



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

WENDELL CARLOS OLIVEIRA DA SILVA

ESTUDO DA RESTRIÇÃO DE GERAÇÃO EOLIOELÉTRICA POR
CONSTRAINED-OFF E APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DE
OBTENÇÃO DE CURVA DE PRODUTIVIDADE EÓLICA DO
OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO

FORTALEZA

2022

WENDELL CARLOS OLIVEIRA DA SILVA

ESTUDO DA RESTRIÇÃO DE GERAÇÃO EOLIOELÉTRICA POR
CONSTRAINED-OFF E APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DE OBTENÇÃO DE
CURVA DE PRODUTIVIDADE EÓLICA DO OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA
ELÉTRICO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Luiz Marcelo Antunes

Coorientador: Eng. José Rafael Pereira de Oliveira

FORTALEZA

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- S584e Silva, Wendell Carlos Oliveira da.
Estudo da restrição de geração eólicoelétrica por constrained-off e aplicação da metodologia de obtenção de curva de produtividade eólica do operador nacional do sistema elétrico / Wendell Carlos Oliveira da Silva. – 2022.
110 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2022.
Orientação: Prof. Dr. Fernando Luiz Marcelo Antunes.
Coorientação: Prof. José Rafael Pereira de Oliveira.
1. Restrição de geração eólicoelétrica. 2. Fontes renováveis. 3. Constrained-off. 4. Regulatório. 5. Geração centralizada. I. Título.
-

WENDELL CARLOS OLIVEIRA DA SILVA

ESTUDO DA RESTRIÇÃO DE GERAÇÃO EOLIOELÉTRICA POR
CONSTRAINED-OFF E APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DE OBTENÇÃO DE
CURVA DE PRODUTIVIDADE EÓLICA DO OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA
ELÉTRICO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Fernando Luiz Marcelo
Antunes (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Eng. José Rafael Pereira de
Oliveira (Coorientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Me. Levi Freitas Fernandes Távora
Universidade de Fortaleza (UNIFOR)

Me. Adão Linhares Muniz
Universidade Federal do Ceará (UFC)

À minha mãe, Silvânia da Silva Oliveira.

Ao meu pai, Carlos Roberto da Silva.

À minha família.

A todos os meus amigos queridos que fizeram parte dessa jornada.

AGRADECIMENTOS

Queria agradecer principalmente aos meus pais, Silvânia da Silva Oliveira e Carlos Roberto da Silva, por todo o apoio nos meus estudos e pela ótima criação que tive, com amor, carinho e louvável formação de caráter. Vocês são parte de mim e de quem eu sou.

À minha tia pela oportunidade de residir em Fortaleza para continuar meus estudos e pelo exemplo de resiliência.

Aos meus avós e meu tio por todo o apoio, carinho e ensinamento.

Aos meus amigos, Paulo Victor, João Felipe e Francisco Marcos que juntos a mim formaram nosso grupo de trabalhos carinhosamente apelidado de "Quarteto Fantástico". De todos que estiveram comigo desde o começo desse curso, vocês com certeza foram os astros principais. Amigos e companheiros que pretendo levar para a vida.

Ao meu querido amigo Rafhael Holanda por nossa incrível amizade, por ter me acolhido tão bem em sua cidade natal e me ensinado tanto sobre a vida.

À minha amiga Ana Patrícia que chegou na metade do curso e já sentou na janelinha da nossa turma agregando alegria, conhecimento e exemplo de dedicação.

Aos meus amigos de infância Francisco Valdirley e Matheus da Silva por todos os bons momentos e por mantermos nosso laço de amizade mesmo a distância.

Aos meus amigos Marcus Vinícius e Wendel Marcelino, que mesmo a distância ocupam um local especial em minha vida desde a adolescência.

Ao meu amigo Luis Kenedy por todos os anos de amizade e apoio, e com certeza uma grande inspiração de dedicação acadêmica.

Aos meus novos amigos José Rafael e Aline Sena que mal conheço e já considero pacas. Em pouco tempo já é possível perceber a qualidade de pessoas que vocês são e que poderei sempre contar com sua amizade.

Ao meu amigo Cláudio César pela inspiração de aluno e apoio durante a confecção deste trabalho.

Aos meus companheiros de jogatina Francisco Ivonilson, Marcos Gleizer, Eduardo Santana e Thales Moura pelos inefáveis momentos *online* e risadas descontroladas que me ajudaram nos momentos mais incertos.

A todos os meus companheiros de nossa finada guilda no *World of Warcraft*, também responsáveis por momentos de alegria e risadas.

Ao incrível grupo de estagiários de meu atual local de trabalho pelos momentos leves e aprendizado diário.

Ao meu orientador e professor Dr. Fernando Antunes pela dedicação e disponibilidade de me acompanhar neste processo de conclusão de curso, mesmo diante tantos alunos já acolhidos por sua orientação.

Por fim, mas não menos importante, aos meus queridos professores do ensino fundamental e ensino médio que sempre me incentivaram na busca pelo conhecimento e no crescimento de minhas habilidades.

“A ciência é, portanto, uma perversão de si mesma, a menos que tenha como fim último, melhorar a humanidade.”

(Nikola Tesla)

RESUMO

A fim de manter os critérios para a confiabilidade do Sistema Elétrico Interligado Nacional, em alguns casos são solicitadas pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) restrições na geração de energia elétrica. As restrições de geração que tenham sido originadas externamente às instalações das usinas de energia elétrica são conhecidas pelo termo em inglês *constrained-off*. Tais restrições podem ser solicitadas para qualquer tipo de usina de geração de energia elétrica, sendo a eolioelétrica o foco deste trabalho. Inicialmente é apresentado o conceito de *constrained-off* e seu tratamento ao longo dos anos pela Agência Nacional de Energia Elétrica. Em seguida são elencados os principais pontos da resolução normativa nº 927 de 2021 e as mudanças no submódulo 2.4 dos procedimentos de rede acerca da previsão de geração restringida por *constrained-off*. Usando o sistema de cálculo proposto pelo ONS, esse trabalho apresenta uma metodologia simplificada para que o agente gerador obtenha sua curva de produtividade e assim possa acompanhar a restrição de geração imposta pelo agente externo. A metodologia aqui proposta usa a linguagem de programação *Python*. O trabalho também apresenta uma análise do montante financeiro que representam as restrições de geração por *constrained-off*. Por fim, o trabalho demonstra que há viabilidade na metodologia simplificada e a comparação entre geração real e geração estimada através da curva de produtividade obtida mostrou-se satisfatória, havendo um erro médio aproximado de 8,15% e desvio padrão do erro de 12,92% nos valores do real e estimado.

Palavras-chave: Fontes renováveis, Eólica, Restrição de geração eolioelétrica, Indisponibilidade Externa, ONS, ANEEL, Resolução Normativa nº 927, Constrained-off, Regulatório, Geração Centralizada .

ABSTRACT

In some cases restrictions on the generation of electric energy are requested by the National Electric System Operator in order to maintain the criteria for the reliability of the National Interconnected Electricity System. The generation constraints that have originated externally to the installations of the electric power plants are known by the English term *constrained-off*. Such restrictions can be requested for any type of electric power generation plant being eolicoelectric the focus of this work. Initially the concept of *constrained-off* and its treatment over the years by the National Electric Energy Agency is presented. Next the main points of normative resolution n° 927 of 2021 and the changes in submodule 2.4 of the network procedures regarding the prediction of generation constrained by *constrained-off* are listed. Using the calculation system proposed by the ONS this work presents a simplified methodology for the generating agent to obtain its productivity curve and thus follow the generation constraint imposed by the external agent. The methodology proposed here uses the *Python* programming language. The work also presents an analysis of the financial amount represented by the *constrained-off* generation constraints. Finally the work demonstrates that there is feasibility in the simplified methodology and the comparison between real generation and estimated generation through the obtained productivity curve proved to be satisfactory, with an approximate mean error of 8.15% and standard deviation of the error of 12.92% in the actual and estimated values.

Keywords: Renewable sources. Wind power. Wind power generation restriction. External Unavailability. Normative Resolution n° 927. Constrained-off. Regulatory

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Porcentagem de geração de energia elétrica por tipo de usina em 2012 e 2020	16
Figura 2 – Evolução da geração de energia eólicoelétrica de 2012 a 2021	16
Figura 3 – Redução de geração eólicoelétrica no SIN (MWh) - Indisponibilidade externa - Diário em Novembro de 2021	28
Figura 4 – Representação física da curva Vento x Potência	30
Figura 5 – Curva genérica para criação das curvas Vento x Potência	31
Figura 6 – Eliminação da dispersão	32
Figura 7 – Curva de Vento x Potência com dados insuficientes	34
Figura 8 – Curva de Vento x Potência após inserção dos dados fictícios	35
Figura 9 – Gráfico da curva V x P teórica do modelo de aerogerador do projeto	39
Figura 10 – Gráfico da curva V x P e dispersão de dados (Aerogerador 1)	40
Figura 11 – Gráfico da curva V x P e dispersão de dados (Aerogerador 22)	41
Figura 12 – Gráfico da curva V x P e dispersão de dados (Aerogerador 37)	41
Figura 13 – Gráfico da curva V x P do Parque	42
Figura 14 – Gráfico da curva V x P do Parque com dados de medidores	44
Figura 15 – Comparação entre os dados da geração e lido nos medidores	44
Figura 16 – Gráfico da curva V x P do Parque Final	45
Figura 17 – Comparação entre as curvas de produtividade	46
Figura 18 – Comparação entre Geração Real e Geração Estimada	53
Figura 19 – Comparação entre Geração Real e Geração Estimada	54
Figura 20 – Comparação entre Geração Real e Geração Estimada	54
Figura 21 – Comparação entre Geração Real e Geração Estimada	54
Figura 22 – Comparação entre Geração Real e Geração Estimada	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Geração estimada e erro das amostras	48
Tabela 2 – Frustração de geração em MWh de Jun/2021 a Nov/2021	56
Tabela 3 – PLD semanal médio das regiões de Jun/21 a Nov/21	57
Tabela 4 – Montante não captado por <i>constrained-off</i> eólico	59

LISTA DE SÍMBOLOS

<i>MWh</i>	Megawatt-Hora
<i>kWh</i>	Kilowatt-Hora
<i>MW</i>	Megawatts
<i>m/s</i>	Metros por segundo
%	Porcentagem
<i>R\$</i>	Real
<i>t</i>	Tempo
<i>ONS</i>	Operador Nacional do Sistema Elétrico
<i>ANEEL</i>	Agência Nacional de Energia Elétrica
<i>EPE</i>	Empresa de Pesquisa Energética
<i>CCEE</i>	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
<i>REN</i>	Resolução Normativa
<i>SRM</i>	Superintendência de Regulação Econômica e Estudos de Mercado
<i>SEM</i>	Superintendência de Estudos Econômicos de Mercado
<i>MAC</i>	Mecanismo Auxiliar de Cálculo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.0.1	<i>Controle de Geração</i>	16
1.1	Objetivos	17
1.2	Estrutura do trabalho	18
2	FUNDAMENTAÇÃO E DEFINIÇÕES	19
2.1	A regulamentação do <i>constrained-off</i> eólico	19
2.1.1	<i>Marcos temporais</i>	20
2.1.1.1	<i>2014: i - A Resolução Normativa nº 637/2014</i>	21
2.1.1.2	<i>2017: ii - O Despacho nº 2.881/2017</i>	21
2.1.1.3	<i>2019: iii - O Despacho nº 2.303/2019</i>	22
2.1.1.4	<i>2021: iv - Publicação da Resolução Normativa nº 927/2021</i>	22
2.2	Um breve estudo da REN nº 927/2021	23
2.2.1	<i>O montante da frustração de geração</i>	26
2.3	Acompanhamento das Reduções de Geração do ONS	27
2.4	A curva de produtividade e a geração eolioelétrica estimada	28
2.4.1	<i>Critérios Gerais para obtenção da curva de produtividade</i>	29
2.4.2	<i>A equação geral da curva de produtividade</i>	30
2.4.3	<i>A eliminação da dispersão dos dados</i>	32
2.4.4	<i>A problemática da ausência de dados</i>	33
3	METODOLOGIA	36
3.1	Introdução	36
3.2	Da aquisição dos dados	36
3.3	Plotagem da Curva de Produtividade Teórica	37
3.4	Plotagem dos dados da empresa e comparação com a curva de produtividade teórica	39
3.4.1	<i>Dados de energia dos medidores</i>	43
3.4.2	<i>Novos parâmetros da curva de produtividade</i>	45
3.5	Utilizando a curva de produtividade obtida	47
3.6	O custo do <i>constrained-off</i>	55
4	ANÁLISE DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES	61

4.1	Da curva de produtividade teórica	61
4.2	Da comparação dos dados reais com a curva de produtividade teórica	61
4.3	APÊNDICE produtividade, modificada.	63
4.4	APÊNDICE da curva de produtividade modificada	68
4.5	APÊNDICE Gráficos de geração real x geração estimada	63
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	64
	REFERÊNCIAS	66

1 INTRODUÇÃO

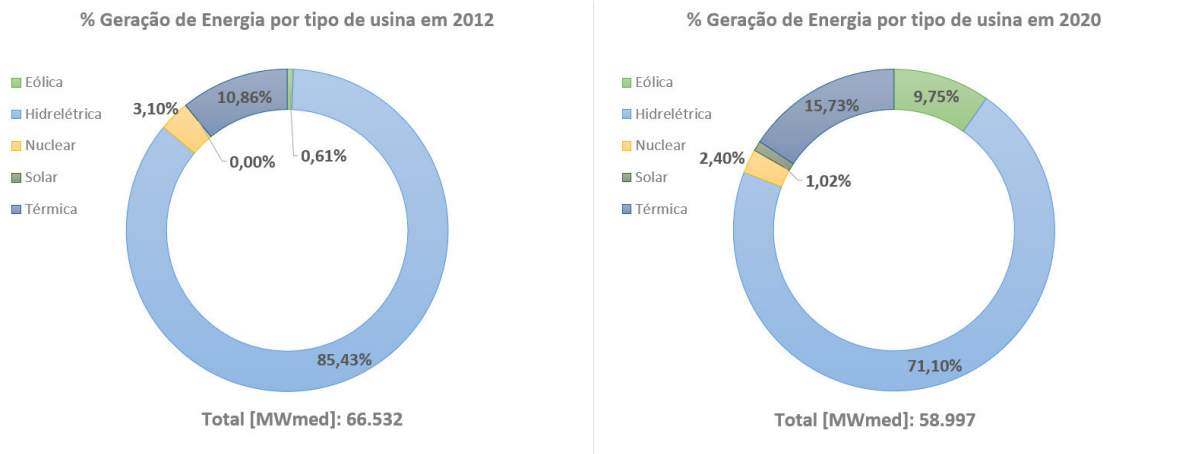
É inegável que a energia elétrica tornou-se essencial na sociedade humana, sendo necessário seu uso tanto em atividades cotidianas como em atividades complexas e específicas. Em paralelo a isso, a conjuntura atual da sociedade exige que o ser humano se preocupe cada vez mais com a sustentabilidade de suas ações, a fim de preservar a condição do planeta de forma a manter a qualidade de vida e sobrevivência de nossa espécie.

Neste contexto, por conta do aumento da demanda de energia elétrica em conjunto com os impactos ambientais causados ou custos elevados de formas de produção de energia elétrica não renováveis (Termoelétricas diversas, Nuclear e entre outras) (CARVALHO, 2012), fez-se necessário a busca e utilização de fontes de energias renováveis. Vale ressaltar que apesar de grande parte da matriz energética brasileira ser provida por usinas hidrelétricas, que é uma fonte renovável, somente sua geração não é suficiente para suprir a demanda atual.

Dentre as fontes renováveis de energia, destaca-se a energia eólica como protagonista do tema deste trabalho. A obtenção da energia elétrica por meio da energia eólica ocorre através da transformação da energia cinética dos ventos em energia mecânica através de uma turbina, por meio do movimento de rotação das pás de um aerogerador (eCycle, 2018), por fim a energia mecânica é convertida em energia elétrica. Na última década houve um crescimento expressivo da capacidade instalada e na geração eolioelétrica, sendo que em 2014 apenas 4% (5GW) da capacidade instalada do Brasil era referente à usinas eólicas, havendo incremento desse número para 11% (19GW) em 2021 (EPE, 2021).

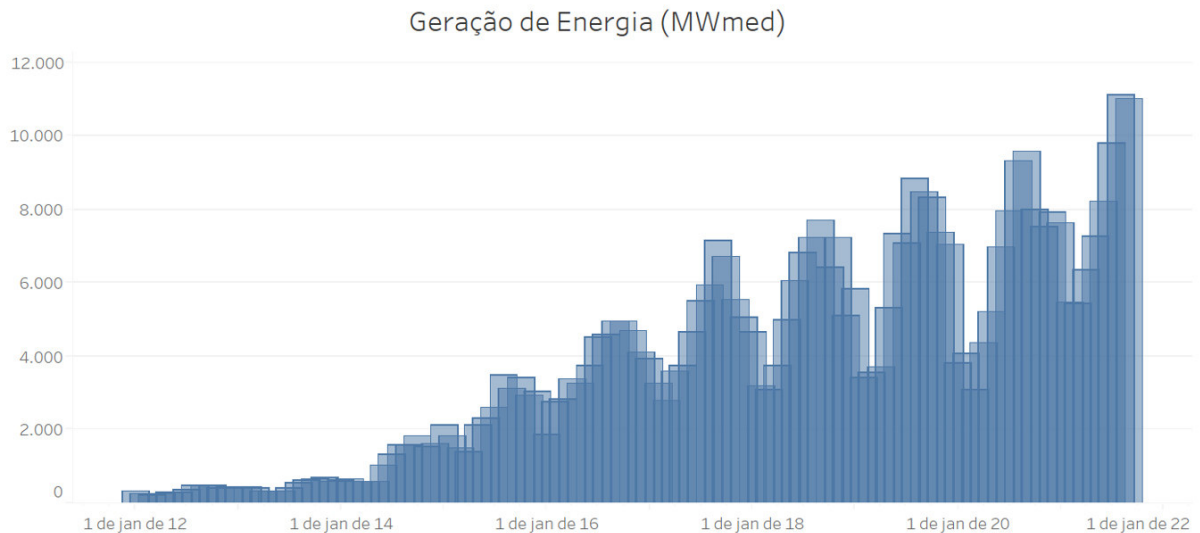
Na figura 1 pode-se observar um aumento de 9,14% da participação da geração de energia elétrica de fonte eólica em nossa matriz energética entre os anos de 2012 a 2020. Neste mesmo período é possível observar na figura 2 a evolução da geração eolioelétrica, considerando que em 2012 a mesma não chegava sequer a 1 MWmed, tendo em 2021 alcançado valores próximos a 11 MWmed.

