfrentar os desafios de corte de geração a China tem um projeto piloto de aquecimento-eólico, cujo intuito é utilizar a energia do vento para alimentar aquecedores elétricos durante o inverno e com isso aumentar a demanda de carga local em regiões propensas para a geração eólicoelétrica (Bird et al., 2016).

Decorrente da grande capacidade instalada de fontes de energia renovável conectadas ao sistema de transmissão, e com um consumo insuficiente dessa geração, a China prevê muito cortes de pico de capacidade de geração ao longo dos anos, geralmente áreas com muito recurso eólico normalmente tem excesso de oferta, causando os cortes de geração (SOLARPACES, 2022).

2.5.2 Irlanda

Em 2013, a Irlanda tinha uma capacidade eólica instalada de 2,4 GW, o que equivale a aproximadamente 20,5% da demanda de energia elétrica anual no país e teve uma redução de quase 3,2% de corte de energia eólica. Na Irlanda os principais problema de corte de geração se dá devido: instabilidade do sistema de transmissão; controle de tensão; aumento de carga matinal e limitações da rede, sendo as partes noroeste e sudoeste do sistema de transmissão as mais afetadas. Outras partes da rede também sofreram restrições principalmente devido a interrupções de manutenção (Bird et al., 2016).

2.5.3 Japão

No Japão, foi implementada a Lei de tarifa feed-in que estabelece Medidas Especiais relacionadas à Aquisição de Energia Elétrica Renovável por Operadoras de Serviços Públicos de Energia Elétrica. Segundo essa lei, as concessionárias estão sujeitas a reduzir a energia eólica e solar por no máximo 30 dias, sem compensação. Diante dessa situação, surgiram outros mecanismos para mitigar os impactos dessas reduções, incluindo a instalação de baterias nas plantas de geração pelos agentes envolvidos. Importante mencionar que, no Japão, as fontes renováveis intermitentes não recebem prioridade no despacho de energia (Bird et al., 2016).

ROMAIN (2019) complementa o argumento exposto acima, dizendo que os cortes de geração ocorrem primeiramente nas fontes eólicas e solares, devido à maior dificuldade de ajustar a potência das usinas nucleares no país, o que resulta em uma maior frequência de cortes de geração por essas duas fontes.

3 ESTUDO DAS LIMITAÇÕES DE POTÊNCIA ATIVA EM UM COMPLEXO EÓLICO NA BAHIA

O estudo de caso foi realizado para exemplificar as situações apresentadas nos capítulos anteriores e obter informações adicionais com base em abordagem estatística, para isso foi utilizado o Conjunto Eólico Brotas de Macaúbas (BMC) como objeto do estudo, e as análises realizadas com base nos seus dados operacionais. Os dados foram liberados pelas autoridades do conjunto eólico e considerados dados não confidenciais e não sensíveis para a empresa detentora da concessão do complexo.

3.1 Conjunto Eólico Brotas de Macaúbas

O conjunto eólico está situado nas proximidades da cidade de Seabra, a aproximadamente 600 km ao norte de Salvador, no estado da Bahia. Com capacidade instalada de 95,2 MW, o complexo é composto por três parques eólicos que abrigam um total de 57 aerogeradores, cada um com uma potência de 1,67 MW. Esses aerogeradores estão estrategicamente distribuídos em três usinas: 18 em Seabra (SEA), 18 em Novo Horizonte (NHZ) e 21 em Macaúbas (MAC).

3.1.1 Perfil do Vento

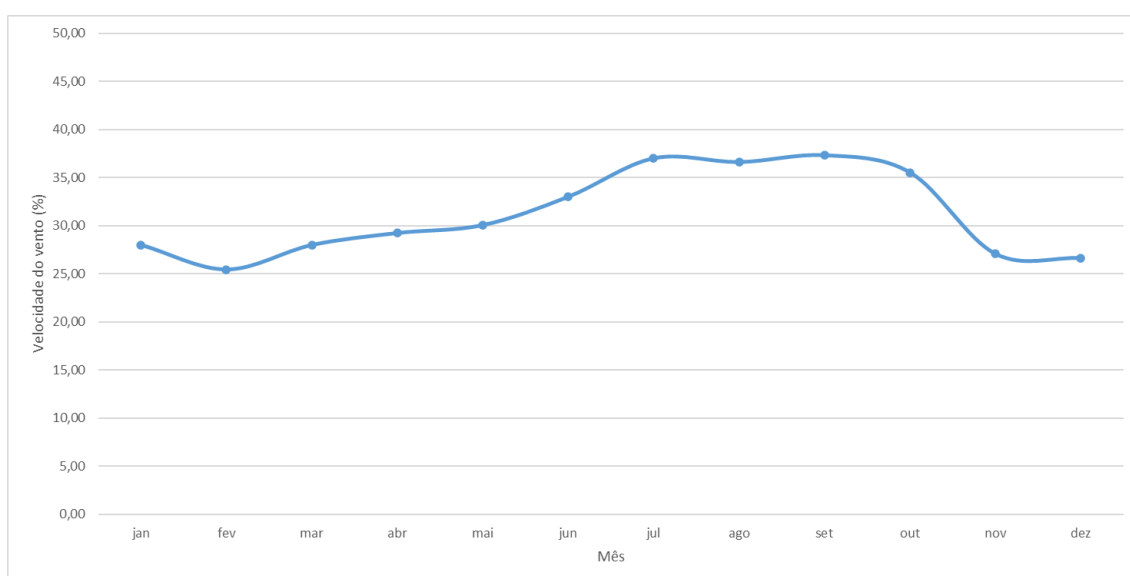
A velocidade do vento é uma variável importante de ser mencionada, visto que ela interfere diretamente na produção de energia elétrica dos aerogeradores e tem grande contribuição nos cortes arbitrados de geração eólicoelétrica motivados por razão de restrição energética e de confiabilidade. Isso pode ser explicado pelo fato de que o período de altos ventos no Nordeste do país afeta a maioria dos parques instalados na região, sendo assim, existem períodos de maior produção, podendo não coincidir com os períodos de maior consumo do país ou então com a capacidade de escoamento de energia elétrica, local ou sistêmica, provocando então as limitações na produção das usinas.

A Figura 3 e a Figura 4 tem o objetivo de ilustrar os perfis de vento mensal e diário, respectivamente, para a região onde o Conjunto Eólico Brotas de Macaúbas, sendo que a variável do eixo y representa o percentual da velocidade média do vento em relação a velocidade de corte dos aerogeradores, para omitir os dados reais em

virtude da sensibilidade da informação, o que não afeta a compreensão do assunto, já que o objetivo é identificar o perfil variável da velocidade média do vento ao longo de um ano e ao longo de um dia.

Na Figura 3, observa-se como a velocidade média do vento varia ao longo dos meses do ano. Percebe-se, pela lógica apresentada anteriormente, que nos meses de perfil de vento mais elevado, há uma tendência de ocorrer *curtailment*. Observa-se que os meses de julho, agosto, setembro e outubro, são os meses de maior incidência de vento na região.

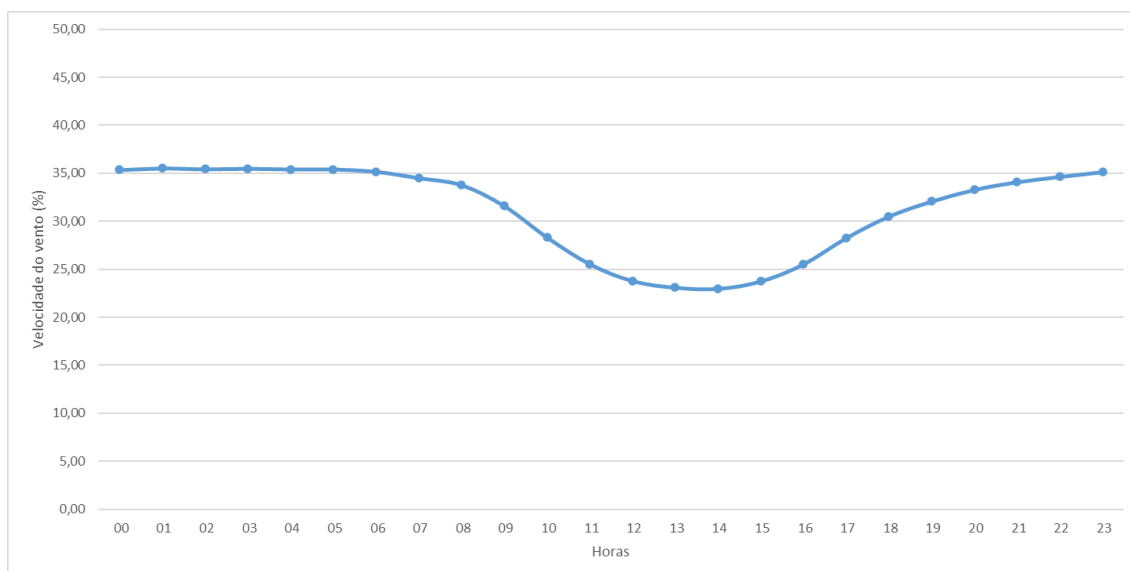
Figura 3 - Perfil mensal do vento



Fonte: Elaboração Própria (2023).