Figura 1 – Porcentagem de geração de energia elétrica por tipo de usina em 2012 e 2020



Fonte: Elaborado pelo autor com dados de (ONS, 2021b)

Figura 2 – Evolução da geração de energia eolioelétrica de 2012 a 2021



Fonte: Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS, 2021b)

1.0.1 Controle de Geração

Com o intuito de manter a geração de energia elétrica otimizada para os agentes de distribuição, consumidores livres e interligações internacionais, o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) realiza o controle da geração em tempo real (Submódulo 10.6, PROREDE 2018).

Como uma das atividades para manter essa otimização, o ONS *"apura a geração de energia elétrica de usinas e o fluxo de intercâmbio de empreendimentos de importação de*

energia, despachados centralizadamente, e para usinas ou conjuntos de usinas eolioelétricas considerados na programação, com base no montante de geração e de intercâmbio de energia programados no Programa Diário de produção (PDP)" (Submódulo 6.5, PROREDE 2021).

Diante disso, a fim de manter os critérios para a confiabilidade do Sistema Interligado Nacional (SIN), como por exemplo a não sobrecarga do mesmo, em alguns casos são necessárias restrições de geração que podem ser solicitadas pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) para usinas solares, hidroelétricas, entre outras.

As restrições que tenham sido originadas externamente às instalações das respectivas usinas são classificadas como restrições por evento de *constrained-off*. Este tipo de restrição tem gerado discussões importantes no setor elétrico nos últimos anos.

Atualmente o *constrained-off* é definido pela resolução normativa nº 927 de março de 2021 da Agência Nacional de Energia Elétrica como:

Art. 1º Para efeitos desta Resolução, eventos de restrição de operação por *Constrained-off* são definidos como a redução da produção de energia por usinas eolioelétricas despachadas centralizadamente ou usinas/conjuntos de usinas eolioelétricas considerados na programação, decorrente de comando do Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS, que tenham sido originados externamente às instalações das respectivas usinas. (ANEEL, 2021a, p.1)

Devido recente publicação da regulamentação supracitada após anos de processos públicos no setor elétrico, em conjunto com a importância da geração eolioelétrica salientada a pouco, justifica-se esse trabalho.

1.1 Objetivos

Diante do exposto, o presente trabalho de conclusão de curso (TCC) tem como objetivos:

- Um breve apanhado sobre o histórico regulamentar do *constrained-off* e seu atual contexto;
- Verificar a viabilidade de aplicação de uma metodologia simplificada de cálculo da geração restringida baseada na metodologia do ONS com o intuito de permitir ao agente gerador acompanhar sua restrição de geração;

- Cálculo da receita frustrada que representa a geração restringida por *constrained-off* nos últimos seis meses para as empresas de geração centralizada
- Levantamento de pontos de discussão acerca da atual situação do *constrained-off*;
- Sugerir possíveis trabalhos futuros no tema em questão.

1.2 Estrutura do trabalho

Este trabalho está estruturado da seguinte forma:

- No Capítulo 1 é apresentado um panorama geral da situação e importância da geração de energia eólicoelétrica, assim como o entendimento do que são as restrições de geração e o *constrained-off*.
- O Capítulo 2 apresenta um apanhado geral da situação regulamentar do *constrained-off* ao longo dos anos e sua situação atual. Também é apresentado um breve estudo da Resolução Normativa nº 927 de 2021 que trata do *constrained-off*. Por fim, o capítulo apresenta o entendimento do acompanhamento do ONS das reduções de geração assim como as mudanças no submódulo 2.4 dos procedimentos de rede e sua metodologia para o cálculo de previsão da geração eólicoelétrica restringida.
- O Capítulo 3 apresenta a motivação deste trabalho assim como sua metodologia simplificada para para previsão da geração frustrada e levantamento do montante de dinheiro que representa a geração restringida por *constrained-off* nos últimos seis meses.
- o Capítulo 4 apresenta a análise e discussão dos resultados.
- No Capítulo 5 é feito levantamento de discussões acerca de todo o estudo feito sobre o tema, a conclusão e sugestões de trabalhos futuros que possam agregar na linha de pesquisa.

2 FUNDAMENTAÇÃO E DEFINIÇÕES

2.1 A regulamentação do *constrained-off* eólico

Como mencionado anteriormente, em 23 de março de 2021 houve a publicação pela ANEEL da Resolução Normativa nº 927/2021, que estabeleceu critérios e procedimentos de apuração e ressarcimento de restrição por *constrained-off* eólico. Anteriormente à essa publicação, as formas de ressarcimento e quem possuía direito a ele eram definidos por diversas resoluções e despachos. Sobre a questão de quem poderia ser compensado, é importante entender que no mercado de energia elétrica existem diferentes ambientes de contratação onde os geradores/vendedores de energia elétrica podem negociar. Sendo eles, o Ambiente de Contratação Livre (ACL) e o Ambiente de Contratação Regulada (ACR), definidos da seguinte forma:

ACR: Segmento do mercado no qual se realizam as operações de compra e venda de energia elétrica entre agentes vendedores e agentes de distribuição, precedidas de licitação, ressalvados os casos previstos em lei, conforme regras e procedimentos de comercialização específicos. (ANEEL, 2015b, p.1)

ACL: Segmento do mercado no qual se realizam as operações de compra e venda de energia elétrica, objeto de contratos bilaterais livremente negociados, conforme regras e procedimentos de comercialização específicos. (ANEEL, 2015a, p.1)

De forma superficial, pode-se entender que no ACR existe uma negociação onde o agente gerador negociará sua energia com um agente de distribuição que distribuirá essa energia ao consumidor final. Enquanto no ACL ocorre a livre negociação (com suas devidas regras) do montante de energia a ser contratado entre o agente gerador e as comercializadoras, que por fim vendem a energia ao consumidor final. Vale ressaltar que também é possível negociação direta entre agente gerador e consumidor final, contudo esses casos são minoria.

Pelo tratamento e regras diferentes entre o ACR e ACL, surgiram controvérsias no tema do *constrained-off*. Tais controvérsias serão melhor abordadas posteriormente neste trabalho, por hora é importante saber que por muito tempo o ACL não possuiu o

direito de ressarcimento por eventos de restrição por *constrained-off*.

Dito isso, é importante salientar que existe um marco legal que prevê a possibilidade de compensação aos geradores por restrições de operações por *constrained-off*. A saber, o art. 1º, § 10, inciso I da Lei nº 10.848/2004 estabeleceu previsão de pagamento de encargo para cobertura dos serviços do sistema, prestados aos usuários do SIN de tal forma que a lei permite que as restrições sejam custeadas por encargos setoriais tanto no ACR como no ACL (Ribeiro, 2021).

Desse modo, no momento em que surgem controvérsias e que a presença da geração eólioelétrica torna-se cada vez maior em nossa matriz energética, fez-se necessário incluir o tema na agenda regulatória da ANEEL. Dito isso, a discussão sobre a regulamentação foi objeto da Consulta Pública (CP) nº 8/2018 e Audiência Pública (AP) nº 34/2019 (Ribeiro, 2021).

Entende-se como Consulta Pública (CP) um estágio avançado da discussão onde a ANEEL submete minuta de norma, de contrato de concessão, ou de Relatório de Análise de Impacto Regulatório (AIR) à apreciação da sociedade. Esta é realizada exclusivamente por intercâmbio de documentos, ou seja, contribuições de forma escrita (ANEEL, 2019). Entende-se como Audiência Pública (AP) ocasião por meio da qual a Diretoria da ANEEL forma juízo ou toma decisão sobre matéria relevante, podendo ser entendido, também, como um estágio mais avançado de discussão. Neste caso, a Diretoria da ANEEL convida a sociedade a apresentar suas contribuições, exclusivamente, por meio de manifestação oral em sessão pública (ANEEL, 2019). As CPs e APs possuem objetivos similares, com formas de participação e discussão diferentes.

2.1.1 Marcos temporais

Neste processo de regulamentação, pode-se citar marcos temporais de grande relevância para o seu entendimento. Sendo eles: (i) Publicação da Resolução Normativa nº 637/2014, que estabeleceu as Regras de Comercialização de 2015; (ii) Publicação do Despacho nº 2.881/2017; (iii) Publicação do Despacho nº 2.303/2019 e (iv) Publicação da Resolução Normativa nº 927/2021 (Ribeiro, 2021).

2.1.1.1 2014: i - A Resolução Normativa nº 637/2014

A Resolução Normativa nº 637/2014 aprovou as Regras de Comercialização de Energia Elétrica (órgão responsável por viabilizar a comercialização de energia elétrica no mercado brasileiro e conhecido pela sigla CCEE) e ficou estabelecido que a CCEE deveria publicar (até 31 de dezembro de 2014) as Regras de comercialização considerando a Nota Técnica nº 123/2014-SEM/ANEEL. Essa nota técnica trouxe o entendimento de que os dados de medição anemométrica (dados de vento) seriam adequados para cálculo da energia não fornecida por *constrained-off* (Ribeiro, 2021).

Neste momento, apesar de estabelecer um tratamento regulatório sobre o assunto, a Superintendência de Estudos Econômicos de Mercado (SEM) observou a complexidade do assunto e orientou instauração de audiência pública para o tema. Enquanto isso a ANEEL ficou responsável por realizar o cálculo dos valores a serem ressarcidos para os agentes e encaminhá-los para a CCEE (Ribeiro, 2021). Naquele momento, tanto ACR como ACL eram elegíveis para receber o ressarcimento.

2.1.1.2 2017: ii - O Despacho nº 2.881/2017

Em 2017 a Superintendência de Regulação Econômica e Estudos de Mercado (SRM) publicou o Despacho nº 2.881/2017, que analisou o pedido de reconhecimento de *constrained-off* eólico para algumas usinas. Contudo, após verificação da SRM, notou-se que tais usinas haviam gerado energia suficiente para atender aos seus contratos regulados, sendo assim não teriam direito ao ressarcimento por energia não fornecida (Ribeiro, 2021).

O posicionamento da SRM neste despacho foi de que o ressarcimento só caberia até o limite do montante contratado no âmbito do ACR. Além disso, também levantou o ponto de que por conta da geração e os riscos de restrição no ACL serem tratadas entre vendedor e comprador, não haveria obrigação legal ou contratual da obrigação de ressarcimento financeiro para os agentes no ACL por motivos de *constrained-off* (Ribeiro, 2021).

Após sentir-se prejudicado, o agente interpôs recurso administrativo que foi tratado pelo Despacho nº 377/2018, no qual o diretor-relator da ANEEL em questão concorda com a SRM. Sendo assim, a partir de 2017 houve inflexão no posicionamento da ANEEL, negando assim o ressarcimento em relação ao *constrained-off* no âmbito do ACL

(Ribeiro, 2021).

Tendo em vista que o diretor-relator do Despacho nº 377/2018 foi o mesmo diretor-relator que anteriormente havia reconhecido o ressarcimento do *constrained-off* para o ACL, observa-se uma controvérsia que deixou ainda mais claro a necessidade de instauração de Consulta Pública e Audiência Pública como recomendado pela SEM em 2014. Naquele mesmo ano (2018) foi realizada a CP nº 8/2018 acerca do tema do *constrained-off*.

2.1.1.3 2019: iii - O Despacho nº 2.303/2019

Após o fim da CP nº 8/2018, foi recomendada abertura de Audiência Pública. Em 2019 houve a AP nº 34/2019 para continuar as discussões sobre o tema do *constrained-off*. Com a abertura da AP, a ANEEL determinou a CCEE que suspendesse todos os ressarcimentos relativos a usinas eólicas que tivessem pedidos de reconhecimento de *constrained-off* até o fim da supracitada AP (Ribeiro, 2021). Tal decisão foi acatada e informada através do Despacho nº 2.303/2019.

2.1.1.4 2021: iv - Publicação da Resolução Normativa nº 927/2021

Para a publicação da Resolução Normativa referente ao *constrained-off* eólico era necessário resolver as discussões e controvérsias ocorridas, principalmente em relação ao âmbito do ACL.

Pela orientação da SEM em 2014, para o cálculo do ressarcimento no âmbito do ACL deveria ser utilizado o Mecanismo Auxiliar de Cálculo (MAC). Contudo, a utilização do mesmo não foi expressada nas Regras de Comercialização de 2015, o que na visão do Diretor-relator implicou na falta de uma regra geral para a compensação (Ribeiro, 2021).

O Diretor também acredita que houve um erro na decisão da SEM em 2014. Além disso, menciona que caso a compensação fosse feita como proposta, os consumidores cativos seriam impactados. Após discussões sobre estes e outros tópicos mais aprofundados, a Diretoria decidiu que para a publicação da Resolução Normativa, os eventos de *constrained-off* deveriam ser tratados como descritos abaixo (Ribeiro, 2021):

- *para eventos de constrained-off eólico ocorridos até setembro de 2021, relativos ao ACR, seria aplicado o “procedimento consagrado na análise de casos concretos”, sendo que a SRG deveria instaurar Tomada de Subsídios, em até*

5 dias úteis após a publicação da Resolução Normativa nº 927/2021, sobre a Regra de Comercialização a ser utilizada nos cálculos de *constrained-off* eólico;

- para eventos de *constrained-off* eólico ocorridos até setembro de 2021, relativos ao ACL, seria analisado cada caso concreto, motivo por que não houve comando específico a tais situações na deliberação que levou à Resolução Normativa nº 927/2021;
- para eventos de *constrained-off* eólico ocorridos a partir de outubro de 2021, relativos ao ACR e ACL, seria aplicada nova metodologia, presente na Resolução Normativa nº 927/2021.

(Ribeiro, 2021, p.9)

Sendo assim, a partir da publicação da Resolução Normativa (REN) nº 927/2021 os eventos de *constrained-off* ocorridos a partir de outubro de 2021 serão tratados de forma análoga tanto para ACR como para ACL através de nova metodologia, que será explanada posteriormente e tida como um dos objetivos deste TCC . Dito isso, o presente trabalho se limitará na nova metodologia, contudo é necessário abordar algumas nuances da REN nº 927/2021 para prosseguirmos.

2.2 Um breve estudo da REN nº 927/2021

Neste seção serão ressaltados os principais pontos para o entendimento das diretrizes trazidas pela REN (Resolução Normativa) nº 927/2021. O primeiro deles, como já citado anteriormente, é a definição do conceito de *constrained-off*:

Art. 1º Para efeitos desta Resolução, eventos de restrição de operação por *Constrained-off* são definidos como a redução da produção de energia por usinas eolioelétricas despachadas centralizadamente ou usinas/conjuntos de usinas eolioelétricas considerados na programação, decorrente de comando do Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS, que tenham sido originados externamente às instalações das respectivas usinas.
(ANEEL, 2021a, p.1)

Em seguida, a resolução define como instalações externas as instalações de transmissão, sejam Rede Básica ou demais instalações no âmbito da distribuição. Também é definida na resolução que as instalações, mesmo que externas, que sejam de uso do

gerador (exclusivo ou compartilhado) não são consideradas como instalações externas no que tange ao *constrained-off* (ANEEL, 2021a).

Em seu segundo artigo a resolução classifica os eventos de restrição de operação por *constrained-off* da seguinte forma:

I - Razão de indisponibilidade externa: motivados por indisponibilidades em instalações externas às respectivas usinas ou conjuntos de usinas conforme definições do art. 1º.

II – Razão de atendimento a requisitos de confiabilidade elétrica: motivados por razões de confiabilidade elétrica dos equipamentos pertencentes a instalações externas às respectivas usinas ou conjuntos de usinas conforme definições do art. 1º e que não tenham origem em indisponibilidades dos respectivos equipamentos.

III - Razão energética: motivados pela impossibilidade de alocação de geração de energia na carga. (ANEEL, 2021a, p.1)

É importante destacar que segundo a resolução apenas os eventos classificados no inciso I supracitado serão ressarcidos. Para os casos do inciso II, o voto condutor da decisão explica que: *“a necessidade de se reduzir ou limitar a geração das usinas eólicas nessas situações, faz parte da dinâmica da operação de sistemas elétricos, sendo, portanto, risco ordinário de quantidade aos quais todos os agentes, indistintamente, estão submetidos, em regra”* (ANEEL, 2021b). Sendo assim, como elucidado por (Ribeiro, 2021), tais eventos não seriam considerados extraordinários.

Para os casos do inciso III, as restrições ocorrem em momentos de pouca demanda de energia elétrica (madrugadas e fins de semana), sendo impossível alocar esta carga. Deste modo, é compreensível que tal situação não seja considerada também como risco ordinário do agente (ANEEL, 2021b).

A resolução ressalta que o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) deve calcular a frustração de geração ocorrida por conta do evento de *constrained-off* a partir da curva de produtividade da usina eólicoelétrica. Ademais, que esta curva deve ser elaborada pelo ONS a partir dos dados de geração e medições anemométricas da usina no período de um ano, que deverão ser disponibilizadas pelo agente gerador desde a entrada em operação comercial da usina (ANEEL, 2021a).

Para o entendimento do que seria a operação comercial, é necessário compreen-

der que após a conclusão das obras do projeto da usina elétrica relacionadas à geração de energia, o projeto deve passar por uma fase de operação em teste, com o intuito de "*atender às próprias necessidades de ajustes de equipamentos e verificação de seu comportamento do ponto de vista sistêmico e atendimento de consumo próprio*" (ANEEL, 2013).

Com o período de operação em teste concluído com êxito, o projeto segue para entrada em operação comercial, definida pelo inciso V do artigo 2º da REN nº 583 de 2013 como:

V - operação comercial: situação operacional em que a energia produzida pela unidade geradora está disponibilizada ao sistema, podendo atender aos compromissos mercantis do agente ou para o seu uso exclusivo; (ANEEL, 2013, p.2)

A curva de produtividade pode ser entendida como a relação entre a potência gerada (de saída) da usina e a velocidade do vento. Sabe-se que ao longo dos dias, semanas e meses, o comportamento das massas de ar não são constantes, sendo influenciados por fatores como temperatura e precipitações. Sendo assim, a velocidade média dos ventos em determinados intervalos de tempo não é a mesma, modificando assim o perfil de geração, ou seja, produtividade da usina (CARVALHO, 2012).

Caso a usina tenha entrado em operação comercial a menos de um ano, o ONS deve continuar a elaboração da curva de produtividade até completar o período de um ano. Enquanto isso, o cálculo deverá ser feito baseado no segundo menor valor de energia gerada nos últimos dez períodos imediatamente anteriores coincidentes com o horário em que ocorreu a restrição. Se ainda assim estes dez períodos forem de data anterior à entrada em operação comercial da usina, a garantia física da usina eolioelétrica deverá ser utilizada para completar os períodos (ANEEL, 2021a).

A garantia física é definida no inciso VI do artigo 2º da resolução normativa nº 514 de 2012 da ANEEL como:

VI. Garantia Física: é o montante, em $MW_{médios}$, correspondente à quantidade máxima de energia relativa à Usina que poderá ser utilizada para comprovação de atendimento de carga ou comercialização por meio de contratos, estabelecido na forma constante da Portaria MME nº 258, de 28 de julho de 2008; (ANEEL, 2012, p.1)

Em suma, é necessário uma garantia de quanto será gerado por aquele empre-

endimento. Essa garantia é elaborada através de dados de medições de vento (no caso eólico) que ocorrem durante anos na área do projeto.

A resolução prossegue definindo que o ressarcimento de frustração de geração por *constrained-off* será realizado apenas para usina ou conjunto de usinas, em que, a soma dos tempos de restrição de geração acumulados desde o início do ano civil superem o valor de 78h (setenta e oito horas) (ANEEL, 2021a).

Isto ocorre por conta da compreensão da ANEEL de quem mesmo em um sistema adequado, existe uma quantidade usual e esperada de indisponibilidade das instalações de transmissão. Dito isso, a ANEEL utilizou-se do Relatório de Análise Estatística de Indisponibilidades Programadas e Não Programadas de 2018 publicado pelo ONS para adquirir, através de uma média móvel dos últimos 5 anos, um valor de referência para as "indisponibilidades esperadas". O valor encontrado foi de 0,8923% o que totaliza, em um ano, 78h (setenta e oito horas) (Ribeiro, 2021). Por conta dessa média móvel ser dos últimos 5 anos, entende-se que ela pode ser atualizada. Dito isso, no parágrafo 3º do artigo 4º a resolução ressalta que:

§3º Fica autorizado o ONS a atualizar o valor de 78h (setenta e oito horas), constante do §2º, 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. (ANEEL, 2021a, p.3)

2.2.1 O montante da frustração de geração

Segundo a REN nº 927/2021, o montante energético da frustração de geração será dado pela seguinte formulação:

$$\text{Frustração de geração} = \text{mín}(G_{anem}; E_{cont}) - G_{ver} \quad (2.1)$$

Onde:

G_{anem} : geração estimada em função da velocidade do vento medido no anemômetro (ANEEL, 2021a);

E_{cont} : montante de energia vendida em contratos associados à respectiva usina eolielétrica;

G_{ver} : energia gerada.

Diante dessa formulação, é intuitivo perceber que a frustração de geração será dada pela subtração do que deveria ser gerado e o que foi gerado de fato. Contudo, vale ressaltar que o valor que representará o que deveria ser gerado é a escolha do menor valor entre a geração estimada e o montante de energia vendida em contratos. Apesar do intuito deste trabalho não ser questionar a resolução, é importante salientar que este é um dos pontos que gerou discussão, pela questão de que se o agente gerador produzir mais energia do que o acordado nos contratos, é permitido a venda deste excedente para outros compradores.

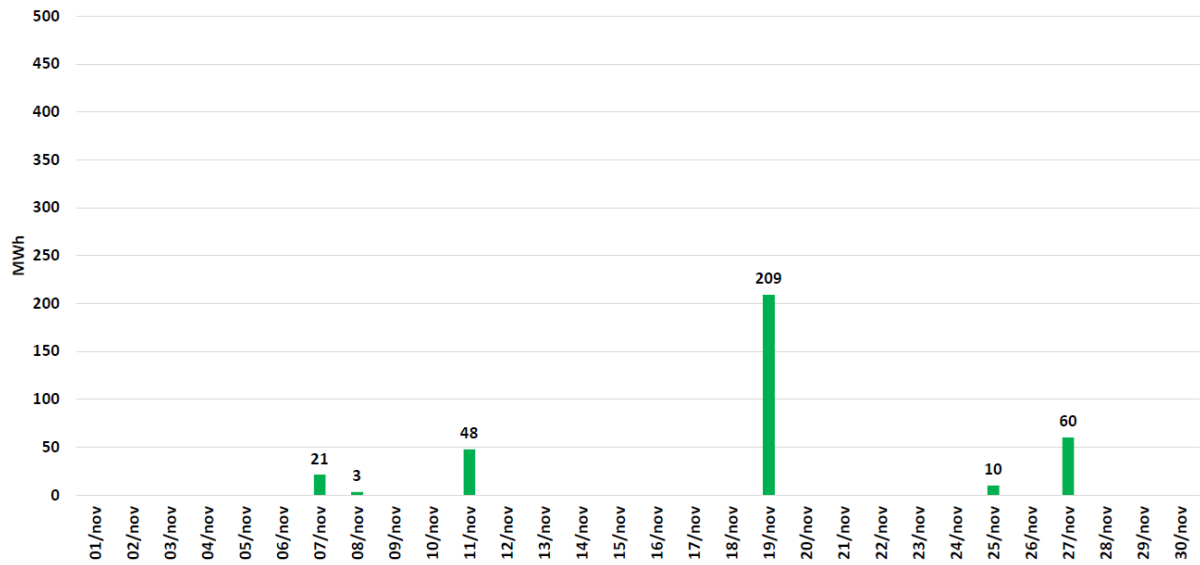
2.3 Acompanhamento das Reduções de Geração do ONS

Com o crescimento das discussões sobre o *constrained-off*, o ONS passou a realizar e publicar o acompanhamento mensal das reduções por indisponibilidade externa de geração, que teve sua primeira publicação em julho de 2020. No momento de escrita deste trabalho, estão disponíveis dezoito relatórios de acompanhamento de reduções de geração, sendo o último publicado referente ao mês de novembro de 2021. Para ter acesso aos relatórios, é necessário a solicitação de criação de uma conta no sistema do ONS. Tal procedimento é gratuito.

Vale salientar que este relatório não se limita a geração eólica ou apenas as reduções por indisponibilidade externa, sendo possível (de acordo com o interesse) observar também as reduções por razões de confiabilidade elétrica e de razão energética de usinas hidráulicas, termelétricas e fotovoltaicas. É de suma importância ressaltar que as reduções apresentadas no relatório ocorreram visando manter os critérios de segurança da operação e o equilíbrio carga x geração em períodos de demanda reduzida (ONS, 2021a).

O relatório apresenta os valores em MWh das reduções de geração em comparação com meses anteriores, assim como gráficos das reduções ao longo dos últimos doze meses. Do mês em questão, os gráficos são divididos por dias e por usinas onde houve a restrição. Também são apresentadas tabelas com os dias e duração das reduções. Dito isso, é interessante visualizar através da Figura 3 que as reduções raramente ocorrem todo dia, e esse comportamento de haver um certo intervalo entre as reduções repete-se também em relatórios anteriores.

Figura 3 – Redução de geração eólicoelétrica no SIN (MWh) - Indisponibilidade externa - Diário em Novembro de 2021



Fonte: Acompanhamento das Reduções de Geração de Novembro 2021 - ONS

É possível perceber que a publicação do primeiro relatório de acompanhamento das reduções de geração do ONS data de antes da publicação e entrada em vigência da resolução normativa nº 927/2021. Dito isso, apenas a partir do relatório de outubro de 2021 a Redução Eólica é apresentada tal qual supracitado na referida resolução, ou seja, utilizando-se da geração estimada.

Sendo assim, com os principais pontos da REN nº 927/2021 e do acompanhamento das reduções de geração do ONS elucidados, agora é necessária a compreensão dos submódulos dos procedimentos de rede do ONS revisados acerca de como serão plotadas as curvas de produtividade e calculadas tais gerações estimadas.

2.4 A curva de produtividade e a geração eólicoelétrica estimada

Com as diretrizes da REN nº 927/2021 e a necessidade da utilização da curva de produtividade para o cálculo da geração estimada, foi necessário a revisão de alguns dos submódulos dos procedimentos de rede do ONS, com a finalidade de incluir a nova metodologia de cálculo.

O principal submódulo alterado a ser abordado aqui é o 2.4, que trata dos critérios para estudos energéticos e hidrológicos. Sua versão alterada pode ser acessada através do processo da REN nº 927/2021 em (ONS, 2021c). Assim como o relatório de

acompanhamento das reduções de geração, é necessário possuir uma conta no sistema do ONS para acesso.

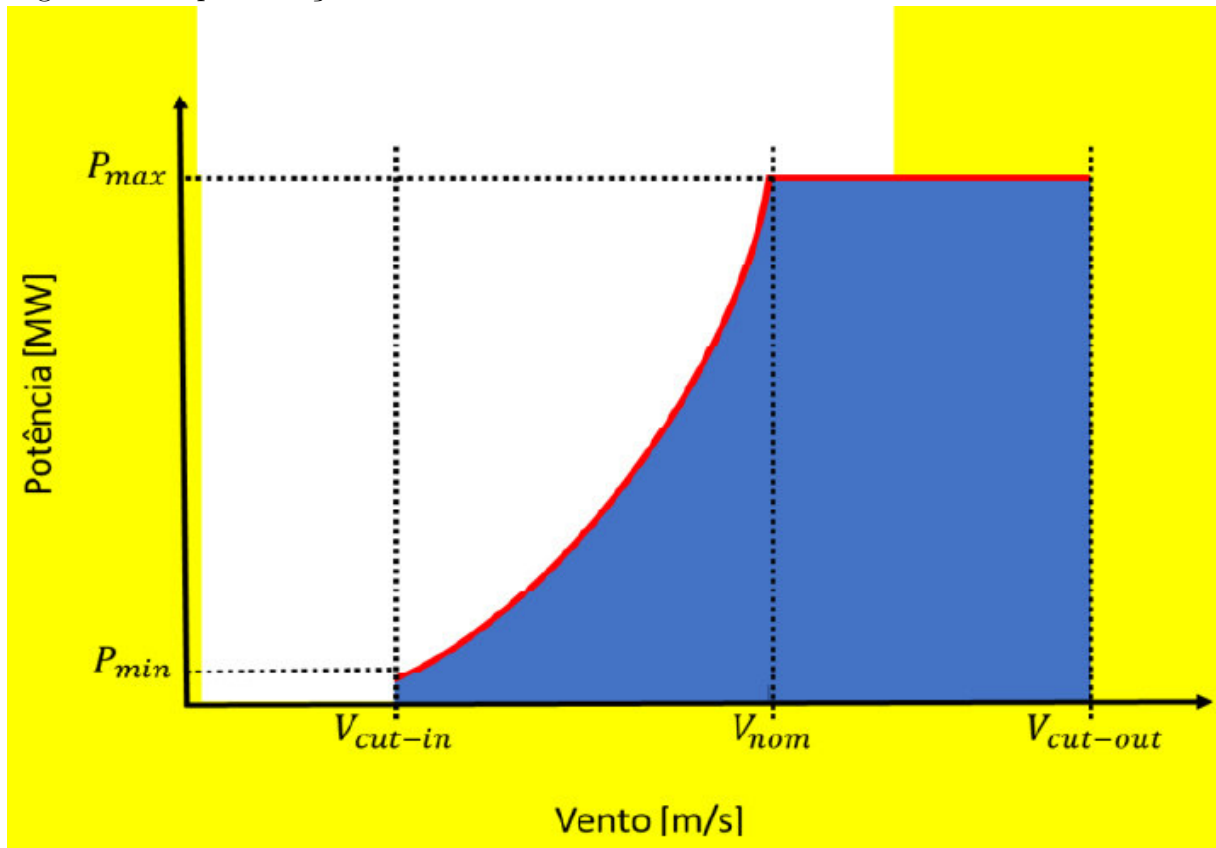
O submódulo 2.4 coloca como premissa que para o cálculo da curva é necessário o histórico de vento e de geração das usinas eólicas, sendo o envio desses dados de responsabilidade do agente gerador através do sistema de supervisão do ONS.

2.4.1 Critérios Gerais para obtenção da curva de produtividade

Após tratamento dos dados eles são utilizados para alimentar um modelo (algoritmo) com função de criação das curvas Vento x Potência (VxP). Com a curva de produtividade (VxP) obtida, ela é utilizada para obtenção da geração estimada através dos dados de medição anemométrica (ONS, 2021c). Dito isso, com a curva de produtividade em mãos é compreensível que a aplicação de sua equação é suficiente para obter a geração estimada. Contudo, o desafio do ONS foi justamente a forma como esse modelo deve gerar essa curva VxP.

Para entendimento de uma curva de produtividade eólica, é necessário entender que existem três velocidades de vento importantes, sendo elas a velocidade de *cut-in*, a velocidade de *cut-out* e a velocidade nominal. A velocidade de *cut-in* é a mínima velocidade de vento que permite o início da geração de energia. A velocidade de *cut-out* é a velocidade máxima de vento que em que a máquina ainda poderá operar sem ser necessário seu desligamento. A velocidade nominal é aquela em que a máquina gera sua maior quantidade de potência (ONS, 2021c). Tais velocidades são representadas na figura 4 respectivamente como V_{cut-in} , $V_{cut-out}$ e V_{nom} . A figura 4 ilustra a curva de potência gerada pela máquina diante de cada uma dessas velocidades.

Figura 4 – Representação física da curva Vento x Potência



Fonte: Submódulo 2.4 - Procedimentos de Rede (ONS, 2021c)

2.4.2 A equação geral da curva de produtividade

Com base nos dados coletados, a curva de produtividade é modelada através de duas funções sigmóides (funções caracterizadas por possuírem formato de S) como pode ser observado na figura 5. As indicações contidas na figura 5 são as características próprias de cada parque eólico (PROREDE, 2021), onde:

V_{01} : Velocidade de *cut-in*;

V_{max1} : Velocidade nominal para ser possível a geração em potência máxima da máquina;

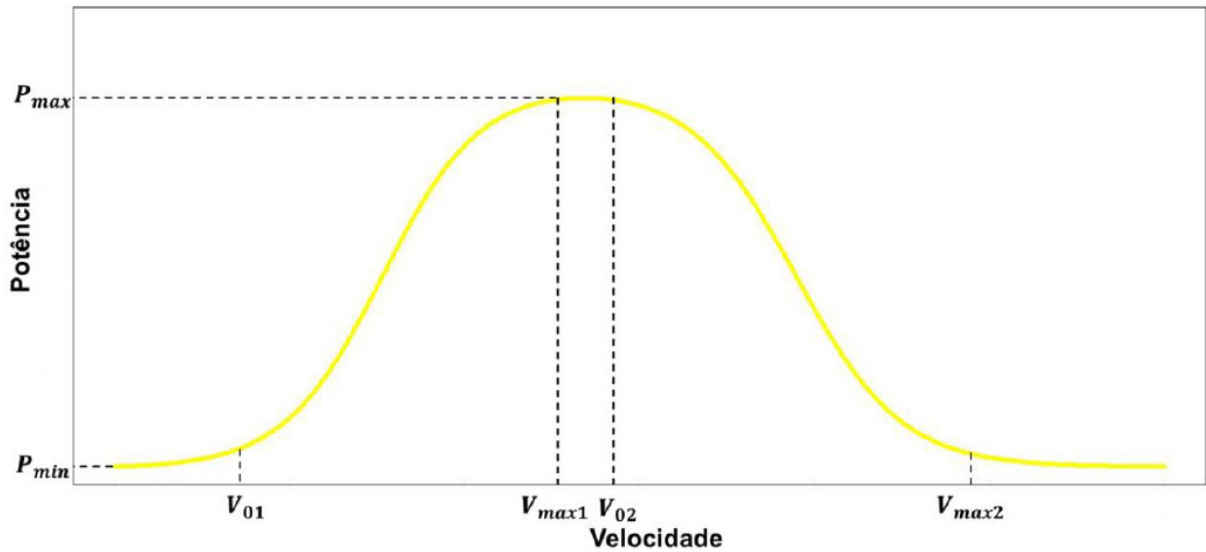
V_{02} : Velocidade de vento suficientemente alta em que a geração da máquina começa a decair;

V_{max2} : Velocidade de *cut-out*;

P_{min} : Potência mínima gerada a partir da velocidade de *cut-in*;

P_{max} : Potência máxima de geração da máquina.

Figura 5 – Curva genérica para criação das curvas Vento x Potência



Fonte: Submódulo 2.4 - Procedimentos de Rede (ONS, 2021c)

Através da figura 5 pode-se ter uma noção do formato geral da curva de produtividade de parques eólicos. É importante ressaltar que esta curva pode ser mais "estreita" ou "larga", assim como também pode apresentar um pico menor ou maior. Isso depende das características do parque eólico.

A equação geral para se modelar tal curva é apresentada pelo Submódulo 2.4 dos Procedimentos de Rede revisados como:

$$P(v) = P_{\min} + \frac{P_{\max} - P_{\min}}{1 + e^{-\frac{5}{t_{s1}} \times (v - t_{c1})}} - \frac{P_{\max}}{1 + e^{-\frac{5}{t_{s2}} \times (v - t_{c2})}} \quad (2.2)$$

Onde:

$$t_{s1} = V_{\max1} - V_{01} \quad (2.3)$$

$$t_{s2} = V_{\max2} - V_{02} \quad (2.4)$$

$$t_{c1} = \frac{V_{\max1} + V_{01}}{2} \quad (2.5)$$

$$t_{c2} = \frac{V_{\max2} + V_{02}}{2} \quad (2.6)$$

As equações acima serão as principais ferramentas na metodologia deste trabalho.