Existe também, para o caso mencionado acima, outro fator que pode ser observado na Figura 4, que é o comportamento da velocidade do vento ao longo de um dia. É possível deduzir que a variação da velocidade do vento pode ser um fator que contribui para a variação dos valores de limitação de potência ativa em um mesmo dia. Notavelmente, como se sabe que o sistema elétrico é dinâmico, entende-se que existem outros fatores que também implicam na variação dessas limitações, como o consumo instantâneo de energia elétrica, o carregamento das linhas, entre outros. Observa-se que existe uma tendência de queda na velocidade do vento no período do meio-dia.

Figura 4 - Perfil diário do vento



Fonte: Elaboração Própria (2023).

3.1.2 Aerogerador

O aerogerador é a máquina responsável por converter a energia cinética do vento em energia mecânica, através do acoplamento do entre as pás e a turbina, e posteriormente, a conversão dessa energia mecânica em energia elétrica, através do acoplamento entre a turbina e o gerador. As turbinas foram fabricadas pela Alstom, modelo ECO86. A velocidade de vento nominal de cada aerogerador é de 14 m/s, a velocidade de vento de partida é de 3 m/s. O gerador opera com rotação nominal de 1.375 rpm, e com tensão elétrica de 690 V. A torre dos aerogeradores tem altura de eixo do rotor de 80 metros do tipo tubular, construída em aço.

3.1.3 Subestação Elevadora

A Subestação Elevadora Brotas de Macaúbas (SE BMC) contém um transformador projetado pela WEG para operar em 60 Hz, com tensões primárias de 230 kV e secundárias de 34,5 kV. Ele utiliza sistemas de ventilação ONAN e ONAF, com ligação primária em estrela e ligação secundária em delta. A potência varia de 15 MVA a 25/33 MVA, dependendo do sistema de ativação utilizado. O setor de 34,5 kV é formado por uma barra onde são conectados os alimentadores dos três parques

eólicos que compõem o complexo, uma conexão para o filtro de harmônicas, um transformador para o serviço auxiliar de BMC e outro transformador para o serviço auxiliar da concessionária de transmissão. Cada parque eólico contém dois alimentadores, onde os aerogeradores estão distribuídos.

3.1.4 Ponto de Conexão

O Conjunto Eólico Brotas de Macaúbas conecta-se ao SIN através do sistema da concessionária de transmissão de energia elétrica CHESF, no sudoeste da área de 230 kV do Subsistema Nordeste, mais especificamente na Subestação Gentio do Ouro II.

É importante salientar que o controle de potência ativa solicitado pelo ONS é no ponto de conexão e é realizado através de um controle conjunto dos aerogeradores de todos os três parques eólicos pelo sistema supervisório onde é realizada a operação de BMC. Desse modo, é possível realizar o estudo de caso considerando o conjunto eólico como se fosse apenas uma usina, já que as limitações de potência ativa são impostas no ponto de conexão, ou seja, para BMC, e não individualmente em cada parque (MAC, NHZ e SEA).

3.2 Metodologia do Estudo de Caso

Para realizar o estudo, foram considerados dois tipos de abordagens, na primeira, foram utilizados os dados de velocidade do vento (m/s), a potência ativa medida (MW) e a potência ativa esperada (MW), que foram disponibilizados pelas autoridades do complexo eólico. Esses dados foram coletados diretamente da base de dados do sistema de controle e supervisão das usinas, através de um sistema gerenciador de dados. Na etapa de extração, é possível definir o período e a forma que os dados serão coletados. Para o estudo, foram considerados dados médios de 10min em 10min para o período de janeiro de 2020 até dezembro de 2022 (3 anos). Nessa primeira abordagem, foram gerados gráficos e tabelas para evidenciar a visualização do problema e ter uma noção de escala das perdas.

Para a segunda abordagem foram levantados os dados dos eventos de limitação de potência ativa do complexo eólico no período de janeiro de 2018 até

dezembro de 2022 (5 anos). Assim, foi construída uma tabela que reúne as informações necessárias para executar análises estatísticas sobre esses eventos. As informações da tabela também foram disponibilizadas pelas autoridades do complexo eólico e é composta pelas seguintes informações para cada evento mapeado: o início do evento (data/hora); o fim do evento (data/hora); a duração do evento (horas); a razão do evento (classificada pelo ONS); a origem do evento (classificada pelo ONS); o valor da limitação imposta (MW), definida pelo ONS. Nessa segunda abordagem, foram realizados cálculos estatísticos para entender o comportamento, a evolução e as probabilidades de ocorrência dos eventos.

3.2.1 Primeira Abordagem

Para processo de tratamento dos dados da primeira abordagem, foram considerados os dados de velocidade do vento (m/s), extraídos das torres anemométricas de cada usina (uma torre em cada usina), e os dados de potência ativa medida (MW) e de potência ativa esperada (MW), extraídos de cada aerogerador das três usinas.

O tratamento dos dados foi dividido em quatro etapas (desconsiderando a coleta dos dados), realizadas em planilha eletrônica. Na primeira etapa foram tratados cada um dos três tipos de dados em três planilhas distintas. Para a planilha de velocidade do vento, os dados de cada torre anemométrica foram agrupados em um dado representado pela média da velocidade do vento observados nas três torres, para cada instante de tempo. Já nas outras duas planilhas, de potência ativa medida e potência ativa esperada, os dados de todos os aerogeradores foram agrupados em um dado representado pela soma das potências ativas de cada máquina.

É importante salientar que, os dados de potência ativa medida, são dados observados e registrados conforme a leitura dos instrumentos de cada aerogerador, já os dados de potência ativa esperada, são provenientes de pontos inseridos no sistema de gerenciador dos dados, são calculados, e dependem apenas do parâmetro de velocidade do vento, da disponibilidade da máquina e das características operacionais do aerogerador, esse método é pelo fabricante do aerogerador, e o processo de cálculo é omitido por questões de sensibilidade da informação.

A segunda etapa do processo de tratamento dos dados consiste na unificação dos dados totalizados, ou seja, das médias das velocidades do vento, das somas das potências ativas medidas e das somas das potências ativas esperadas.

Na terceira etapa, os dados foram separados em três arquivos, um para cada ano civil, com o intuito de dividir o tamanho do arquivo para agilizar a análise dos dados posteriormente. Em cada arquivo, foi criada uma coluna para calcular a perda de energia elétrica produzida, que efetua a seguinte lógica: se a potência ativa esperada é diferente de 0 (zero), a perda é igual a potência ativa esperada menos a potência ativa medida, caso contrário, resulta em 0 (zero) para o valor de perda.

Um ponto importante é que a potência esperada representa o potencial máximo do aerogerador considerando o recurso eólico disponível, logo, a diferença entre a potência ativa esperada e a potência ativa medida representa não somente a perda por limitação arbitrada, mas também todas as perdas por ineficiência e demais fatores que prejudicam a performance da máquina. Portanto, foram consideradas perdas apenas nos momentos em que houve limitação por *constrained-off* ou *curtailment*, para não contabilizar as perdas por outros motivos. As perdas durante esses eventos de limitação arbitrada, podem ser consideradas como o único motivo de limitação nesses momentos, pois o ONS não leva em consideração os outros fatores para fins de cálculo, somente as indisponibilidades de máquina, que já são consideradas no cálculo de potência esperada.

Na última etapa, foi realizada apenas uma organização, onde foram selecionados apenas os dados impactados pela ocorrência das limitações arbitradas, de modo a facilitar o uso de planilha dinâmica e gráfico dinâmico, tornando o arquivo mais leve e menos lento durante a exploração dos gráficos.

Os resultados e discussões da primeira abordagem são apresentados no Capítulo 4, onde são apresentados os gráficos e as dimensões das perdas para melhor entendimento do assunto trabalhado.