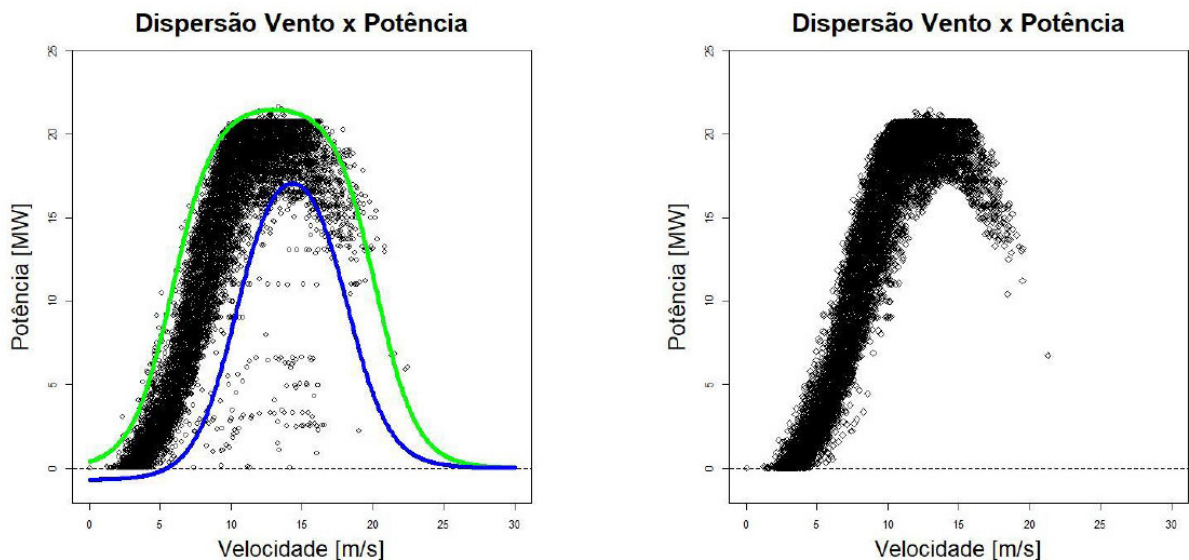
2.4.3 A eliminação da dispersão dos dados

Apesar das máquinas utilizadas em parques eólicos possuírem os parâmetros que definem as características das equações supracitadas, a função desenvolvida pelo ONS tem como intenção encontrar estes parâmetros individualmente por usina ou conjunto de usinas através dos dados empíricos, ou seja, criar uma curva de produtividade prática, de como realmente está ocorrendo a geração naquela usina através dos dados de um ano.

Dito isso, para se ter uma fidelidade na curva de produtividade modelada pela função, é necessário eliminar dispersões que não representam valores plausíveis nos dados fornecidos pelas usinas. Sendo assim, após o recebimento e plotagem dos dados o modelo do ONS simula limites inferiores e superiores ao redor dos pontos plotados, de forma que tais limites seguem a equação geral da curva de produtividade (ONS, 2021c).

É possível entender este tratamento através de figura 6. Observando o lado esquerdo da figura, os pequenos círculos pretos representam os dados fornecidos e as curvas verde claro e azul marinho representam respectivamente os limites superiores e inferiores. Ao lado direito percebe-se a exclusão dos dados encontrados fora dos limites inferiores e superiores.

Figura 6 – Eliminação da dispersão



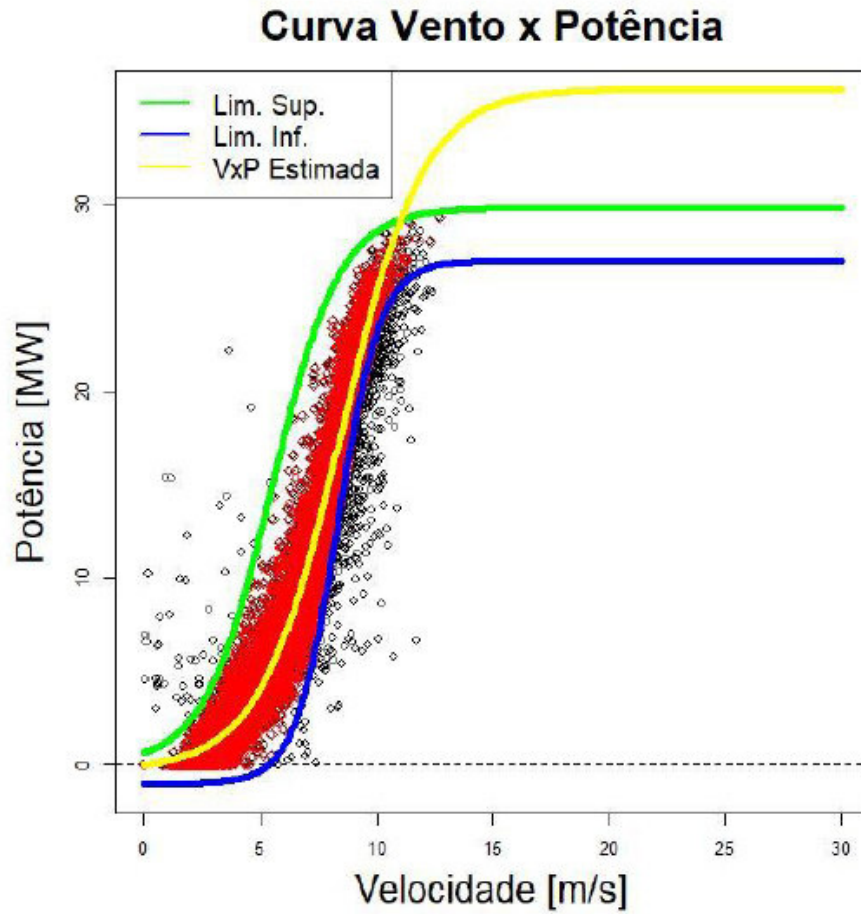
Vale salientar que tais dados não representam necessariamente falhas na medições ou no fornecimento dos dados. Geralmente estas dispersões são causadas justamente por eventos de restrição de geração (onde a usina não pode operar com a potência condizente com a velocidade do vento) ou até mesmo por manutenção em equipamentos, ou seja, mesmo que os dados não estejam incorretos eles não têm utilidade para calibração do modelo do ONS (ONS, 2021c).

Após este tratamento o modelo consegue estimar uma curva de Vento x Potência média entre os limites inferiores e superiores, que será então utilizada como a curva de Vento x Potência daquela usina.

2.4.4 A problemática da ausência de dados

Quando a quantidade ou qualidade de dados fornecidos pela usina é insuficiente, alguns erros de estimação podem ocorrer, principalmente na zona de saturação (zona de potência máxima mesmo com aumento da velocidade de vento), como demonstrado pela curva amarela da figura 7.

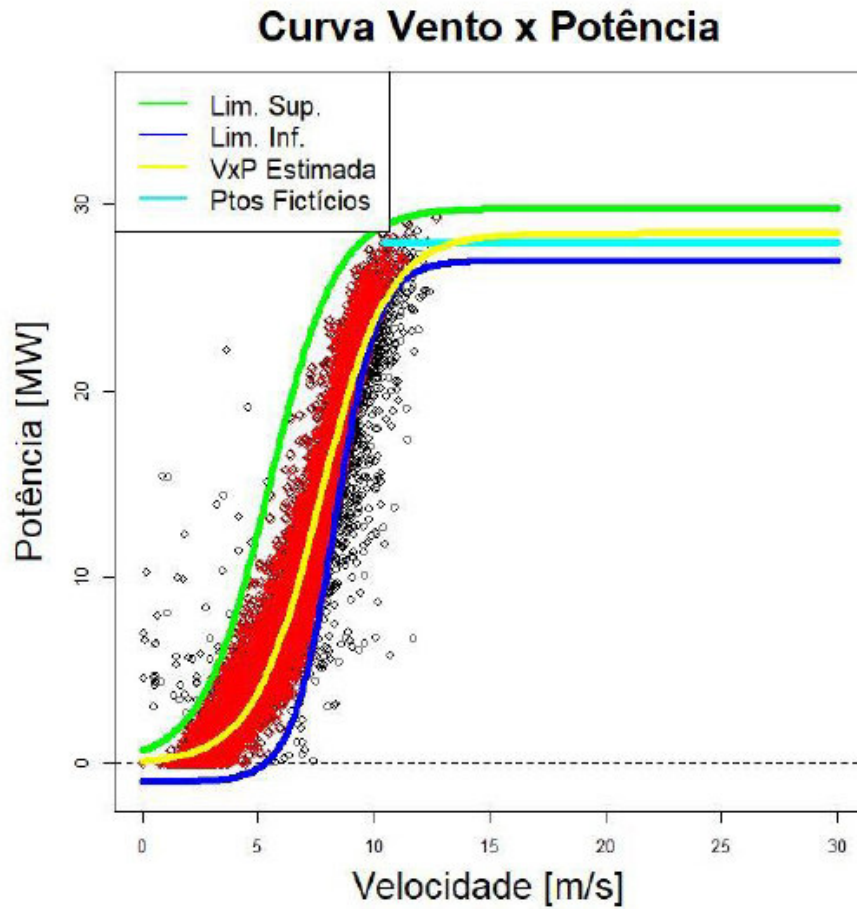
Figura 7 – Curva de Vento x Potência com dados insuficientes



Fonte: Submódulo 2.4 - Procedimentos de Rede (ONS, 2021c)

Para solucionar este problema, utiliza-se um artifício de inclusão de pontos fictícios ao conjunto de dados utilizados. Geralmente a inclusão desses pontos ocorre próximo das maiores velocidades de vento e da geração eólicoelétrica associadas a elas, de forma que o vetor de dados de vento adicionados seja relacionado a um vetor de mesmo tamanho contendo as gerações correspondentes (ONS, 2021c). O conjunto de dados fictícios pode ser observado em azul ciano na figura 8, percebe-se que a inserção dos mesmos ocorre a estabilização da curva média de Vento x Potência estimada (em amarelo).

Figura 8 – Curva de Vento x Potência após inserção dos dados fictícios



Fonte: Submódulo 2.4 - Procedimentos de Rede (ONS, 2021c)

Diante disso, é possível perceber que a metodologia de estimação de curvas resumida aqui e descrita no submódulo 2.4 dos procedimentos de rede possui a capacidade de modelar usinas com a região de saturação bem definida, assim como usinas que possuem a característica de decaimento. Ademais, a capacidade de melhorar a qualidade da curva estimada e contornar uma possível insuficiência dos dados.

3 METODOLOGIA

3.1 Introdução

Diante do exposto na fundamentação teórica, o trabalho em questão realizará a aplicação de uma metodologia simplificada como uma das possibilidades para que empresas de geração centralizada que possuem parques eólicos consigam conferir se sua produção de energia elétrica acompanha o desejado da sua curva de produtividade teórica, caso contrário, com leves alterações manuais das variáveis será possível a obtenção de uma curva prática que mais se aproxima da situação real de sua usina eólicoelétrica. Com essa curva de produtividade em mãos, é possível então prever a geração estimada.

Dito isso, é importante ressaltar que tal metodologia procura fornecer valores aproximados dos que o ONS efetivamente calcula. O cálculo do ONS no submódulo 2.4 dos procedimentos de rede demonstrado na fundamentação teórica envolve o uso de uma função que se utiliza de redes neurais e possui certa complexidade. Tendo em vista que a grande maioria das empresas não possui acesso a esse tipo de função, uma metodologia simplificada que possa gerar valores próximos para acompanhamento é necessária.

3.2 Da aquisição dos dados

Para realização deste trabalho são necessários dados de geração e anemométricos de uma usina eólicoelétrica. Uma empresa do ramo de geração centralizada forneceu os dados necessários tornando possível a realização deste trabalho.

O primeiro grupo de dados fornecido conta com medições de produção de energia em kWh e medições anemométricas em m/s de 49 (quarenta e nove) aerogeradores. Os dados datam de 1 de junho de 2021 até 1 de janeiro de 2022, totalizando 214 dias de medições que foram realizadas com intervalos de 5 minutos. Sendo assim, esse primeiro grupo de dados que se nomeia aqui de Dados das Turbinas possui 5.136 (cinco mil cento e trinta e seis) horas de medições, totalizando 61.632 (sessenta e um mil seiscentos e trinta e dois) dados por aerogerador. Os dados das turbinas como sugerido pelo nome provêm das medições no aerogerador.

O intervalo de tempo (que totaliza 7 meses) dos dados foi escolhido motivado pelo fato de que o último aerogerador deste projeto entrou em operação comercial ao final do

mês de maio. Isso é necessário tendo em vista que o texto da REN nº 927/2021 apresentado anteriormente indica essa condição para o ONS. Também é importante esclarecer que apesar desta mesma resolução exigir que a curva de produtividade calculada pelo ONS deva possuir dados de medições de pelo menos 10 meses da usina em operação comercial, os 7 meses que se têm posse são suficientes para a demonstração da metodologia simplificada deste trabalho.

3.3 Plotagem da Curva de Produtividade Teórica

Para a plotagem da curva de produtividade teórica da usina, são necessárias as equações 2.2 a 2.6. Para melhor visualização, repetem-se as equações abaixo:

$$P(v) = P_{\min} + \frac{P_{\max} - P_{\min}}{1 + e^{-\frac{5}{t_{s1}} \times (v - t_{c1})}} - \frac{P_{\max}}{1 + e^{-\frac{5}{t_{s2}} \times (v - t_{c2})}}$$

$$t_{s1} = V_{\max1} - V_{01}$$

$$t_{s2} = V_{\max2} - V_{02}$$

$$t_{c1} = \frac{V_{\max1} + V_{01}}{2}$$

$$t_{c2} = \frac{V_{\max2} + V_{02}}{2}$$

Onde:

V_{01} : Velocidade de *cut-in*;

$V_{\max1}$: Velocidade nominal para ser possível a geração em potência máxima da máquina;

V_{02} : Velocidade de vento suficientemente alta em que a geração da máquina começa a decair;

$V_{\max2}$: Velocidade de *cut-out*;

P_{\min} : Potência mínima gerada a partir da velocidade de *cut-in*;

P_{\max} : Potência máxima de geração da máquina.

Todos os 49 aerogeradores do projeto são do mesmo fornecedor, fabricante e modelo. Sendo assim, os dados supracitados são iguais para todos. Os dados podem ser

conferidos a seguir:

$$\begin{array}{lll} V_{01} = 3 \text{ m/s} & V_{\max 1} = 11,5 \text{ m/s} & V_{02} = 18 \text{ m/s} \\ V_{\max 2} = 24,5 \text{ m/s} & P_{\min} = 73 \text{ kW} & P_{\max} = 4.200 \text{ kW} \end{array}$$

De posse desses dados aplica-se nas equações supracitadas. Obtém-se:

$$t_{s1} = (11,5 - 3) \rightarrow t_{s1} = 8,5$$

$$t_{s2} = (24,5 - 18) \rightarrow t_{s2} = 6,5$$

$$t_{c1} = \frac{(11,5 + 3)}{2} \rightarrow t_{c1} = 7,25$$

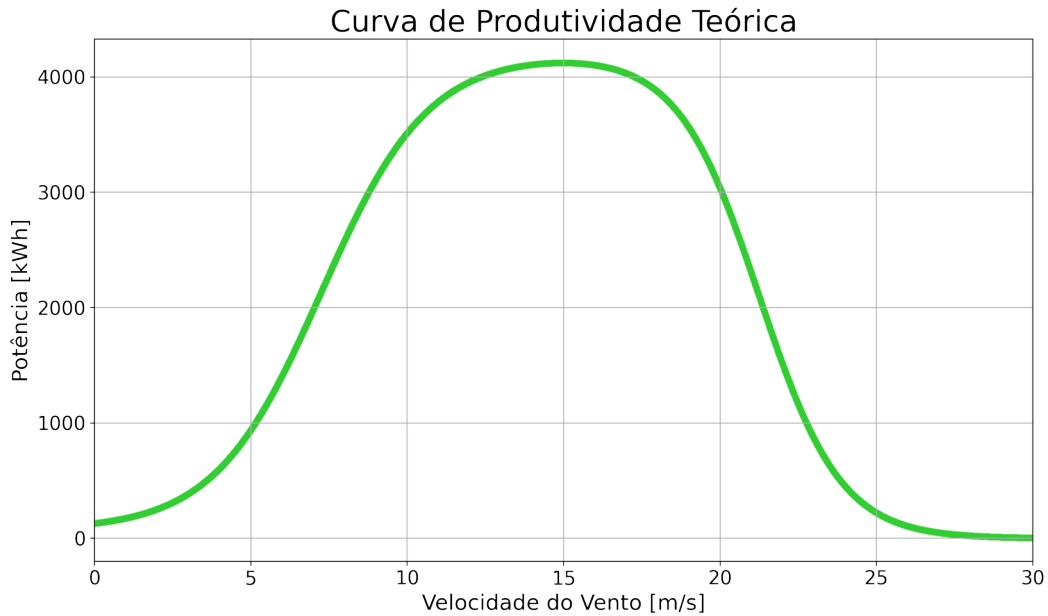
$$t_{c2} = \frac{(24,5 + 18)}{2} \rightarrow t_{c2} = 21,25$$

Dessa forma, temos a seguinte equação da Curva de Produtividade Teórica dos aerogeradores do projeto:

$$P(v) = 73 + \frac{4200 - 73}{1 + e^{-\frac{5}{8,5} \times (v - 7,25)}} - \frac{4200}{1 + e^{-\frac{5}{6,5} \times (v - 21,25)}} \quad (3.1)$$

Com a equação geral em mãos e uma rotina em linguagem de programação *Python* através do software *Jupyter*, foi obtida curva de produtividade da figura 9.

Figura 9 – Gráfico da curva V x P teórica do modelo de aerogerador do projeto



Fonte: Elaborado pelo autor através de linguagem *Python* com os dados da empresa

3.4 Plotagem dos dados da empresa e comparação com a curva de produtividade teórica

Como mencionado anteriormente, os dados adquiridos possuem medições de produção de energia elétrica em kWh e velocidade dos ventos em m/s. Esses dados são de 49 aerogeradores. Sendo assim, foram plotados 49 gráficos de curvas V x P de cada aerogerador juntamente com a curva V x P teórica. Para isso, também foi utilizada uma rotina em linguagem de programação *Python* que seguiu as seguintes premissas:

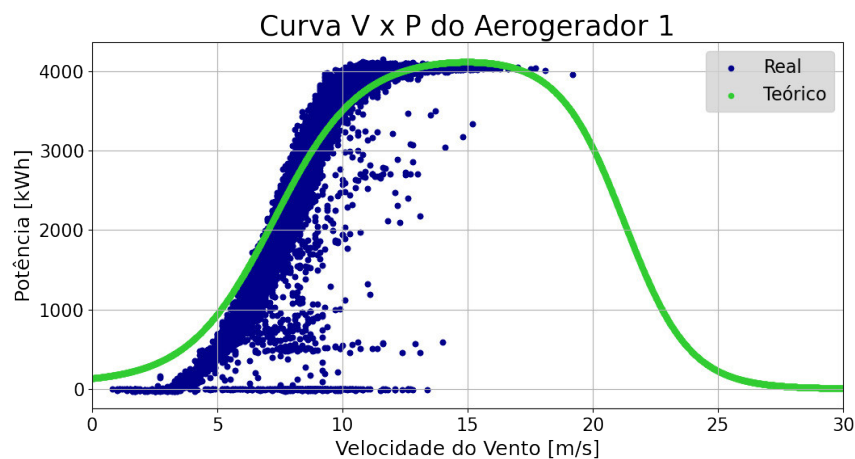
- Importação das bibliotecas necessárias para uso do software;
- Importação e tratamento da base de dados;
- Criação de um algoritmo simples utilizando função lógica *for* (facilmente encontrada na grande maioria das linguagens de programação e consequentemente softwares matemáticos e de plotagem) com o intuito de gerar os 49 gráficos de maneira rápida e automática;
- Formatação do gráfico para gerar uma visualização de qualidade;
- Exportação dos gráficos em formato de imagem

É interessante ressaltar que a escolha da linguagem de programação *Python* para

este trabalho é apenas uma entre as várias possibilidades. Vários *softwares* matemáticos ou de plotagem de gráficos são capazes de realizar os passos descritos acima, ficando a critério de quem está aplicando o método utilizar-se das ferramentas que que lhe proporcione mais conforto e efetividade. Dito isso, a título de visualização serão demonstrados a seguir três (escolhidos randomicamente) dos quarenta e nove gráficos gerados. Para visualização completa dos gráficos, é necessário acessar o apêndice A.

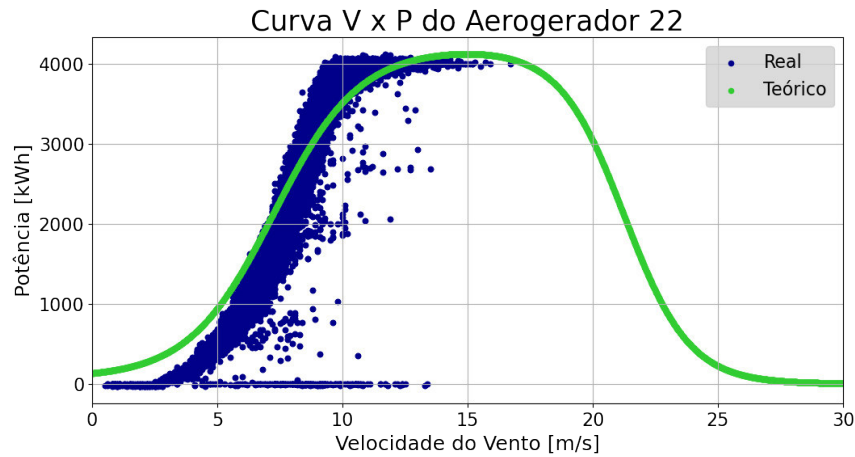
Como visto na fundamentação teórica, a segunda sigmoide (parte direita da curva após o pico) da curva de produtividade teórica é referente a uma situação em que a velocidade de vento é muito alta e a geração começa a decair até ser necessário desligar a máquina por altas velocidades. Essa situação é rara, portanto é natural que os dados reais (em azul) não prossigam com o decaimento do restante da curva.

Figura 10 – Gráfico da curva V x P e dispersão de dados (Aerogerador 1)



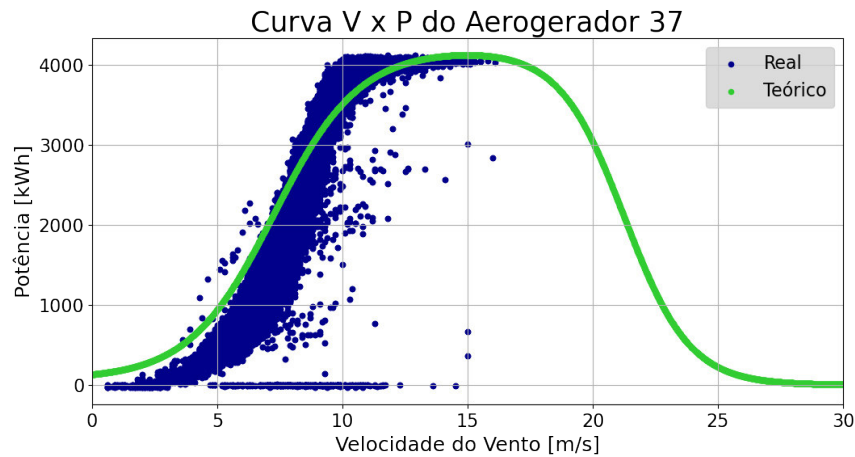
Fonte: Elaborado pelo autor através de linguagem *Python* com os dados da empresa

Figura 11 – Gráfico da curva V x P e dispersão de dados (Aerogerador 22)



Fonte: Elaborado pelo autor através de linguagem *Python* com os dados da empresa

Figura 12 – Gráfico da curva V x P e dispersão de dados (Aerogerador 37)



Fonte: Elaborado pelo autor através de linguagem *Python* com os dados da empresa

Como pode ser observado nas figuras acima, apesar das dispersões, os aerogeradores apresentam comportamento de dados parecido, em muitos pontos seguem a curva de produtividade teórica. Contudo, é inegável que a parte inicial da curva (relacionada com a velocidade de *cut-in*) e a região próxima da potência máxima (relacionada com a velocidade nominal necessária para se ter a potência máxima) encontram certas divergências com o real.

Vale ressaltar que tais dispersões são esperadas. Como visto na subseção 2.4.1, pontos muito distantes ou praticamente nulos podem ocorrer por diversas razões. Na metodologia do ONS, a função automática eliminaria tais dispersões, em nossa metodologia simplificada é necessário o entendimento humano de que as mesmas não representam os

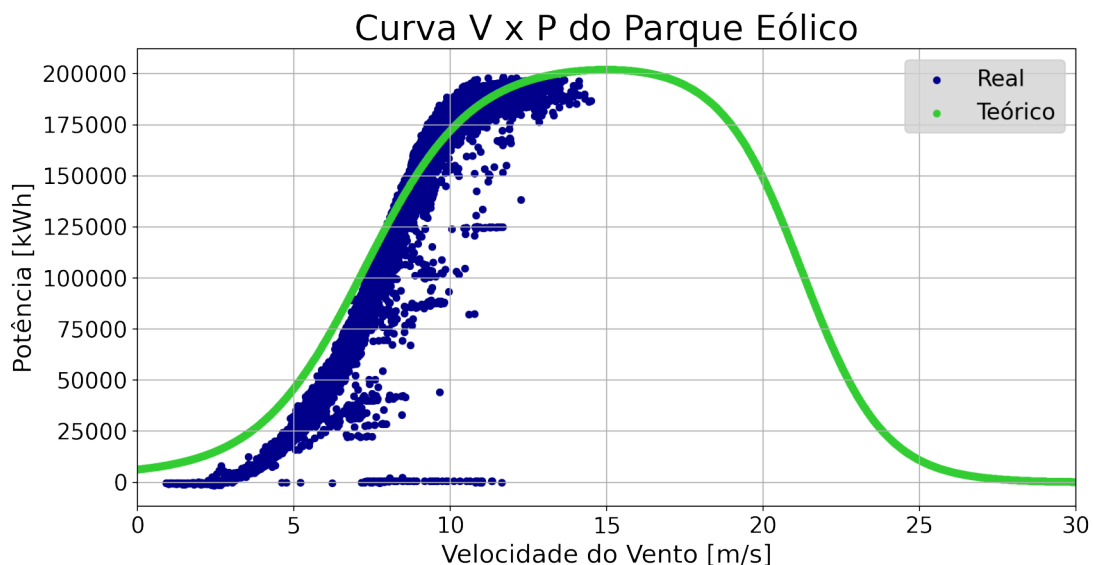
dados como um todo.

Além de eliminar as dispersões, o modelo do ONS procura uma curva de produtividade média, que passe o mais próximo possível do centro dos dados reais utilizados. Dito isso, o objetivo da metodologia simplificada é mesmo. Percebe-se que um aumento da velocidade de cut-in e uma diminuição da velocidade nominal poderia levar a curva de produtividade a passar pela região central dos dados reais.

Contudo, tendo em vista que o modelo do ONS procura uma curva de produtividade da usina como um todo, para este trabalho foram somados os dados de potência de todos os aerogeradores e feito uma média das medições de vento de todos os aerogeradores naquela mesma medição. Apesar das medições de vento entre aerogeradores de um mesmo projeto apresentarem diferenças de valores consideráveis dependendo da distância, a média é considerada uma simplificação coerente, tendo em vista que as variações de velocidade nos ventos são altas e impossibilita que haja um único valor de velocidade real para o parque inteiro, sendo essa uma das incertezas presentes na implantação de qualquer projeto de parque eólico.

Após somar a produção e fazer a média das velocidades de vento, extrapolou-se a curva de produtividade teórica (multiplicando-a por 49) e plotou-se o gráfico dos dados reais em comparação com a curva de produtividade teórica para toda a usina. Tais resultados são demonstrados na figura 13.

Figura 13 – Gráfico da curva V x P do Parque



Através dos resultados da figura 13 percebe-se que o comportamento da curva de produtividade teórica em relação aos dados reais mantém-se parecido com o supracitado nesta seção, ou seja, a velocidade de *cut-in* real está maior do que o esperado, a velocidade nominal real está menor do que o esperado. Dito isso, é necessária alteração da curva de produtividade teórica em prol de aproximá-la da situação real do parque. Contudo, antes de realizar essa modificação, é interessante observar se os dados fornecidos dos medidores de energia apresentam o mesmo comportamento.

3.4.1 *Dados de energia dos medidores*

Como ressaltado no começo da metodologia, os dados de potência recebidos têm origem diretamente dos aerogeradores, ou seja, de um sistema de medição presente no ponto de geração. Contudo, os dados dos medidores de energia que medem efetivamente a energia que o parque eólico está gerando para a rede possuem um nível superior de calibragem e precisão. Dito isso, e também de posse desses dados de medição, optou-se por fazer esta comparação.

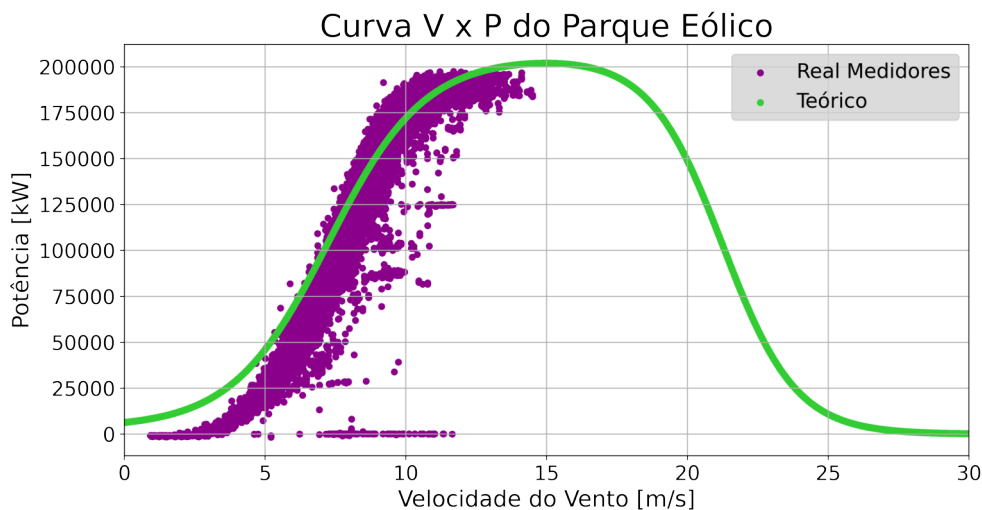
É importante salientar que da saída de geração até o ponto de conexão dos medidores existe uma perda associada. Cada um dos aerogeradores vai apresentar um percentual de perda, porém, a empresa informou que as perdas totais da usina até os medidores giram em torno de 1,3%. Sendo assim, adaptou-se os valores de potência obtidos nos medidores por meio da multiplicação por um fator de $100/98,7$. A multiplicação por este fator visa aproximar os valores dos medidores dos valores do sistema de medição no ponto de geração.

O intuito disso foi de prevenir erros no montante de energia da curva com os dados dos medidores em relação ao que se obteve com os dados do sistema de medição diretamente do ponto de geração. Sendo assim, objetivou-se nesta subseção observar se a confiabilidade dos dados fornecidos no ponto de geração é tão alta ou próxima da confiabilidade do que foi medido pelos medidores com alto nível de calibragem observando o seu comportamento e valores. Contudo, não seria coerente comparar o valor de medidor que possui perdas com o do ponto de geração sem essas perdas, por isso as perdas deveriam ser "repostas" nos dados dos medidores.

Dito isso, a figura 14 apresenta o mesmo gráfico na figura 13, porém utilizando-se dos dados de medidores. Pode-se observar que o comportamento da curva dos dados de

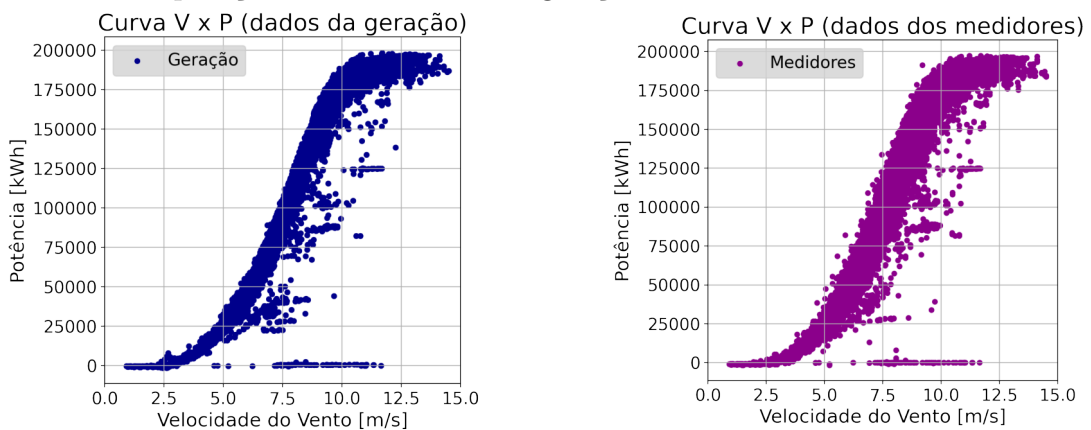
potência se mantém, comparação que pode ser feita através da figura 15. Percebe-se que a dispersão dos dados no ponto de geração é ligeiramente menor que a dispersão dos dados dos medidores, contudo existe uma melhor consistência nos dados dos medidores. Essa consistência se deve justamente ao fato de que os dados de medidores apresentam alto nível de confiabilidade, precisão e uma quantidade maior de pontos, sendo que os dados diretamente do ponto de geração apresentam diversas lacunas em alguns aerogeradores por conta de o sistema de medição do aerogerador parar de receber os dados em alguns momentos por motivos diversos, gerando medições zeradas. Este fato foi percebido durante o tratamento dos dados, e também por esse motivo optou-se por conferir os dados dos medidores.

Figura 14 – Gráfico da curva V x P do Parque com dados de medidores



Fonte: Elaborado pelo autor através de linguagem *Python* com os dados da empresa

Figura 15 – Comparação entre os dados da geração e lido nos medidores



Fonte: Elaborado pelo autor através de linguagem *Python* com os dados da empresa

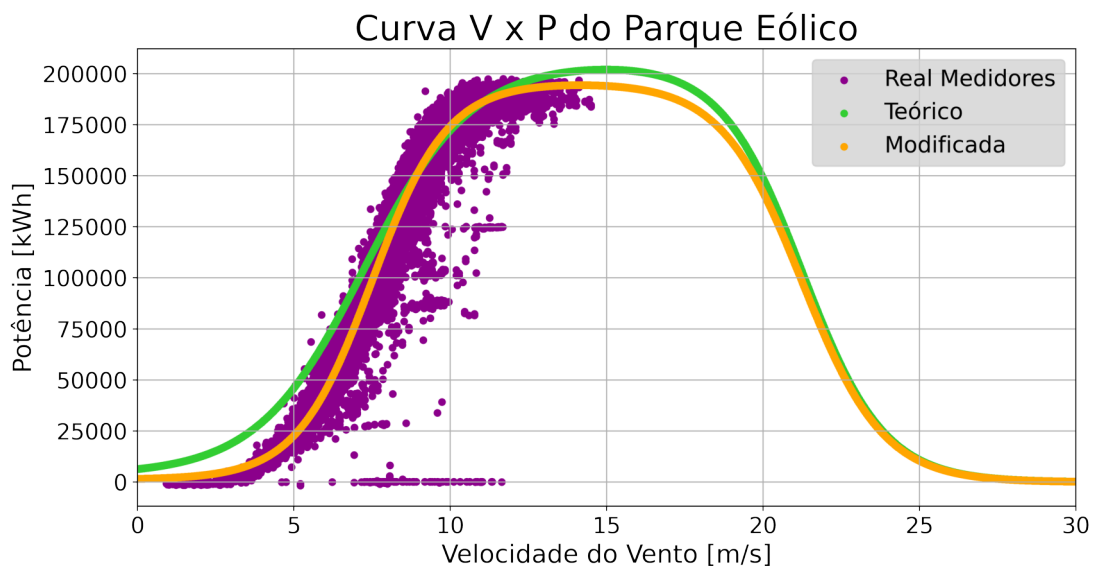
De acordo com o apresentado e considerado, ainda sim a curva de produtividade teórica necessitou de ajustes. Estes ajustes serão feitos com base nos dados dos medidores.

3.4.2 Novos parâmetros da curva de produtividade

Como mencionado anteriormente, a curva de produtividade teórica representada em verde nos gráficos anteriores não se encontra em consonância com os dados práticos. Sendo necessária sua modificação para se ter uma curva de produtividade próxima da realidade do parque eólico.

O método do ONS faria essa mudança automaticamente através de seu algoritmo. Contudo, em nossa metodologia simplificada é necessária a modificação manual dos parâmetros da curva para que ela se alinhe com os dados reais. Para isso, observar o comportamento da curva é fundamental. Como já mencionado, para que a curva se alinhe com os dados reais é necessário um aumento na velocidade de *cut-in*, uma diminuição na velocidade nominal e uma diminuição tanto na potência máxima como na potência mínima. Após feitos esses ajustes, obteve-se a curva de produtividade modificada (em laranja) na figura 16.