3.2.2 Segunda Abordagem

Para o processo de aquisição dos dados da segunda abordagem foram realizadas em duas etapas, na primeira, foram considerados os dados de janeiro de

2018 até dezembro 2021, fornecidos pelas autoridades do complexo eólico, sendo que já haviam sido classificadas, todas as ocorrências das usinas conforme o padrão IEC 61400-26-1 (norma que indica uma padronização da classificação de ocorrências em parques eólicos) e coletando apenas as ocorrências que foram motivadas por *constrained-off* e *curtailment*. Esse processo foi necessário pois o ONS lançou o Sistema de Apuração da Geração, Intercâmbio e Carga (SAGIC) apenas no ano de 2022, onde é possível extrair diretamente os dados via exportação de relatório. Este sistema foi utilizado para coletar os dados da segunda etapa, de janeiro de 2022 até dezembro de 2022 (IEC, 2019).

O tratamento dos dados foi realizado de forma a integrar os dados coletados via relatórios de ocorrência e os dados coletados via sistema SAGIC, onde na primeira etapa foi necessário classificar a razão, a origem e o valor de limitação imposta pelo ONS através da descrição das ocorrências. A classificação foi realizada conforme o entendimento da Resolução Normativa ANEEL Nº 1.030, de 26 de julho de 2022 (ANEEL, 2021).

Nessa abordagem, foi possível mensurar a quantidade de horas acumuladas de eventos de limitação arbitrada de potência ativa por razão de restrição e por ano. A métrica do percentil foi utilizada para uma primeira avaliação dos dados, o percentil é uma medida estatística que indica a posição relativa de um valor em um conjunto de dados ordenados. Ele mostra a porcentagem de valores abaixo desse valor. Pode ser útil para compreender a distribuição dos dados, comparar valores e identificar sua posição em relação aos demais (SIEGEL, 2022).

Foram calculados os percentis 25, 50, 75 e 90 para cada ano. conforme a equação (1):

$$P = \frac{n * k}{100} \quad (1)$$

Onde:

P é o percentil.

n é o número total de elementos do conjunto de dados.

k é o valor percentual desejado (25, 50, 75 e 90).

Ainda na segunda abordagem, foram realizadas mais duas divisões de estudo, uma para compreender os dados contínuos e outra para compreender os dados discretos, visto que o processo para estudar os dois tipos de parâmetros é diferente.

Para os dados contínuos, compreendidos pelas durações dos eventos e pelos valores das limitação impostas, os dados foram primeiramente separados em planilhas distintas para serem estudados individualmente. Em ambos, os dados foram organizados de forma crescente na planilha e calculados a média e o desvio padrão, e ainda elaborado um histograma para visualização da distribuição dos dados. Para o estudo das durações dos eventos, foi realizado o cálculo da distribuição normal de cada evento, assim, foi possível obter os dados de probabilidade de cada evento com base nas durações e criar um gráfico de densidade probabilidade e outro de distribuição de probabilidade.

Para os dados de valores das limitações impostas foi realizado um processo semelhante ao das durações de eventos, apenas com um ajuste de normalização nos dados, utilizando uma função que retorna o logaritmo natural dos dados, esse processo foi realizado para buscar um histograma mais comportado do parâmetro em questão. Para a elaboração dos gráficos de densidade probabilidade e de distribuição de probabilidade foram considerados os dados originais e os dados transformados (normalizados), já que as probabilidades resultaram em curvas comportadas em ambos os casos.

No estudo das variáveis discretas da segunda abordagem, compreendidos pelas classificações da razão e da origem das restrições, foram utilizadas as técnicas de estatística inferencial, condicional e bayesiana.

Primeiramente foram calculadas as probabilidades individuais de ocorrência de cada tipo de razão e de origem dos eventos. Depois, foram calculadas as probabilidades considerando todas as possibilidades de simultaneidade entre razão e origem dos eventos. A seguir foram calculadas todas as possibilidades de probabilidades condicionais entre os dois parâmetros discretos. E por último, foi utilizada a probabilidade bayesiana (teorema de Bayes), para encontrar as

probabilidades de ocorrência de eventos com base em suposições de acontecimentos prévios.

Os resultados e discussões da segunda abordagem são apresentados no Capítulo 4, onde são mostrados os gráficos de densidade probabilidade, de distribuição de probabilidade, histogramas e as análises de probabilidade condicional e bayesiana para melhor entendimento do trabalho desenvolvido.

4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS E ANÁLISE DO ESTUDO DE CASO

Nesse capítulo são apresentados os resultados e discussões das duas abordagens realizadas no estudo de caso e é feita uma análise de comprovação da necessidade de abordar outras formas de uso da energia frustrada por limitações arbitradas de potência ativa.

4.1 Análise e discussão dos resultados da primeira abordagem

Segundo o que foi exposto no Capítulo 2, a REN Nº 1.030/2022 diz que o agente é passível de ressarcimento financeiro para compensação dos impactos causados por *constrained-off* apenas para as limitações posteriores a 78 horas. Ou seja, somente para limitações classificadas como Razão Elétrica (REL). Podendo o ONS atualizar o valor de 78 horas considerando a indisponibilidade média apurada, em uma média móvel dos últimos cinco anos civis, das Funções de Transmissão, com nível de tensão entre 230 kV e 500 kV. Porém, para o estudo de caso, é considerado o valor padrão previsto na resolução (78 horas) (ANEEL, 2021). Também, para simplificar a análise, considera-se que as regras estabelecidas na resolução são válidas para os 5 anos de análise.

4.1.1 Perdas por limitação arbitrada de potência ativa em 2020

Nesse subcapítulo serão apresentadas as tabelas que contém os dias impactados por eventos de restrições arbitradas de potência ativa, onde são destacadas a geração do dia em MWh e a perda de produção motivadas por *constrained-off* e *curtailment* em MWh. Também são apresentados os gráficos dos dias que tiveram maior perda de produção de energia elétrica causada por esses motivos.

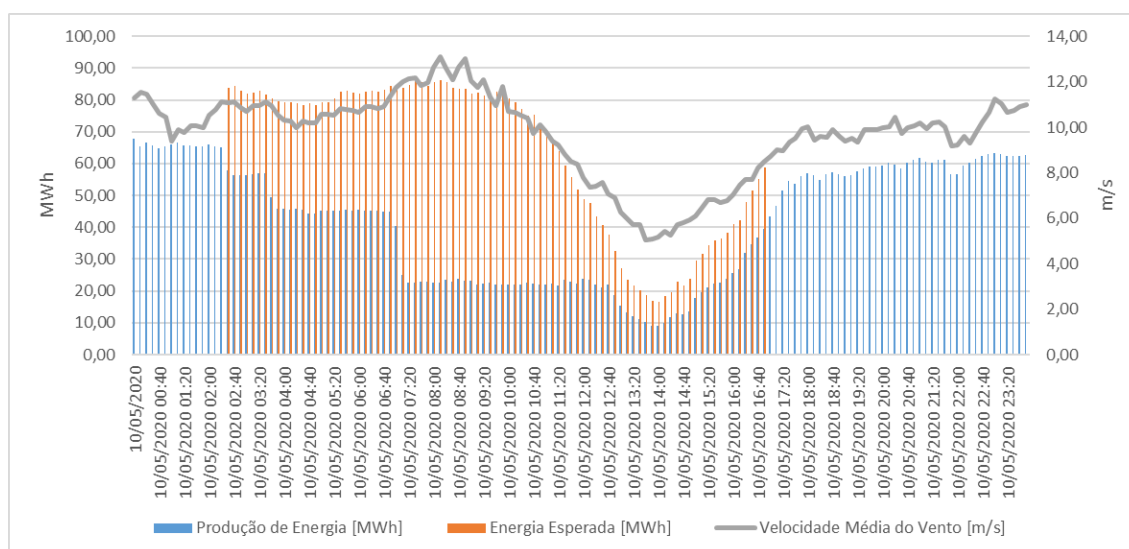
A Tabela 1 abaixo, mostra a perda de produção de energia elétrica de todos os dias que tiveram eventos de restrição por *constrained-off* e *curtailment* para 2020, e é possível notar na tabela que a maior perda ocorreu no dia 10/05/2020, onde foram restringidos 503,34 MWh de energia elétrica.

Tabela 1 - Perda de produção de energia elétrica em 2020

Dia	Geração_BMC [MWh]	Perda de Produção [MWh]
12/01/2020	22,30	183,20
19/01/2020	152,56	143,28
09/02/2020	52,40	35,44
26/04/2020	373,95	334,56
03/05/2020	43,10	119,46
04/05/2020	195,05	163,35
05/05/2020	245,94	102,04
10/05/2020	461,63	503,34
30/05/2020	451,01	178,99
31/05/2020	79,80	228,37
07/06/2020	121,67	80,49
14/06/2020	207,01	373,90
16/06/2020	214,85	117,24
21/06/2020	275,05	202,86
19/07/2020	491,87	144,99
01/10/2020	496,08	145,85
Total Geral	3.884,26	3.057,36

Fonte: Elaboração Própria (2023).

A Figura 5 abaixo, ilustra os períodos de limitação, onde ocorre a perda de produção de energia elétrica, observando a figura é possível ter uma ideia do impacto causado na energia elétrica gerada no dia 10/05/2020.

Figura 5 - Gráfico de energia produzida e energia esperada para o dia 10/05/2020

Fonte: Elaboração Própria (2023).

4.1.2 Perdas por limitação arbitrada de potência ativa em 2021

A Tabela 1 mostra as perdas de todos os dias que tiveram eventos de restrição em 2021, nota-se que o dia 29/08/2021, foi o mais prejudicado, com perda de 730,25 MWh.

Tabela 2 - Perda de produção de energia elétrica em 2021

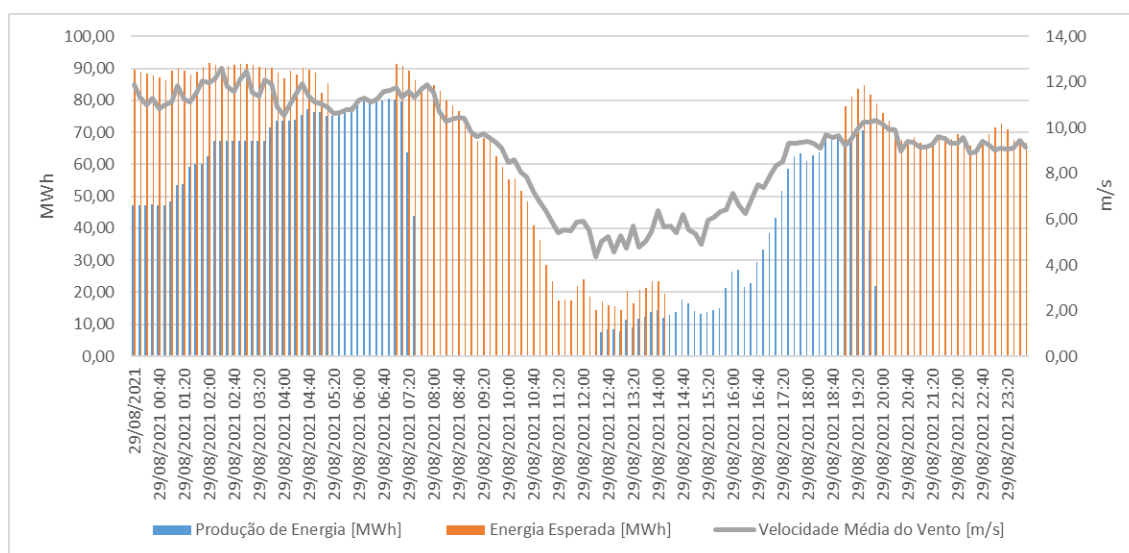
Dia	Geração_BMC [MWh]	Perda de Produção [MWh]
04/04/2021	262,34	63,13
15/04/2021	148,48	39,19
01/05/2021	410,69	137,19
09/05/2021	658,23	225,13
11/07/2021	129,88	46,99
14/07/2021	463,60	72,63
21/07/2021	626,75	132,95
25/07/2021	643,77	172,63
08/08/2021	146,81	71,77
11/08/2021	105,56	41,14
16/08/2021	427,66	256,19
17/08/2021	127,45	405,41
18/08/2021	1026,67	427,19
20/08/2021	493,01	300,92
21/08/2021	407,00	228,72
22/08/2021	260,22	286,04
25/08/2021	439,59	270,37
26/08/2021	230,21	255,77
28/08/2021	309,44	467,37
29/08/2021	518,27	730,25
30/08/2021	417,90	335,11
31/08/2021	699,20	563,74
01/09/2021	226,62	251,70
02/09/2021	250,81	143,63
05/09/2021	100,45	43,23
11/09/2021	96,80	46,76
28/09/2021	229,71	38,34
02/10/2021	23,30	310,84
03/10/2021	89,41	292,53
17/10/2021	200,46	111,02
18/10/2021	186,49	81,42
14/11/2021	295,87	196,19
21/11/2021	145,26	67,65
Outros	239,95	82,27
Total Geral	11.037,86	7.195,41

Fonte: Elaboração Própria (2023).

É importante salientar que na Tabela 2 foram suprimidos os quatro dias que sofreram menor perda de produção de energia elétrica, com o intuito de melhorar a apresentação da tabela no trabalho, e os totais desses dias foram trazidos na penúltima linha (outros), a última linha que contém os totais, trazem os valores reais para o ano de 2021.

A Figura 6 abaixo, ilustra os períodos de limitação, onde ocorre a perda de produção de energia elétrica, observando a figura é possível ter uma ideia do impacto causado na energia elétrica gerada no dia 29/08/2021.

Figura 6 - Gráfico de energia produzida e energia esperada para o dia 29/08/2021



Fonte: Elaboração Própria (2023).

4.1.3 Perdas por limitação arbitrada de potência ativa em 2022

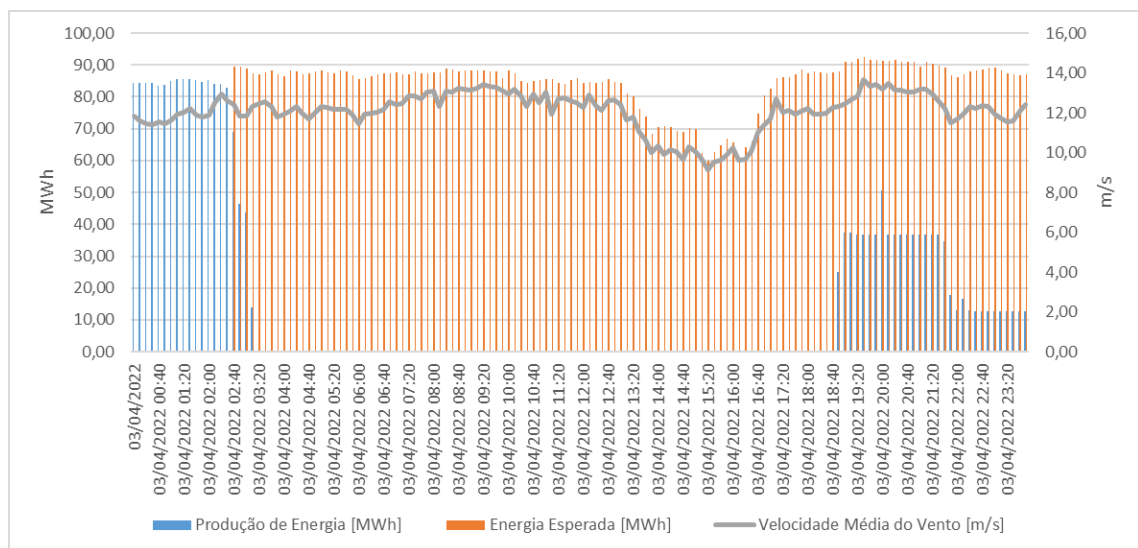
A Tabela 3 abaixo, mostra a perda de produção de energia elétrica de todos os dias que tiveram eventos de restrição por *constrained-off* e *curtailment* para 2022, na tabela é possível notar que a maior perda aconteceu no dia 03/04/2022, onde foram restringidos 1.652,69 MWh de energia elétrica. Essa foi também a maior perda de produção de energia elétrica motivada por limitação arbitrada de potência ativa dos três anos de análise. Também é possível perceber que ao longo dos três anos, os impactos dos eventos de maior perda de produção foram crescentes.

Tabela 3 - Perda de produção de energia elétrica em 2022

Dia	Geração_BMC [MWh]	Perda de Produção [MWh]
21/01/2022	193,31	69,05
23/01/2022	302,06	340,31
26/01/2022	248,90	474,84
30/01/2022	81,88	87,33
31/01/2022	82,93	63,43
01/02/2022	166,63	74,13
22/02/2022	198,43	101,27
24/02/2022	203,58	92,08
27/02/2022	154,22	48,88
28/02/2022	62,99	234,29
01/03/2022	202,96	103,60
05/03/2022	313,97	129,64
06/03/2022	417,07	537,61
03/04/2022	206,81	1.652,69
04/04/2022	251,77	1.376,24
01/05/2022	694,61	243,40
03/07/2022	90,83	574,95
09/07/2022	96,73	300,67
10/07/2022	221,22	120,83
27/08/2022	98,83	49,72
25/12/2022	323,46	78,87
Total Geral	4.613,19	6.753,84

Fonte: Elaboração Própria (2023).

A Figura 7, ilustra os períodos de limitação do dia 03/04/2022.