Figura 16 – Gráfico da curva V x P do Parque Final



Fonte: Elaborado pelo autor através de linguagem *Python* com os dados da empresa

Sendo assim, a nova curva de produtividade (em laranja) apresentada torna-se uma aproximação coerente do que seria uma curva de produtividade média (passando

próximo do centro do comportamento dos dados reais) proposta pelo ONS para ser utilizado como cálculo na geração estimada daquela usina. Os parâmetros modificados desta curva podem ser conferidos abaixo, juntamente com uma comparação (figura) entre as duas curvas de produtividade (teórica e modificada) produzidas no trabalho até então.

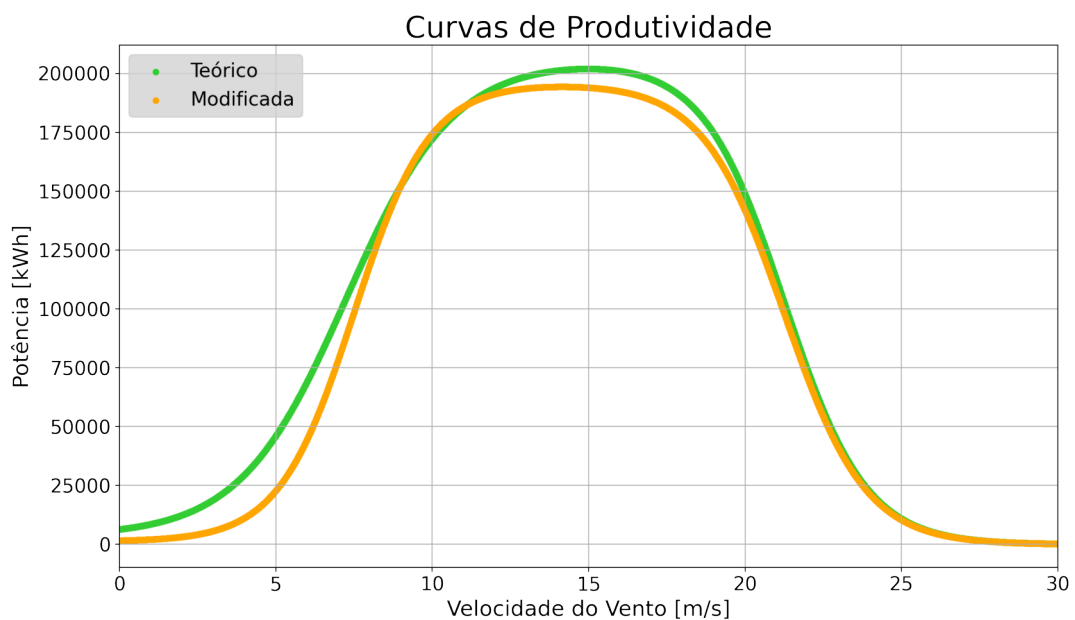
$$V_{01} \text{ modificada} = 4,5 \text{ m/s}$$

$$V_{\max 1} \text{ modificada} = 10,5 \text{ m/s}$$

$$P_{\min} \text{ modificada} = 25 \text{ kW}$$

$$P_{\max} \text{ modificada} = 4.000 \text{ kW}$$

Figura 17 – Comparação entre as curvas de produtividade



Fonte: Elaborado pelo autor através de linguagem *Python* com os dados da empresa

Vale salientar que os valores dos novos parâmetros acima foram obtidos através de ajuste manual da curva, ou seja, observando-se seu comportamento e quais parâmetros deveriam ser modificados através de testes e replotagem dos gráficos. Abaixo pode-se observar a nova equação para a curva de produtividade modificada:

$$t_{s1} \text{ modificado} = (10,5 - 4,5) \rightarrow t_{s1} \text{ modificado} = 6$$

$$t_{c1} \text{ modificado} = \frac{(10,5 + 4,5)}{2} \rightarrow t_{c1} \text{ modificado} = 15$$

$$P(v) = 25 + \frac{4000 - 25}{1 + e^{-\frac{5}{6} \times (v-15)}} - \frac{4000}{1 + e^{-\frac{5}{6,5} \times (v-21,25)}} \quad (3.2)$$

3.5 Utilizando a curva de produtividade obtida

A equação da curva de produtividade obtida 3.2 permite a previsão da geração que deve ocorrer de acordo com a velocidade do vento naquele instante, ou seja, aplicando nesta equação a velocidade de vento medida é possível obter um valor aproximado do que deveria ser gerado. Sendo assim, em casos de *constrained-off* ou até mesmo na falta do dado da medição em algum intervalo (por conta de erros quaisquer na captação dos dados) é possível estimar o valor aproximado da geração.

Dito isso, para entender a curva obtida realmente revela um valor coerente de geração estimada é necessário aplicá-la nos dados dos medidores (escolhidos como sendo os mais confiáveis) e comparar o valor real medido com o calculado. Contudo, de posse de 61.632 dados de medição, torna-se inviável a reprodução de tantos dados mesmo que em apêndices.

Sendo assim, é necessário selecionar uma amostra destes dados para que se possa aplicar a equação da curva e seja apresentável no trabalho. Essa seleção de amostra também tem como objetivo ignorar dados zerados ou que não apresentem coerência, pois dados desse tipo distorcem a porcentagem de erro pois não condizem com a realidade do que foi medido, tornando a comparação entre real e calculado incoerente.

Para a seleção do tamanho da amostra foi utilizada uma equação de amostragem estatística abaixo, presente no Submódulo 2.3 dos Procedimentos de Regulação Tarifária (ANEEL, 2015c).

$$m = \frac{M}{\frac{e^2 \times (M-1)}{Z^2 \times (P0 \times (1-P0))} + 1} \quad (3.3)$$

Onde:

m : tamanho da amostra;

M : quantidade total de dados;

e : margem de erro amostral;

Z : intervalo de confiança;

P_0 : característica esperada.

Os parâmetros mencionados acima serão utilizados da seguinte forma:

- M : Será utilizado a quantidade de medições, ou seja, 61.632;
- e : Será utilizado o valor de 10% de margem de erro amostral;
- Z : Para obtermos um intervalo de confiança de 95% utilizaremos o valor de 1,96 indicado nos procedimentos de regulação tarifária;
- P_0 : Tal característica está relacionada com a aderência da amostra, como não se sabe a aderência da amostra o valor indicado aqui é de 50%.

Com as variáveis definidas e aplicando na fórmula, temos:

$$m = \frac{61.632}{\frac{0.1^2 \times (61.632 - 1)}{1,96^2 \times (0.5 \times (1 - 0.5))} + 1} \rightarrow m = 95,89$$

Com o valor obtido, optou-se por arredondar e demonstrar 100 amostras. Dito isso, a seleção de quais das medições seriam apresentadas foi feita através da função *aleatório* do *software Microsoft Office Excel*. Sendo assim, foram gerados aleatoriamente 100 números entre 0 e 61.632. Tais números foram considerados os índices da medição que seria escolhida, por exemplo, a amostra de número 1 será a medição presente na linha 9.379 da base de dados, onde 9.379 foi um número gerado aleatoriamente. Dentre as 100 amostras selecionadas, nenhum das medições apresentou valor zerado ou nulo. Os resultados de geração estimada assim como o seu erro em relação à geração real pode ser observado na tabela 1.

Tabela 1 – Geração estimada e erro das amostras

Data e Hora	Geração Real (kWh)	Média de Vento (m/s)	Geração Estimada (kWh)	Erro %
2021-07-03 13:30:00	65.879,62	6,75	69.016,76	4,76%
2021-09-24 04:40:00	84.687,88	7,16	84.952,35	0,31%
2021-10-02 10:25:00	192.872,59	11,87	190.895,21	1,03%
2021-11-05 21:20:00	50.134,58	6,32	54.128,71	7,97%
2021-11-02 11:55:00	107.982,81	7,74	108.509,62	0,49%
2021-11-15 20:40:00	104.187,87	7,90	114.688,31	10,08%
2021-06-22 01:20:00	11.716,73	4,14	12.375,02	5,62%

Continua...

Data e Hora	Geração Real (kWh)	Média de Vento (m/s)	Geração Estimada (kWh)	Erro %
2021-08-26 05:10:00	154.704,16	9,55	166.122,70	7,38%
2021-06-06 03:10:00	52.453,06	6,56	62.215,22	18,61%
2021-07-29 21:10:00	56.281,12	6,31	53.932,34	4,17%
2021-11-19 01:30:00	70.317,09	6,95	76.713,22	9,10%
2021-07-12 03:15:00	33.662,59	5,52	32.568,11	3,25%
2021-09-03 03:00:00	104.299,55	8,24	127.776,32	22,51%
2021-11-27 12:30:00	126.898,85	8,21	126.609,88	0,23%
2021-10-18 01:45:00	133.526,06	8,48	136.211,86	2,01%
2021-11-19 03:45:00	100.040,12	7,76	109.001,04	8,96%
2021-10-27 20:15:00	80.217,37	7,26	88.869,14	10,79%
2021-10-12 12:15:00	184.364,42	10,63	182.630,55	0,94%
2021-07-06 10:00:00	40.629,37	5,36	29.275,10	27,95%
2021-06-21 06:30:00	27.582,11	5,36	29.327,27	6,33%
2021-06-23 17:45:00	109.394,12	7,84	112.412,53	2,76%
2021-09-16 14:55:00	83.433,13	10,46	180.732,33	116,62%
2021-09-11 12:05:00	183.108,85	10,04	175.022,40	4,42%
2021-06-19 16:20:00	133.119,28	8,06	121.072,12	9,05%
2021-06-10 22:05:00	21.708,94	5,32	28.367,06	30,67%
2021-10-21 13:15:00	100.144,78	7,56	101.091,10	0,94%
2021-09-05 12:50:00	137.600,85	8,21	126.540,24	8,04%
2021-06-01 11:15:00	36.600,52	5,74	37.621,07	2,79%
2021-10-11 04:25:00	45.798,70	6,12	48.016,15	4,84%
2021-07-29 14:05:00	169.088,18	9,23	158.635,95	6,18%
2021-07-11 22:15:00	27.747,70	5,26	27.332,97	1,49%
2021-10-04 12:55:00	191.862,15	13,04	193.735,32	0,98%
2021-06-19 14:25:00	49.031,00	6,08	46.851,80	4,44%
2021-08-26 19:15:00	116.337,45	7,83	111.937,46	3,78%
2021-08-05 22:25:00	157.927,30	9,06	154.135,53	2,40%
2021-08-19 11:25:00	115.801,57	7,91	115.171,16	0,54%

Continua...

Data e Hora	Geração Real (kWh)	Média de Vento (m/s)	Geração Estimada (kWh)	Erro %
2021-10-03 07:40:00	73.533,67	7,49	98.276,29	33,65%
2021-10-17 04:05:00	66.556,55	6,99	78.291,53	17,63%
2021-08-23 06:15:00	111.210,99	8,00	118.447,02	6,51%
2021-06-14 07:50:00	25.746,26	5,17	25.627,51	0,46%
2021-10-28 02:30:00	125.479,83	8,23	127.367,51	1,50%
2021-09-28 17:55:00	119.320,82	7,93	115.813,65	2,94%
2021-08-31 08:30:00	188.595,85	10,66	182.921,62	3,01%
2021-06-01 01:50:00	32.893,70	5,71	36.957,85	12,36%
2021-07-13 04:00:00	90.379,63	7,14	84.060,59	6,99%
2021-07-04 16:40:00	94.874,78	7,28	89.853,84	5,29%
2021-10-19 17:10:00	129.134,61	8,30	129.988,79	0,66%
2021-10-25 11:05:00	186.868,52	11,03	186.180,41	0,37%
2021-11-15 19:35:00	102.259,56	7,85	112.749,00	10,26%
2021-08-24 16:20:00	187.693,26	10,70	183.267,02	2,36%
2021-07-10 06:15:00	68.981,29	6,94	76.163,62	10,41%
2021-11-10 08:35:00	101.628,27	7,58	101.752,98	0,12%
2021-10-02 17:55:00	121.192,95	8,22	126.837,56	4,66%
2021-11-18 12:15:00	134.905,59	8,59	140.014,82	3,79%
2021-06-20 02:10:00	16.317,16	4,51	16.121,28	1,20%
2021-06-21 01:35:00	19.345,52	4,80	19.766,30	2,18%
2021-10-15 21:25:00	70.571,15	6,92	75.459,20	6,93%
2021-10-11 10:25:00	157.269,37	8,88	149.192,66	5,14%
2021-06-21 15:20:00	130.308,37	8,49	136.545,57	4,79%
2021-10-15 21:40:00	70.953,57	7,03	79.641,95	12,25%
2021-07-13 00:20:00	76.056,19	6,71	67.521,40	11,22%
2021-08-06 10:40:00	106.851,62	7,44	96.206,65	9,96%
2021-06-09 11:50:00	14.941,39	4,53	16.317,59	9,21%
2021-07-06 10:25:00	27.725,08	5,06	23.823,22	14,07%
2021-10-13 00:00:00	141.584,21	8,68	142.950,72	0,97%

Continua...

Data e Hora	Geração Real (kWh)	Média de Vento (m/s)	Geração Estimada (kWh)	Erro %
2021-06-23 23:45:00	89.620,83	7,44	96.363,36	7,52%
2021-06-20 18:15:00	112.999,27	8,05	120.663,06	6,78%
2021-11-01 19:35:00	106.492,02	7,81	110.961,12	4,20%
2021-07-17 21:00:00	18.367,20	4,10	12.044,24	34,43%
2021-06-12 06:25:00	20.888,56	4,86	20.647,04	1,16%
2021-09-23 01:05:00	47.977,27	6,29	53.406,88	11,32%
2021-09-20 03:00:00	128.737,51	8,79	146.471,19	13,78%
2021-06-02 23:10:00	96.317,06	7,77	109.610,21	13,80%
2021-10-30 05:50:00	59.082,50	6,12	48.197,76	18,42%
2021-07-22 18:45:00	177.550,67	9,55	166.122,70	6,44%
2021-08-24 10:20:00	158.378,03	10,16	176.839,58	11,66%
2021-11-09 19:20:00	91.936,27	7,58	102.001,11	10,95%
2021-11-26 12:15:00	170.893,02	9,68	168.768,87	1,24%
2021-07-03 02:30:00	31.474,31	5,62	34.774,83	10,49%
2021-08-06 02:05:00	62.361,47	6,67	66.166,36	6,10%
2021-09-30 03:15:00	42.717,98	5,93	42.737,15	0,04%
2021-09-30 09:00:00	48.007,45	6,06	46.285,37	3,59%
2021-09-28 04:25:00	80.369,19	7,31	90.922,63	13,13%
2021-10-14 13:10:00	183.749,69	10,50	181.150,86	1,41%
2021-11-08 09:55:00	95.343,23	7,38	93.560,92	1,87%
2021-07-03 20:20:00	102.482,20	7,37	93.455,98	8,81%
2021-10-17 11:20:00	190.457,46	11,06	186.396,78	2,13%
2021-10-04 03:50:00	117.466,27	8,06	121.050,44	3,05%
2021-09-24 05:05:00	72.955,78	7,01	78.846,63	8,07%
2021-10-07 17:50:00	88.744,95	7,13	83.898,72	5,46%
2021-10-17 03:00:00	67.306,00	6,80	71.136,22	5,69%
2021-08-29 19:35:00	54.941,57	6,06	46.403,28	15,54%
2021-11-17 21:50:00	123.719,26	8,27	128.796,48	4,10%
2021-06-05 01:15:00	31.729,36	5,61	34.545,34	8,87%

Continua...

Data e Hora	Geração Real (kWh)	Média de Vento (m/s)	Geração Estimada (kWh)	Erro %
2021-10-02 22:30:00	151.396,74	8,89	149.494,19	1,26%
2021-11-08 13:15:00	147.167,59	8,67	142.621,99	3,09%
2021-09-15 21:15:00	50.719,67	6,28	52.929,91	4,36%
2021-07-07 05:50:00	41.617,38	5,71	36.953,72	11,21%
2021-08-31 03:30:00	167.769,10	9,57	166.549,68	0,73%
2021-09-23 15:00:00	173.092,10	9,78	170.546,76	1,47%

Fonte: Elaborado pelo autor

Ao se calcular o erro médio da coluna Erro Percentual, obtém-se um valor aproximado de 8,15%. Analogamente, ao calcular-se o desvio padrão do Erro obtém-se um valor de 12,92%. Estes valores serão devidamente comentados na análise dos resultados.

Média dos Erros = 8,15%

Desvio Padrão dos Erros = 12,92%

É interessante observar na coluna Data e Hora que estes valores de fato foram selecionados aleatoriamente, apresentando distância de tempo entre eles. Dito isso, outra forma de observar se a geração estimada calculada com a curva de produtividade encontrada é através de gráficos de comparação com a geração real.

Obviamente, neste caso não foram selecionadas medições pontuais aleatórias, mas sim um segmento de medições que possam fornecer uma curva. Ao observar os relatórios de acompanhamento de restrições de geração do ONS, percebe-se que o tempo de uma restrição é variado, podendo ser curta (cerca de 30 minutos) ou mais longa (cerca de 12 horas). Dito isso, para uma melhor visualização escolheu-se um período de 12 horas para se comparar a geração real com a geração estimada.

Sabendo-se que as medições ocorrem em intervalos de 5 minutos, em uma hora existem 12 medições. No período escolhido de 12 horas existem 144 medições. Ao

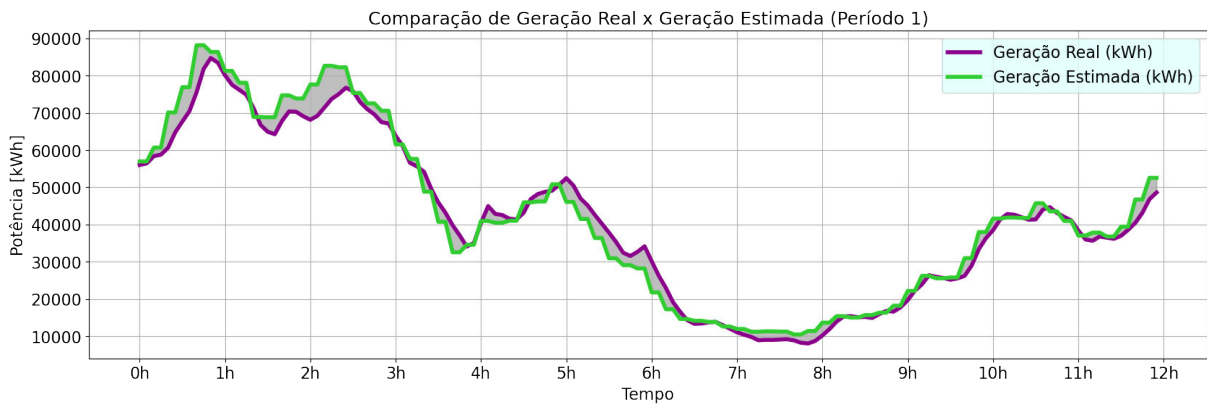
dividirmos o total de medições (61.632) pelo valor de 12 horas de medição (144 medições) obtém-se o número 428, que foi considerado como sendo o valor M de tamanho da amostra, ou seja, existem 428 segmentos de 12 horas a serem explorados.