Figura 7 - Gráfico de energia produzida e energia esperada para o dia 03/04/2022

Fonte: Elaboração Própria (2023).

4.2 Análise e discussão dos resultados da segunda abordagem

Nesse subcapítulo são apresentados os resultados adquiridos das análises da segunda abordagem realizada. Os resultados são discutidos em paralelo com o que já foi apresentado até este ponto do trabalho, portanto, é realizada uma avaliação dos conceitos com o auxílio das ferramentas estatísticas utilizadas.

4.2.1 Estudo das durações dos eventos

Conforme apresentado na Tabela 4 abaixo, é possível observar que somente em 2019 o acumulado de horas de limitação REL supera as 78 horas, e mesmo nesse caso, apenas a seria passível de ressarcimento financeiro os eventos posteriores as 78 horas, ou seja, somente 70,07 horas.

Tabela 4 - Horas acumuladas de limitações por ano

Ano Civil	Limitação REL (horas)	Limitação CNF (horas)	Limitação ENE (horas)	Acumulado (horas)
2018	28,00	0,00	73,52	101,52
2019	148,07	23,93	4,85	176,85
2020	17,75	86,97	6,35	111,07
2021	5,18	24,82	208,85	238,85
2022	36,95	92,08	15,65	144,68

Fonte: Elaboração Própria (2023).

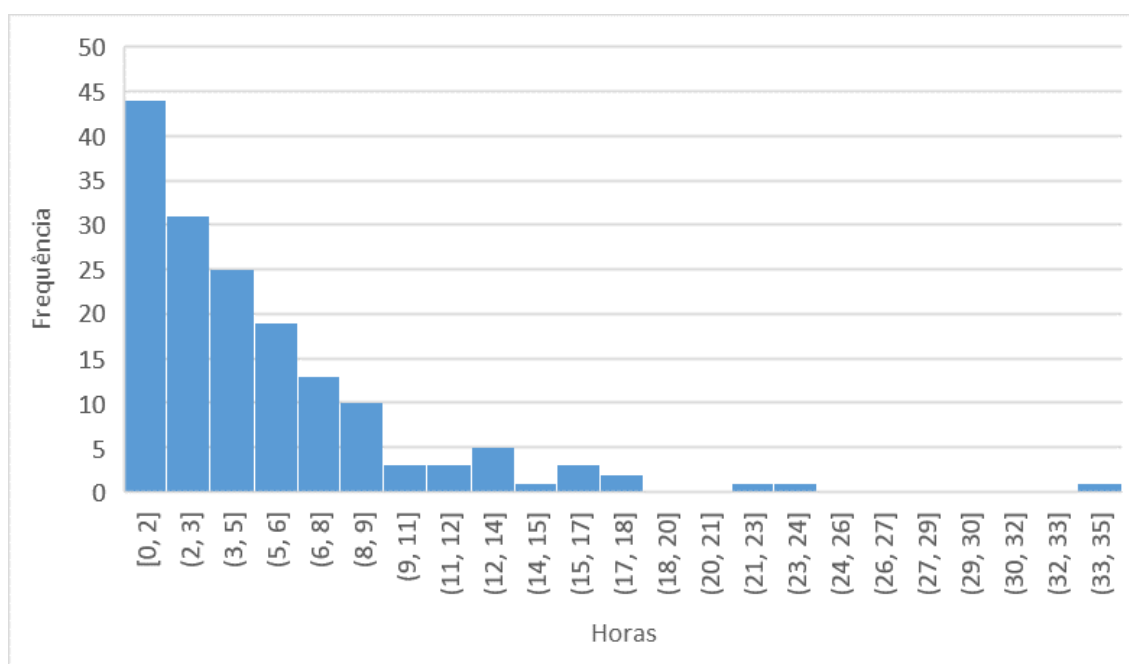
Ainda sobre a Tabela 4, nota-se que na maioria das vezes os valores de limitação REL não são os mais elevados, o que significa que os impactos causados por limitações classificadas como CNF e ENE são maiores e não são passíveis de ressarcimento financeiro.

Isso já é um bom indicativo de que o agente gerador irá absorver os custos de oportunidade pela energia elétrica frustrada, logo, é recomendável que se busque alternativas para o aproveitamento da energia restringida, como nos exemplos seguidos por outros países, mencionados no Capítulo 2.

No histograma representado na Figura 8, é possível observar a distribuição de frequências, onde os eventos são maiores quanto menores os valores de duração. Aqui já é possível ter uma primeira impressão de que se houvesse um sistema de

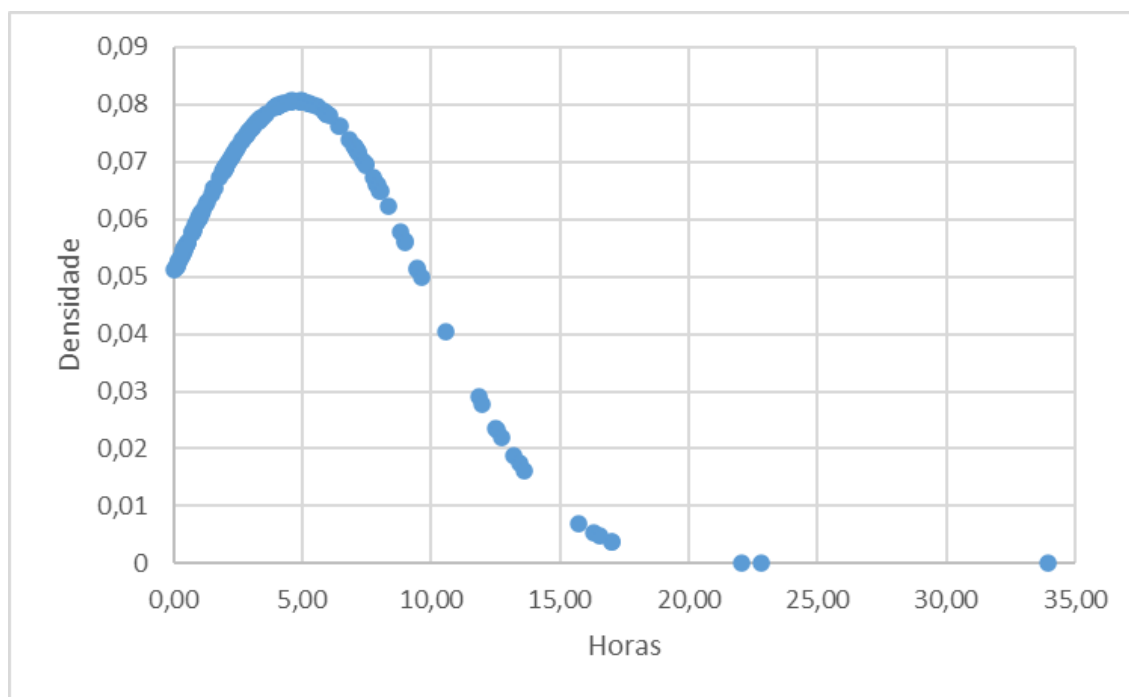
armazenamento de energia elétrica conectado ao complexo eólico capaz de armazenar algo em torno de 3 horas a 6 horas, o impacto causado pela maioria dos eventos seria parcialmente amortecido pelo sistema implementado, podendo ser aproveitado em outro momento, onde haveria a possibilidade de injeção dessa energia no sistema.

Figura 8 - Histograma das durações dos eventos



Fonte: Elaboração Própria (2023).

No gráfico de densidade probabilidade representado na Figura 9, é possível observar a distribuição de probabilidade comportada, onde a média está localizada à esquerda do centro da distribuição. E o mais importante, a densidade dos eventos de duração são representados em durações menores, confirmando o que foi observado no histograma anteriormente.

Figura 9 - Gráfico densidade probabilidade das durações dos eventos

Fonte: Elaboração Própria (2023).

Os valores de percentis também são importantes de serem avaliadas, visto que é possível entender numericamente onde os valores estão alocados no histograma. A Tabela 5 mostra que o percentil 50 é menor do que 4 horas, isso significa que seria possível a utilização de um sistema de armazenamento por baterias para assegurar metade dos eventos de limitação de potência ativa, se considerados apenas os dados de duração.

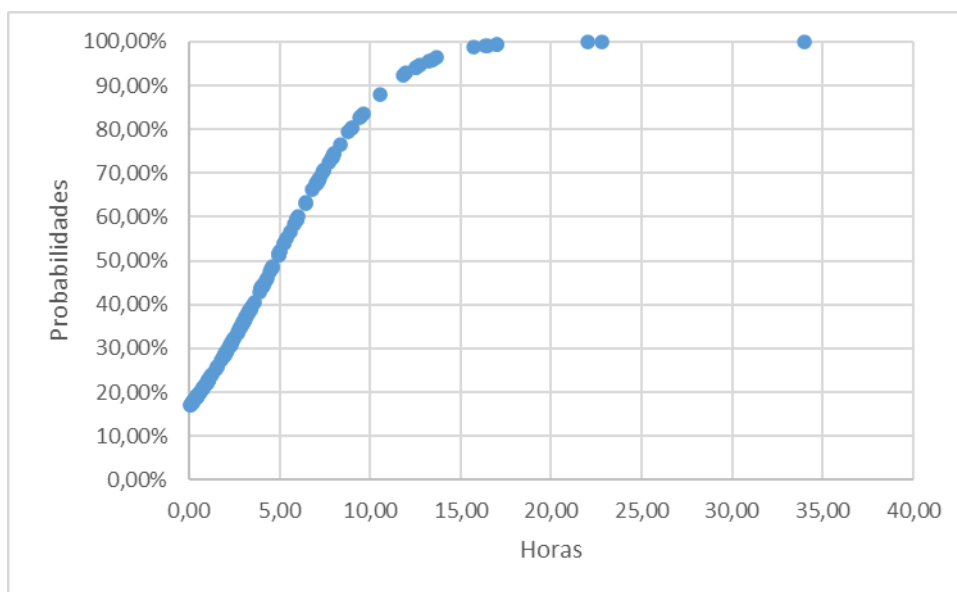
Tabela 5 - Valores dos percentis calculados em horas

P25	P50	P70	P90
1,13	3,32	5,81	11,47

Fonte: Elaboração Própria (2023).

No gráfico de distribuição de probabilidade representado na Figura 10, nota-se que a ocorrência dos eventos de menor duração são mais prováveis. O que é mais uma comprovação de que as durações das ocorrências tendem a seguir o comportamento apresentado nesse subcapítulo.

Figura 10 - Gráfico distribuição de probabilidade das durações dos eventos

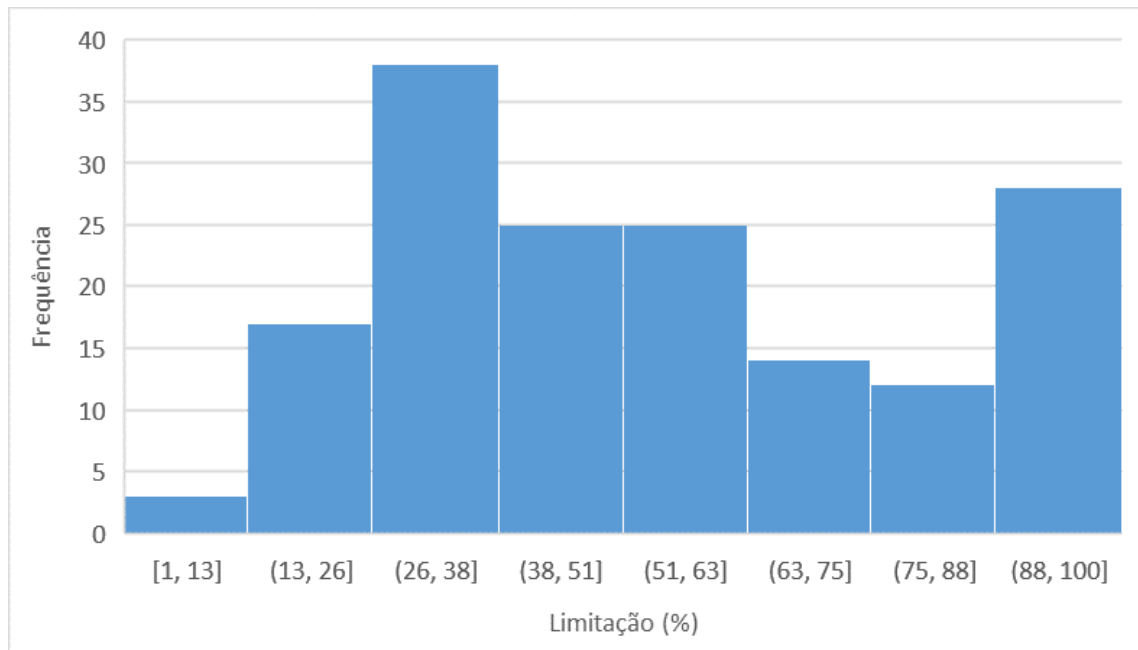


Fonte: Elaboração Própria (2023).

4.2.2 Estudo dos valores de limitação dos eventos

No histograma representado na Figura 11, é possível observar que a distribuição de frequências dos percentuais de limitação, não apresenta um perfil comportado, o que sugere uma aleatoriedade dos valores de restrição de potência ativa ao longo dos 5 anos. Para uma melhor representação do histograma buscou-se uma transformação logarítmica natural dos percentuais de limitação de potência ativa.

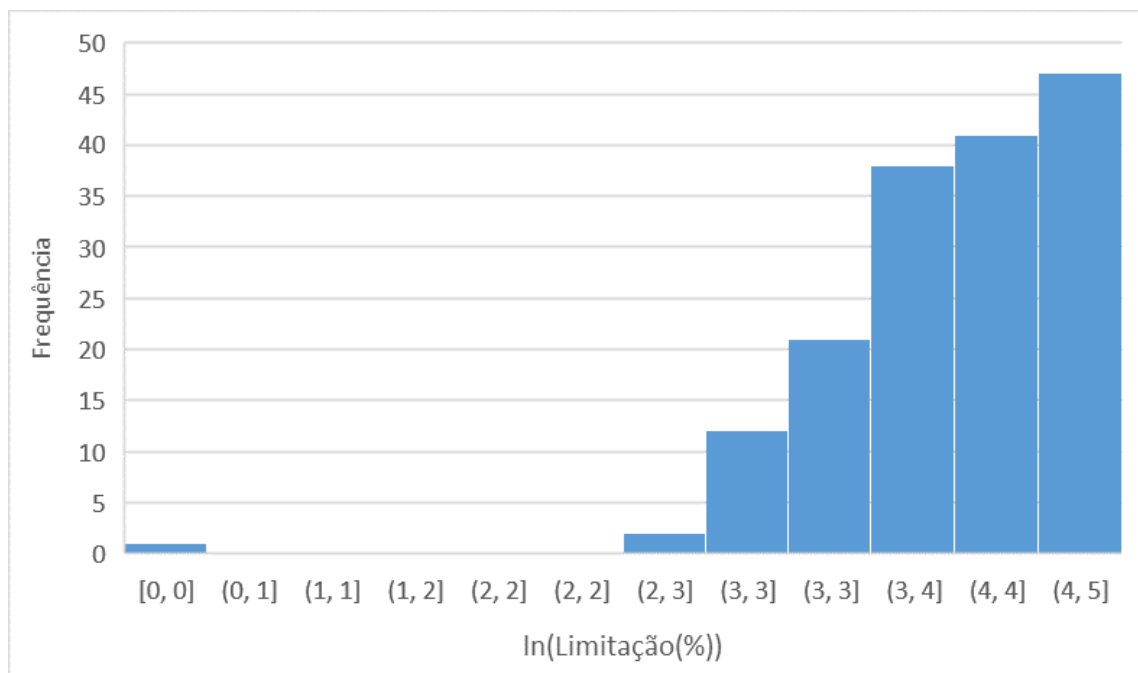
Figura 11 - Histograma das limitações de potência ativa



Fonte: Elaboração Própria (2023).

O histograma que representa a distribuição de frequência dos dados transformados é exibido na Figura 12, onde é notável um padrão mais comportado.