Utilizando-se da equação 3.3 calcula-se o tamanho da amostra necessário para se obter confiança na visualização dos resultados. Com os mesmos critérios adotados anteriormente, define-se o tamanho da nova amostra como:

$$m = \frac{428}{\frac{0,1^2 \times (428-1)}{1,96^2 \times (0,5 \times (1-0,5))} + 1} \rightarrow m = 78,59$$

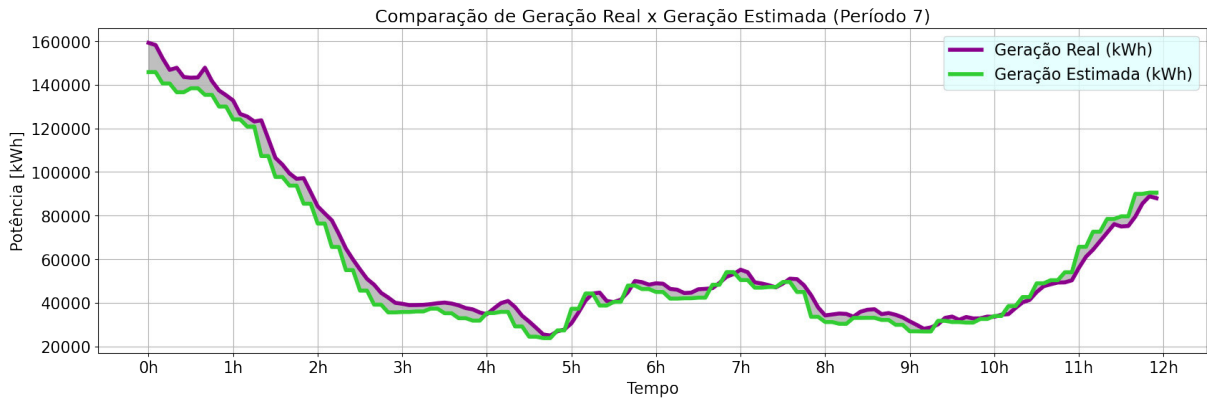
O valor dessa amostra foi então arredondado para 80. Dito isso, os segmentos de 12 horas selecionados também foram aleatórios e resultaram nos gráficos presentes no apêndice B. Abaixo são mostrados alguns dos gráficos para que possam ser visualizados rapidamente no trabalho, sendo possível a visualização completa através do apêndice supracitado. Os resultados gráficos serão comentados na análise dos resultados.

Figura 18 – Comparação entre Geração Real e Geração Estimada



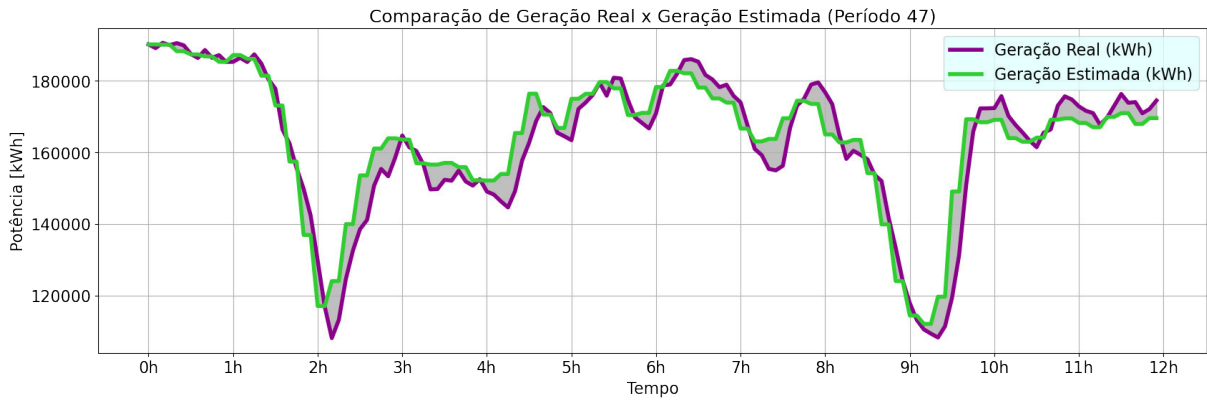
Fonte: Elaborado pelo autor através de linguagem *Python* com os dados da empresa

Figura 19 – Comparação entre Geração Real e Geração Estimada



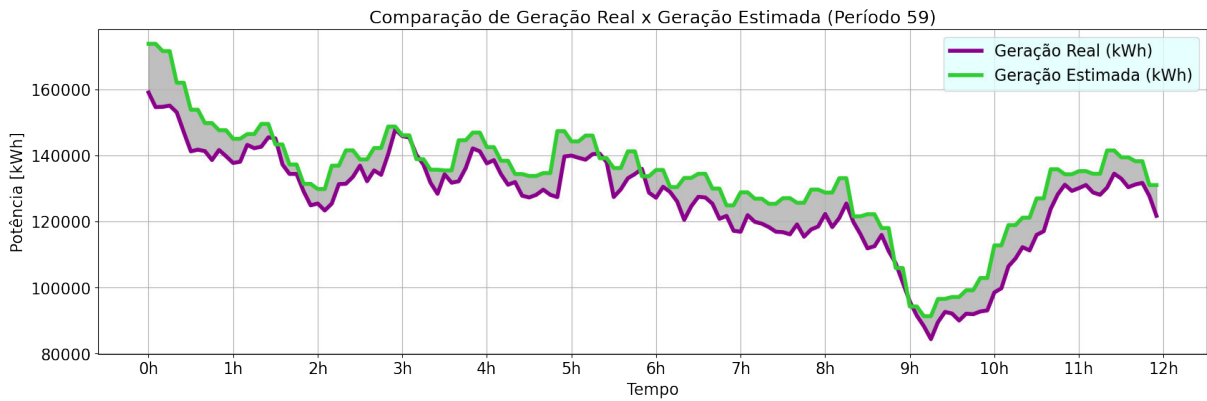
Fonte: Elaborado pelo autor através de linguagem *Python* com os dados da empresa

Figura 20 – Comparação entre Geração Real e Geração Estimada



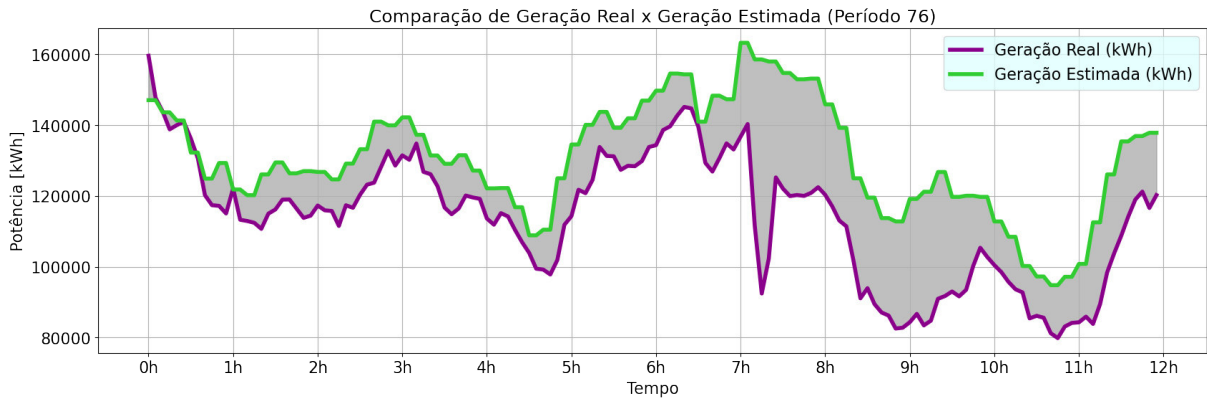
Fonte: Elaborado pelo autor através de linguagem *Python* com os dados da empresa

Figura 21 – Comparação entre Geração Real e Geração Estimada



Fonte: Elaborado pelo autor através de linguagem *Python* com os dados da empresa

Figura 22 – Comparação entre Geração Real e Geração Estimada



Fonte: Elaborado pelo autor através de linguagem *Python* com os dados da empresa

3.6 O custo do *constrained-off*

Como última tarefa deste trabalho de conclusão de curso, optou-se por realizar uma rápida análise da receita frustrada que representa a frustração de geração provocada por eventos de *constrained-off* eólico nos últimos 6 meses que possuem o relatório de acompanhamento mensal de restrições de geração do ONS mencionado em 2.3. O intervalo de tempo de 6 meses foi escolhido, pois através da observação de todos os relatórios, apenas a partir do relatório de junho de 2021 é possível obter os dados necessários para análise do montante em dinheiro.

Para fazer esta análise é necessário entender que a precificação da energia é feita através do Preço da Liquidação das Diferenças (PLD). O PLD é calculado "*diariamente para cada hora do dia seguinte com base no Custo Marginal de Operação (CMO), considerando a aplicação dos limites máximos (horário e estrutural) e mínimo vigentes para cada período de apuração e para cada submercado*" (CCEE, 2020b). Dito isso, a cada horário pode-se dizer que existe um preço para a energia baseado nos custos de operação do sistema.

Algumas considerações foram feitas para a realização dessa análise pois os relatórios de acompanhamento de restrição mensal do ONS não distinguem por quantas horas cada usina sofreu o *constrained-off* nem quantos MWh foram frustrados por usina. Sendo assim, para realização da análise não é viável precificar a energia frustrada por usina. Também não é possível a utilização do PLD horário pois mesmo possuindo a data e duração total do *constrained-off*, seria necessário saber quantos MWh foram frustrados exatamente em que horários, dado que também não é detalhado no relatório em questão.

Dito isso, as informações contidas no relatório permitem um cálculo financeiro baseado na data do *constrained-off* e geração frustrada total em MWh daquele dia. Como não é possível o uso do PLD horário, utilizou-se do PLD Semanal que é calculado oficialmente pela CCEE e disponibilizada no seu site (CCEE, 2020a). Também é importante ressaltar que o PLD é calculado por quatro regiões (Sudeste, Sul, Nordeste e Norte), porém sua variação por região apresenta pouquíssima variação percentual. Tendo em vista que a separação da geração frustrada em MWh também não é detalhada nos relatórios por região, utilizou-se a média do PLD Semanal de todas as regiões.

Sendo assim, através da tabela 2 é possível observar a geração frustrada em MWh nos últimos 6 meses. Vale ressaltar que foram consideradas apenas razões por indisponibilidade externa de eólicas (*constrained-off*).

Tabela 2 – Frustração de geração em MWh de Jun/2021 a Nov/2021

DATA	GERAÇÃO FRUSTRADA (MWh)
14/06/2021	2.235
24/06/2021	1.442
27/06/2021	50
06/07/2021	301
10/07/2021	826
11/07/2021	2.315
12/07/2021	2.597
14/07/2021	1.360
23/07/2021	16
25/07/2021	2.634
31/07/2021	86
11/08/2021	174
15/08/2021	1.061
16/08/2021	1.338
17/08/2021	1.389
18/08/2021	1.475

Continua...

DATA	GERAÇÃO FRUSTRADA (MWh)
21/08/2021	220
04/09/2021	1.107
05/09/2021	1.011
07/09/2021	705
11/09/2021	6.732
12/09/2021	1.172
18/09/2021	3.833
20/09/2021	3.566
10/10/2021	59
16/10/2021	1.386
23/10/2021	309
07/11/2021	21
19/11/2021	209

Fonte: Elaborado pelo autor com dados do ONS

Através da Tabela 3 é possível observar o PLD Semanal dos últimos 6 meses.

Tabela 3 – PLD semanal médio das regiões de Jun/21 a Nov/21

DATA INÍCIO	DATA FIM	PLD SEMANAL (R\$/MWh)
29/05/2021	04/06/2021	251,73
05/06/2021	11/06/2021	274,28
12/06/2021	18/06/2021	284,02
19/06/2021	25/06/2021	314,25
26/06/2021	02/07/2021	583,88
03/07/2021	09/07/2021	583,88
10/07/2021	16/07/2021	583,88

Continua...

DATA INÍCIO	DATA FIM	PLD SEMANAL (R\$/MWh)
17/07/2021	23/07/2021	583,88
24/07/2021	30/07/2021	583,88
31/07/2021	06/08/2021	583,88
07/08/2021	13/08/2021	583,88
14/08/2021	20/08/2021	583,88
21/08/2021	27/08/2021	583,88
28/08/2021	03/09/2021	583,88
04/09/2021	10/09/2021	583,88
11/09/2021	17/09/2021	583,88
18/09/2021	24/09/2021	583,88
25/09/2021	01/10/2021	541,48
02/10/2021	08/10/2021	451,89
09/10/2021	15/10/2021	209,43
16/10/2021	22/10/2021	177,38
23/10/2021	29/10/2021	161,22
30/10/2021	05/11/2021	101,07
06/11/2021	12/11/2021	107,09
13/11/2021	19/11/2021	74,10
20/11/2021	26/11/2021	94,10
27/11/2021	03/12/2021	50,79

Fonte: Elaborado pelo autor com dados da CCEE

Com os dados das tabelas 2 e 3 foi possível uma aproximação do montante em reais (R\$) que seria captado caso não houvesse o constrained-off. O resultado pode ser observado na última coluna da tabela 4 e será comentado na análise de resultados.

Tabela 4 – Montante não captado por *constrained-off* eólico

DATA	GERAÇÃO PLD SEMANAL		MONTANTE
	FRUSTRADA (MWh)	DA DATA (R\$/MWh)	
14/06/2021	2.235	284,02	R\$ 634.779,11
24/06/2021	1.442	314,25	R\$ 453.144,90
27/06/2021	50	583,88	R\$ 29.194,00
06/07/2021	301	583,88	R\$ 175.747,88
10/07/2021	826	583,88	R\$ 482.284,88
11/07/2021	2.315	583,88	R\$ 1.351.682,20
12/07/2021	2.597	583,88	R\$ 1.516.336,36
14/07/2021	1.360	583,88	R\$ 794.076,80
23/07/2021	16	583,88	R\$ 9.342,08
25/07/2021	2.634	583,88	R\$ 1.537.939,92
31/07/2021	86	583,88	R\$ 50.213,68
11/08/2021	174	583,88	R\$ 101.595,12
15/08/2021	1.061	583,88	R\$ 619.496,68
16/08/2021	1.338	583,88	R\$ 781.231,44
17/08/2021	1.389	583,88	R\$ 811.009,32
18/08/2021	1.475	583,88	R\$ 861.223,00
21/08/2021	220	583,88	R\$ 128.453,60
04/09/2021	1.107	583,88	R\$ 646.355,16
05/09/2021	1.011	583,88	R\$ 590.302,68
07/09/2021	705	583,88	R\$ 411.635,40
11/09/2021	6.732	583,88	R\$ 3.930.680,16
12/09/2021	1.172	583,88	R\$ 684.307,36
18/09/2021	3.833	583,88	R\$ 2.238.012,04
20/09/2021	3.566	583,88	R\$ 2.082.116,08
10/10/2021	59	209,43	R\$ 12.356,37
16/10/2021	1.386	177,38	R\$ 245.848,68
23/10/2021	309	161,22	R\$ 49.816,98

Continua...

DATA	GERAÇÃO	PLD SEMANAL	MONTANTE	
	FRUSTRADA (MWh)	DA DATA (R\$/MWh)		
07/11/2021	21	107,09	R\$	2.248,89
19/11/2021	209	74,10	R\$	15.486,90
Total	39.629	-	R\$	21.246.917,67

Fonte: Elaborado pelo autor com dados do ONS e da CCEE

É importante salientar que o valor total de geração frustrada em MWh elencado acima ainda assim não reflete o valor total dos últimos seis meses. Isso ocorre pois no relatório de acompanhamento mensal do ONS nem todos os horários das restrições são detalhados.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES

4.1 Da curva de produtividade teórica

A plotagem da curva de produtividade teórica mostrou-se efetiva e de fácil aplicação através do cálculo fornecido pelo submódulo 2.3 revisado dos procedimentos de rede do ONS. A curva se comportou de acordo com os dados inseridos.

4.2 Da comparação dos dados reais com a curva de produtividade teórica

Através dos conceitos apresentados na fundamentação teórica, era esperado que os dados reais apresentassem dispersões. Tal comportamento também ocorre com os dados demonstrados no submódulo supracitado. É importante salientar que os dados apresentados foram de um intervalo de 7 meses (pois foi o tempo em que o projeto em questão estava em operação comercial). É possível que de posse de quantidade maior de dados no futuro seja possível observar menos dispersões no comportamento dos dados reais da usina.

A curva de produtividade teórica não se comportou de acordo com os dados reais dos 49 aerogeradores. Contudo, os mesmos problemas sempre foram observados em todas estas curvas (velocidade de *cut-in* precisava ser diminuída, velocidade nominal precisava ser diminuída, potência nominal e potência mínima precisam ser diminuídas). Após a decisão de plotar os dados do parque como um todo, confirmou-se os mesmos problemas supracitados.

A adição dos dados dos medidores e diferenciação dos dados direto da geração (obtidos no sistema de medição do aerogerador) agregou mais segurança ao que foi realizado no trabalho. Apesar disto, os dados dos medidores também apresentaram comportamento parecido com os dados da geração. Sendo assim foi necessário a modificação da curva de produtividade teórica com o intuito de aproximá-la da situação real do parque.

4.3 Da curva de produtividade modificada

O principal ponto deste trabalho de conclusão de curso foi demonstrar uma possibilidade de metodologia simplificada para que o agente (empresa) possa observar e tratar da curva de produtividade de seu parque eólico e possuir um maior conhecimento

de como seu projeto realmente está funcionando, além de antecipar a possível geração frustrada pouco após o momento de sua ocorrência com os dados de vento.