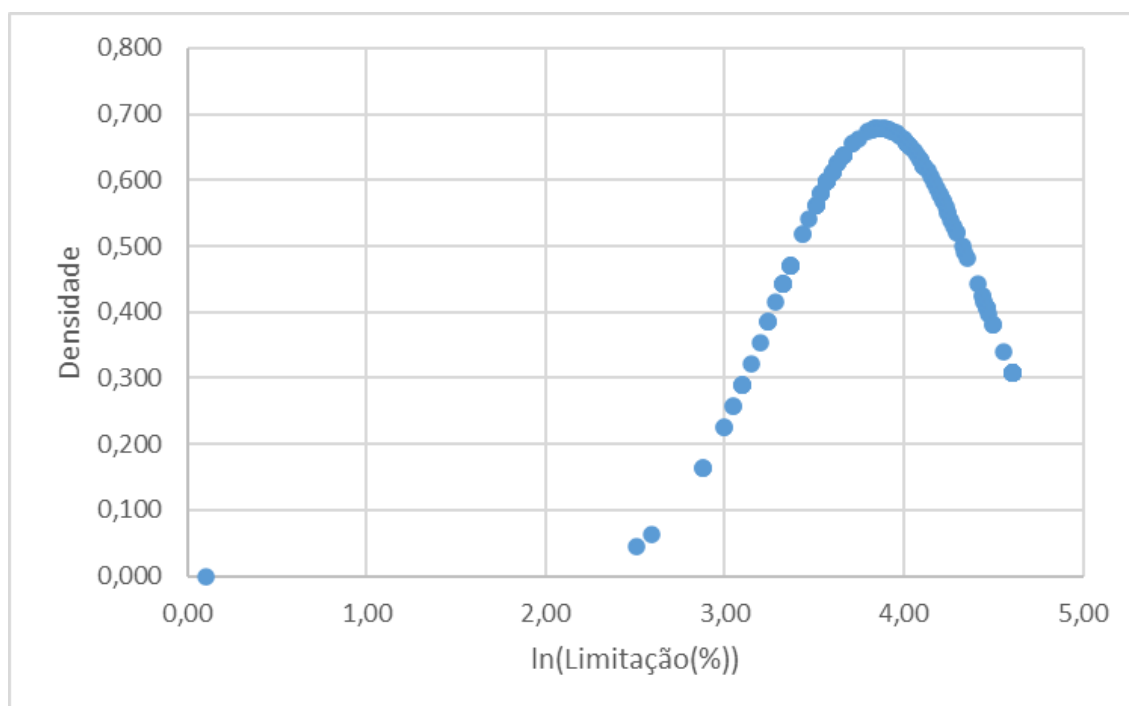
Figura 12 - Histograma dos logaritmos naturais dos percentuais de limitação de potência ativa



Fonte: Elaboração Própria (2023).

No gráfico de densidade probabilidade representado na Figura 13, é possível observar uma distribuição de probabilidade comportada, onde a média está localizada à direita do centro da distribuição. E o mais importante, a densidade dos eventos de duração são representados em percentuais mais elevados de limitação, confirmando o que foi observado no histograma anteriormente.

Figura 13 - Gráfico densidade dos logaritmos naturais dos percentuais de limitação de potência ativa



Fonte: Elaboração Própria (2023).

Os valores de percentis apresentados na Tabela 6 mostram 25% dos valores de limitação são menores que 35,75 MW, 50% dos valores de limitação são menores que 50 MW, 70% dos valores de limitação são menores que 66 MW e 90% dos valores de limitação são menores que 95 MW. Esses são dados que auxiliam no dimensionamento dos sistemas de armazenamento de energia elétrica e de outras soluções possíveis.

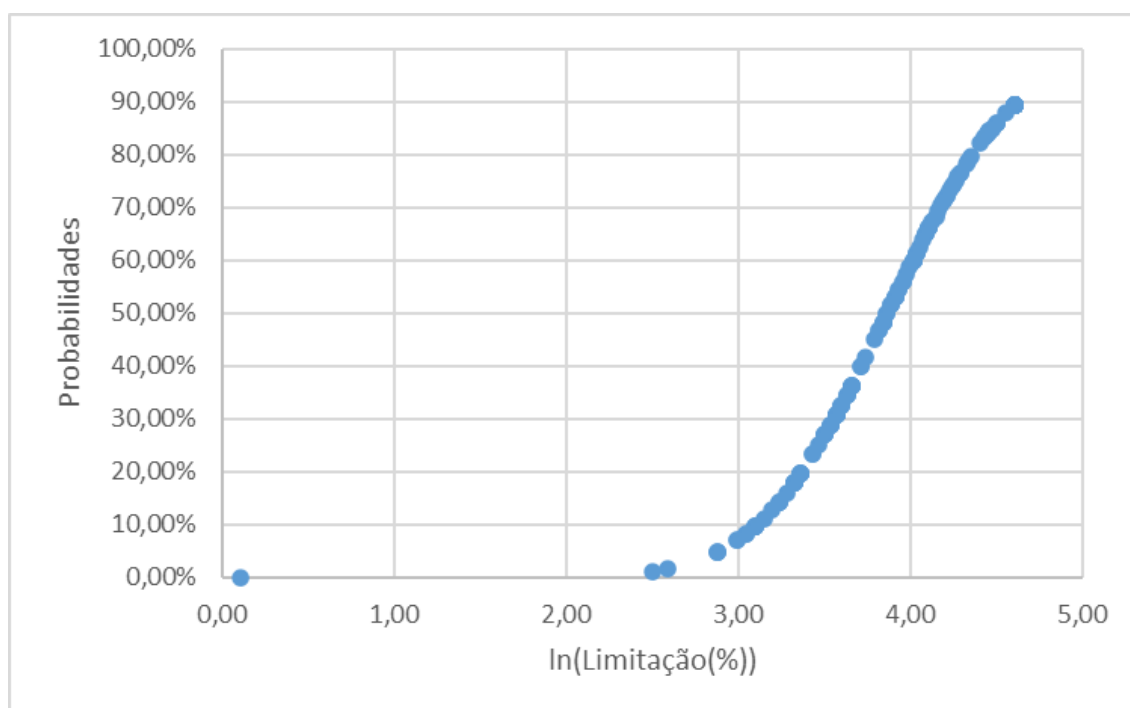
Tabela 6 – Valores dos percentis calculados em MW

P25	P50	P70	P90
35,75	50,00	66,00	95,00

Fonte: Elaboração Própria (2023).

No gráfico de distribuição de probabilidade representado na Figura 14, nota-se que a ocorrência dos eventos maior valor de limitação são mais prováveis. O que é mais uma comprovação de que as durações das ocorrências tendem a seguir o comportamento apresentado nesse subcapítulo.

Figura 14 - Gráfico distribuição de probabilidade dos logaritmos naturais e percentuais de limitação de potência ativa



Fonte: Elaboração Própria (2023).

4.2.3 Probabilidades condicionais

Neste subcapítulo serão apresentados os dados de probabilidade dos parâmetros discretos do estudo. Na Tabela 7 abaixo, são apresentadas as probabilidades individuais de cada tipo de evento para todo o período do estudo.

Tabela 7 - Probabilidades de ocorrências individuais por razão e origem

Razão (A)			Origem (B)	
REL	ENE	CNF	LOC	SIS
42	60	60	38	124
25,93%	37,04%	37,04%	23,46%	76,54%

Fonte: Elaboração Própria (2023).

Ainda na Tabela 7, é possível observar que a probabilidade de ocorrência dos eventos passíveis de ressarcimento financeiro é de 25,93%, o que sugere, mais uma vez, que o agente de geração eólica será responsável por absorver os impactos causados pelas limitações arbitradas de potência ativa.

Na Tabela 8 abaixo, são apresentadas as probabilidades de todas as possibilidades de ocorrências simultâneas entre razão e origem. Nota-se que os eventos de origem sistêmica são mais recorrentes, exceto para os eventos de origem sistêmica com razão de restrição elétrica, para este a probabilidade de a ocorrência ser de origem local e razão de restrição elétrica é maior, de 17,28%. Ou seja, os eventos sistêmicos impactam mais o complexo eólico do que os eventos de origem local.

Tabela 8 - Probabilidade de ocorrência simultânea entre razão e origem

A	B	$P(A \cap B)$
REL	LOC	17,28%
REL	SIS	8,64%
ENE	LOC	6,17%
ENE	SIS	30,86%
CNF	LOC	0,00%
CNF	SIS	37,04%

Fonte: Elaboração Própria (2023).

Na Tabela 9 abaixo, são apresentadas as probabilidades condicionais entre as razões e as origens das restrições. Sendo possível identificar qual a probabilidade de ocorrer A dado que o evento B aconteceu. Por exemplo, a probabilidade de ocorrer um evento de razão elétrica (REL) dado que seja de origem local (LOC) é de 73,68%.

Tabela 9 - Probabilidade de ocorrência condicional entre razão e origem

A	B	$P(A B)$
REL	LOC	73,68%
REL	SIS	11,29%
ENE	LOC	26,32%
ENE	SIS	40,32%
CNF	LOC	0,00%
CNF	SIS	48,39%

Fonte: Elaboração Própria (2023).

4.2.4 Estatística Bayesiana

Nesse subcapítulo, são apresentados os resultados dos cálculos realizados com base no conhecimento sobre a estatística bayesiana, onde foram encontradas as probabilidades de todas as possibilidades de simultaneidade entre razão e origem das restrições, considerando a ocorrência de um evento maior que uma hora de duração.

É possível observar na Tabela 10 abaixo, que as probabilidades de ocorrência de restrições maiores que uma hora de duração para todas as possibilidades de ocorrência de *constrained-off* e *curtailment*, para o complexo eólico BMC, também são maiores para eventos sistêmicos, e novamente, com exceção dos eventos de razão elétrica, para estes, a probabilidade de ser REL e LOC é maior.

Tabela 10 - Probabilidade de eventos de restrição maiores que 1 hora

Razão	Origem	Probabilidade
REL	LOC	19,86%
REL	SIS	7,15%
ENE	LOC	6,35%
ENE	SIS	35,74%
CNF	LOC	0,00%
CNF	SIS	31,77%

Fonte: Elaboração Própria (2023).

Com o intuito de exemplificar o método utilizado, para o resultado da primeira linha da Tabela 10, a análise consistiu em uma abordagem bayesiana para calcular a probabilidade de ocorrência de um evento REL de origem LOC, levando em consideração que esse evento tivesse tido duração superior a uma hora.

Com base nas informações já conhecidas, $P(\text{LOC})$ foi a probabilidade de ter ocorrido um evento de origem local, e $P(\text{REL}|\text{LOC})$ foi a probabilidade de ter ocorrido um evento elétrico dado que ele tivesse tido origem local. Além disso, $P(D)$, a probabilidade de ter ocorrido um evento de origem LOC (D), e $P(D \cap C)$, a probabilidade de ter ocorrido um evento de origem LOC (D) com duração maior que uma hora (C), que foi estimada em 15,43%. Através da fórmula da probabilidade condicional, $P(D | C) = P(D \cap C) / P(C)$, onde $P(C)$ representou a probabilidade de ter ocorrido um evento com duração superior a uma hora, calculada em 77,72%, pôde-se determinar que a probabilidade de ter ocorrido um evento de origem LOC (D), considerando que ele tivesse tido duração maior que uma hora, foi de

aproximadamente 19,86%. Assim, a abordagem bayesiana utilizada nessa análise permitiu uma estimativa precisa e fundamentada da probabilidade do evento em questão, fornecendo insights valiosos para a compreensão e tomada de decisões relacionadas ao mesmo.

Com esse método, é possível encontrar diversas informações importantes para auxiliar nos estudos de viabilidade de sistemas de armazenamento para compor o complexo eólico e facilita a tomada de decisão para o investimento.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho buscou analisar os impactos que os cortes na produção de geração de energia eólica causam para os agentes geradores detentores de parques eólicos. Buscou-se compreender e analisar as principais causas das motivações dos cortes de geração, também pode-se concluir que há um grande desequilíbrio entre a expansão da geração e a expansão da transmissão, indo de acordo com o primeiro objetivo específico do trabalho.

Após realizou-se um tratamento estatístico a fim de analisar a quantidade de horas acumuladas de cortes de geração, concluindo-se que para o objeto do estudo de caso, o percentil de 50% é de 3 horas e 30 minutos sendo possível a utilização de um sistema de armazenamento por baterias para assegurar metade dos eventos de limitação de potência ativa e esses sistemas de armazenamento podem ser utilizados para outra finalidade, nos períodos que não houverem limitações de geração, como por exemplo, para armazenar a energia de ultrapassagem do Montante de Uso do Sistema de Transmissão (MUST).

Na sequência foram trazidas as probabilidades de ocorrência de *constrained off*, em decorrência da razão e origem das restrições, o que apresentou mais um mecanismo para auxiliar nos estudos de viabilidade de sistemas de armazenamento, a fim de utilizar a geração quando restringida, para compor o complexo eólico e na tomada de decisão para possíveis investimentos.

Por fim a análise *bayesiana* é caracterizada pelas probabilidades de ocorrência de restrições maiores que uma hora de duração para todas as possibilidades de ocorrência de *constrained-off* e *curtailment*.

As abordagens realizadas ao longo do trabalho se demonstraram muito interessantes e com resultados satisfatórios, que podem auxiliar na decisão de buscar alternativas para o aproveitamento da energia elétrica frustrada. Destaca-se que o trabalho cumpriu com os objetivos propostos de analisar os cortes de geração e propor possíveis alternativas, utilizando sistemas de armazenamentos a fim de reduzir custos decorrente das limitações de geração ao agente gerador.

5.1 Proposta de trabalhos futuros

Como proposta de trabalho futuro, poderia ser realizado uma análise de viabilidade com a finalidade de analisar a questão financeira de investimentos para possíveis sistemas de armazenamento.

Outra proposta seria realizar uma abordagem utilizando um modelo multicriterial para auxiliar na decisão de qual alternativa escolher dentre um leque de possibilidades.

Também seria interessante mensurar o impacto financeiro causado por essas limitações, visto que este trabalho indica o problema, mas traz os impactos em termos de perda de produção em MWh e percentuais.

REFERÊNCIAS

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Tratamento regulatório à situação de Constrained-off de usinas eólicas**: relatório de análise de impacto regulatório nº 001/2019-SGR/ANEEL. Brasília: ANEEL, 2019.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa nº 927**, de 22 de março de 2021. Estabelece procedimentos e critérios para apuração e pagamento de restrição de operação por Constrained-off de usinas eolioelétricas. Brasília: ANEEL. 2021

ANEEL. **Expansão da potência instalada no Brasil em julho é de 708,78 MW**. Disponível em: Expansão da potência instalada no Brasil em julho é de 708,78 MW — Agência Nacional de Energia Elétrica (www.gov.br). Acesso em: 28 de jun de 2022.

ALSTOM WIND LAM. ECO 80: Plataforma - **Manual de Manutenção**. Edição 2010. Revisão 1.

Bird, L., et al. (2016). **Wind and solar energy curtailment: A review of international experience**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 65, 577-586. ISSN 1364-0321. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.06.082>.

CCEE. **Visão Geral das Operações na CCEE**. 2010. Disponível em: <https://docplayer.com.br/6670745-Visao-geral-das-operacoes-na-ccee-versao-2010.html> Acesso em: 29 jun. 2023.

CCEE. **Contratos CCEE**. 2023. Disponível em: Contratos - CCEE Acesso em: 29 jun. 2023.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanço Energético Nacional 2021**: Ano base 2020. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética, 2021.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2021**: Ano base 2020. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética, 2021b.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Consumo Mensal de Energia Elétrica por Classe (regiões e subsistemas)**. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética, 2022.

EPE; MME. Empresa de Pesquisa Energética; Ministério das Minas e Energia. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2030**. Brasília: Ministério de Minas e Energia / Empresa de Pesquisa Energética, 2021.

GODOI, Mauricio; MONTENEGRO, Sueli. **Aneel aprova regra sobre constrained-off de eólicas**. 2021. Disponível em: <https://canalenergia.com.br/noticias/53167122/aneel-aprova-regra-sobre-constrained-off-de-eolicas>. Acesso em: 27 nov. 2021.

IEC. International Electrotechnical Commission. **IEC 61400-26-1: 2019, Sistemas de geração de energia eólica - Parte 26-1**: Disponibilidade para sistemas de geração de energia eólica. Genebra: IEC, 2019.

ONS. Operador Nacional do Sistema. **Procedimentos de Rede**. Módulo 5, Submódulo 5.3. - Controle da geração. 12. ed. Rio de Janeiro: Ons, 2020.

ROMAIN Zissler. **Corte de Energia Renovável no Japão. 2019**. Disponível em: https://www-renewable--ei-org.translate.google/en/activities/column/REupdate/20190409.php?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=pt&_x_tr_hl=pt-BR&_x_tr_pto=sc Acesso em: 29 jun. 2023.

SANTANA, Thaynara Rodrigues. **Estudo dos impactos energéticos e econômicos gerados pelo descasamento entre as obras de geração eólica e transmissão**. 2015. 83 f., il. Monografia (Bacharelado em Engenharia de Energia) — Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

SANTOS, Bruno Sérgio Gomes dos. **Panorama da Energia Eólica no Brasil: análise do Proinfa e dos leilões de energia elétrica no Ambiente de Contratação Regulada até 2021**. Monografia (Pós-Graduação em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2022.

SIEGEL, A. F., & Wagner, M. R. (2022). Chapter 4 - Landmark Summaries: Interpreting Typical Values and Percentiles. In A. F. Siegel & M. R. Wagner (Eds.), *Practical Business Statistics* (Eighth Edition) (pp. 75-104). Academic Press. ISBN 9780128200254. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820025-4.00004-X>.

(SOLARPACES, 2022). **Restrições da China sobem à medida que o crescimento das energias renováveis explode**. Disponível em: <https://www.solarpaces.org/chinas-curtailments-go-up-as-renewables-growth-explodes/> Acesso em: 29 jun. 2023.