O ajuste manual dos parâmetros da curva de produtividade teórica através da observação do comportamento da mesma apresentou-se um método, apesar de arcaico, aceitável e realizável para se obter uma curva de produtividade média coerente com o comportamento real de seu parque eólico (assim como apresentado na fundamentação teórica), tendo em vista que a empresa em muitos casos pode não ter posse de algoritmos ou recursos que gerem uma curva real tão eficientemente como o ONS.

Também é importante ressaltar que o projeto em questão não possui dados em situações de vento elevadas onde a geração decai, a falta desses dados se deve ao fato da própria usina não passar por tais situações, sendo assim não foi possível e nem necessário modificar o comportamento da segunda sigmoide da curva de produtividade teórica.

4.4 Da aplicação da curva de produtividade modificada

Através o cálculo do tamanho de uma amostra e da aleatoriedade na seleção de dados de medições, uma tabela de comparação com geração real e geração estimada pela curva de produtividade modificada foi apresentada. Nesta tabela, observaram-se erros percentuais de valores variados, com alguns próximos de 0% e outros erros acima de 100%. Para se ter uma visão macro, calculou-se a média percentual e o desvio padrão desses erros, que respectivamente foram de 8,15% e 12,92%.

Considerando tamanha dispersão nos dados reais, estes valores de diferença não se mostram absurdos. Também vale ressaltar que ocorriam erros tanto para geração estimada menor como geração estimada maior que o real. Apesar disto e da seleção do tamanho da amostra ter sido feita através de uma equação confiável, o método de selecionar 100 medições aleatórias não demonstrou-se satisfatório por si só.

Sendo assim, decidiu-se ser importante observar o comportamento de um intervalo de tempo considerável (12 horas) de comparação entre geração real e geração estimada. Após plotagem e observação dos 80 gráficos gerados e contidos no apêndice B, concluiu-se que na maioria dos casos a geração estimada aproximou-se da geração real tanto em valor como no formato da curva. Não há dúvidas de que em alguns casos apesar de o formato da curva de geração estimada acompanhar a da geração real, seu valor era bem maior. Essa diferença é esperada considerando que a curva de produtividade modificada

é uma curva aproximadamente média e também das incertezas envolvidas em torno de alguns dados. Para deixar claro, as incertezas não se referem aos dados de medições, pois estes apresentam alta confiabilidade, contudo existem situações de manutenção ou problema no aerogerador (por exemplo) em que a geração do parque claramente pode ser reduzida.

É importante salientar que não houve situação de *constrained-off* no parque em questão em outubro e novembro (meses nos quais o ONS está utilizando a nova metodologia de obtenção da curva de produtividade) não tendo sido possível esta comparação (entre *constrained-off* estimado e *constrained-off* indicado pelo ONS).

4.5 Da análise financeira

A análise financeira apresentada teve o intuito de instigar o leitor sobre a situação financeira envolvida no tema do *constrained-off* eólico e despertar o interesse sobre a precificação da energia elétrica através do PLD.

Contudo, reconhece-se que tal análise foi simbólica, ou seja, não apresenta uma comparação percentual entre faturamento total dos agentes e o que se perde por *constrained-off*, por não ter posse de diversos dados necessários que seriam de difícil acesso. Porém, é importante despertar este interesse sobre os assuntos das Regras de Comercialização de Energia Elétrica e como esse montante será ressarcido aos agentes (seu processo detalhado) no âmbito financeiro.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

O trabalho em questão apresentou a situação do *constrained-off* e procurou uma metodologia simplificada que possa ser compreendida e utilizada por empresas de geração centralizada. Apesar disto, o trabalho também ressalta pontos importantes da resolução que ainda são sensíveis nas discussões como exemplo o "pisos" de 78h anuais de restrição por *constrained-off* para que o agente possa ser ressarcido. Muito se discute que, apesar de esse número ter sua justificativa, o agente já sofre por restrições de confiabilidade do sistema elétrico e realocação de carga, sendo assim, seria ainda necessária tal "pisos" para que o agente fosse ressarcido por indisponibilidade externa?

Também é importante ressaltar a necessidade de uma regulamentação para o *constrained-off* ocorrido em usinas fotovoltaicas, que também são parte importante da atual matriz energética brasileira.

Sendo assim, o assunto do *constrained-off* ainda necessita de muitas discussões e lapidações, principalmente tendo em vista que a regulamentação publicada é recente. A importância do tema tende a crescer assim como a participação da energia eólicoelétrica em nossa matriz energética.

No âmbito financeiro, mesmo que o prejuízo dos agentes atualmente não seja exorbitante, a expansão de projetos deste tipo pode fomentar mais ainda as discussões sobre o assunto. O que nos leva ao último ponto a ser ressaltado nesta conclusão, de que é necessário o estudo da causa dos eventos de *constrained-off* e como a expansão dos sistema de transmissão pode impactar nisso.

Em suma, o trabalho tratou de um tema importante, relevante e atual para as empresas de geração centralizada que possuem projetos de parques eólicos, assim como para o setor elétrico em geral. Ademais, apesar do foco ser o estudo do *constrained-off*, a própria ação de comparação entre curvas de produtividade e obtenção das mesmas para entender como seu projeto está realmente gerando e as diferenças entre o real e teórico, são por si só, importantes para qualquer agente do setor.

Para trabalhos futuros, seria importante se aprofundar na causa dos eventos de *constrained-off* e como a expansão do sistema de transmissão pode impactar nisso, o estudo sobre o *constrained-off* fotovoltaico e a necessidade de sua regulamentação, assim como o estudo financeiro de como será o ressarcimento aos agentes através das regras de comercialização de energia elétrica e o quanto eles perdem por conta do "pisos" de 78h

anuais para que possam ser ressarcidos.

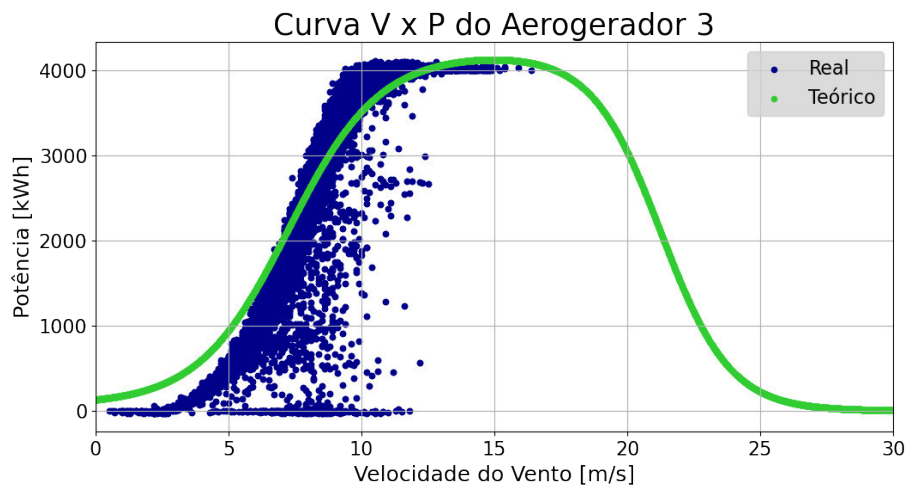
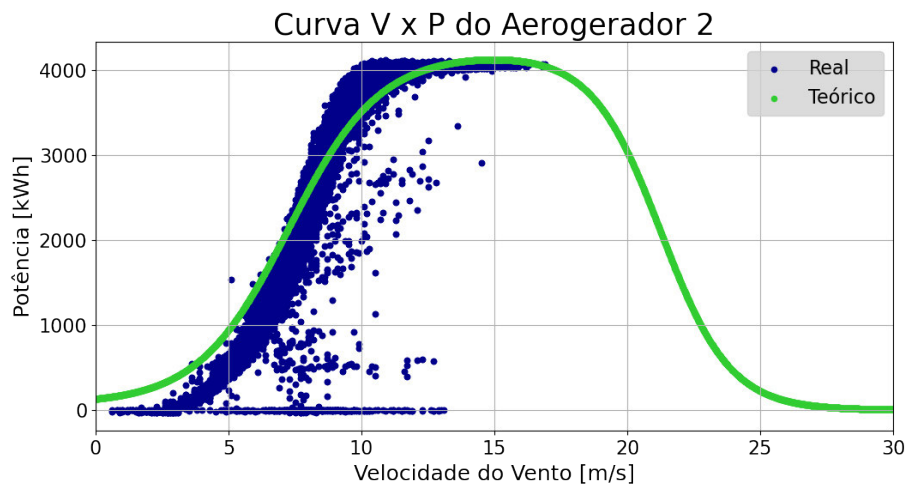
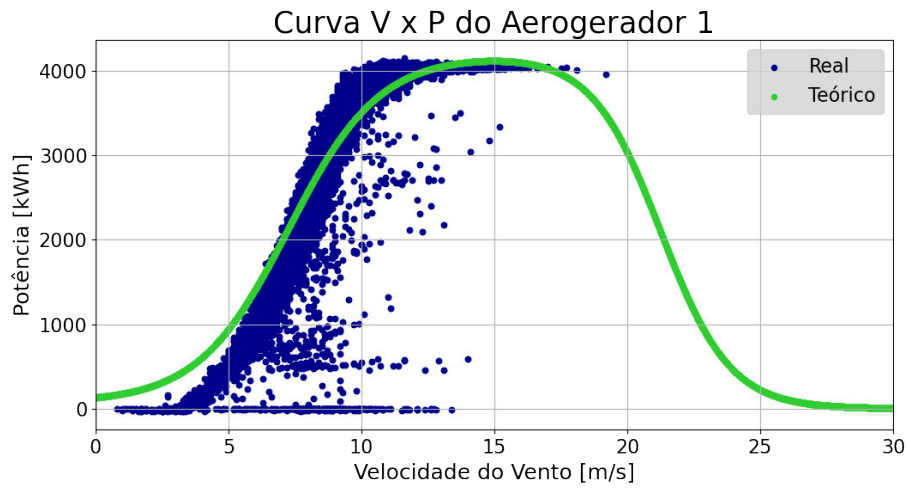
REFERÊNCIAS

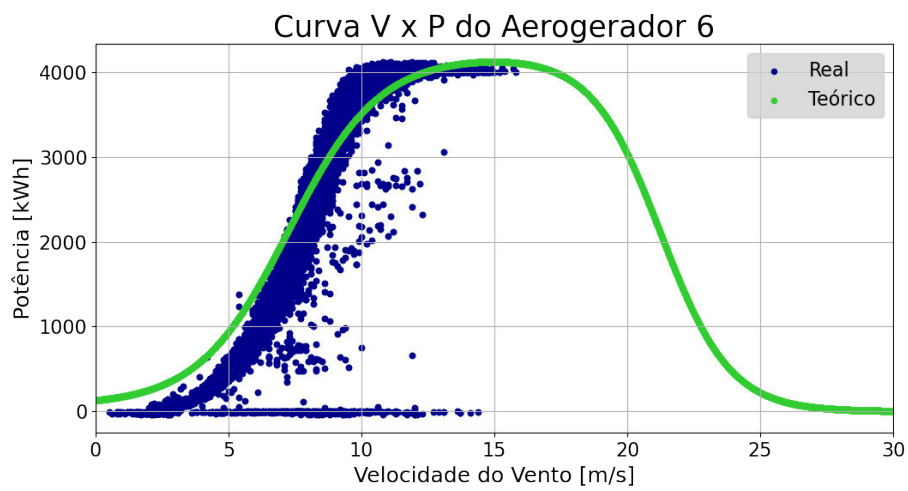
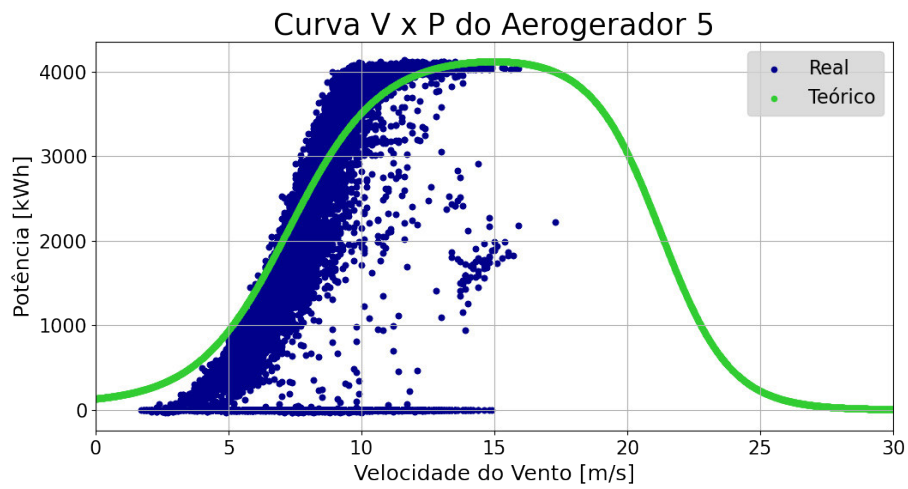
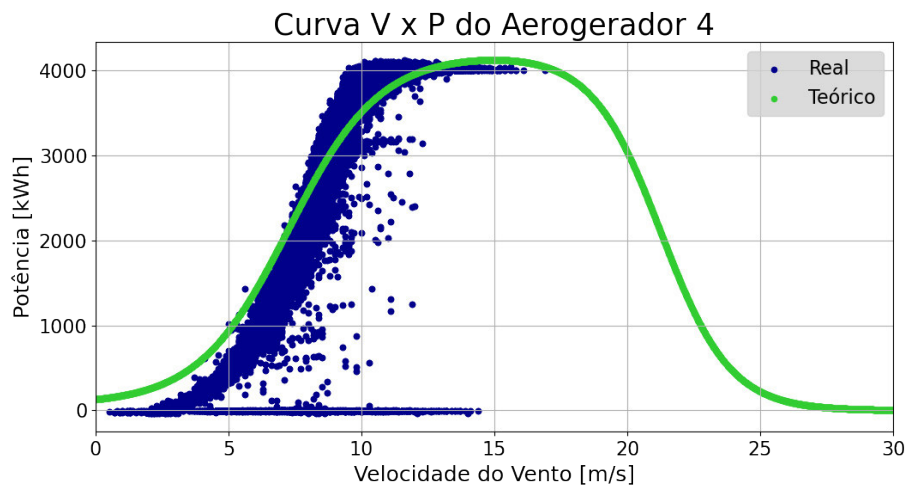
- ANEEL: *RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 514, DE 01 DE NOVEMBRO DE 2012*. 2012. – URL <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012514.pdf>>
- ANEEL: *RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 583, DE 22 DE OUTUBRO DE 2013*. 2013. – URL <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2013583.pdf>>
- ANEEL: *Ambiente de Contratação Livre (ACL)*. 2015. – URL <[https://www.aneel.gov.br/ambiente-de-contratacao-livre-acl->](https://www.aneel.gov.br/ambiente-de-contratacao-livre-acl-)
- ANEEL: *Ambiente de Contratação Regulado (ACR)*. 2015. – URL <<https://www.aneel.gov.br/ambiente-de-contratacao-regulada-acr->>
- ANEEL: *Procedimentos de Regulação Tarifária - Submódulo 2.3*. 2015. – URL <shorturl.at/jnDS2>
- ANEEL: *Colabore com a Regulação dos Temas Relacionados à Energia Elétrica*. 2019. – URL <<https://www.aneel.gov.br/participacao-social>>
- ANEEL: *RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 927, DE 23 DE MARÇO DE 2021*. 2021. – URL <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2021927.html>>
- ANEEL: *VOTO DA RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 927, DE 23 DE MARÇO DE 2021*. 2021. – URL <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2021927_1.pdf>
- CARVALHO, PAULO CESAR M.: *Geração de Energia Elétrica - Fundamentos*. 1º. Editora Érica, 2012. – ISBN 9788536518572
- CCEE: *Câmara de Comercialização de Energia - Painel de Preços*. 2020. – URL <<https://www.ccee.org.br/en/precos/painel-precos>>
- CCEE: *Câmara de Comercialização de Energia - Preço da Liquidação das Diferenças*. 2020. – URL <<https://www.ccee.org.br/dados-e-analises/dados-pld>>
- ECYCLE: *Energia eólica: o que é e como funciona?* 2018. – URL <<https://www.ecycle.com.br/energia-eolica/>>
- EPE: *Anuário Estatístico de Energia Elétrica*. 2021. – URL <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/Anuário_2021.pdf>
- ONS: *Acompanhamento das Reduções de Geração*. 2021. – URL <<https://shortest.link/2xEe>>
- ONS: *Histórico de Operação*. 2021. – URL <http://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/geracao_energia.aspx>
- ONS: *Submódulo 2.4 dos Procedimentos de Rede (Alterado)*. 2021. – URL <<https://sintegre.ons.org.br/paginas/consultapr/admin/processos/detalhe.aspx?pid=79>>
- PROREDE: *Submódulo 10.6 - Controle da geração*. 2018. – URL <<http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-ons/procedimentos-de-rede/vigentes>>

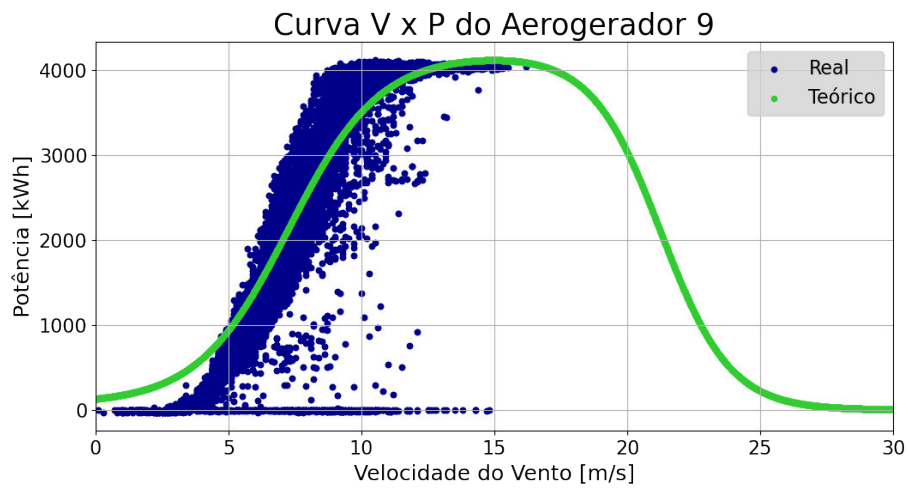
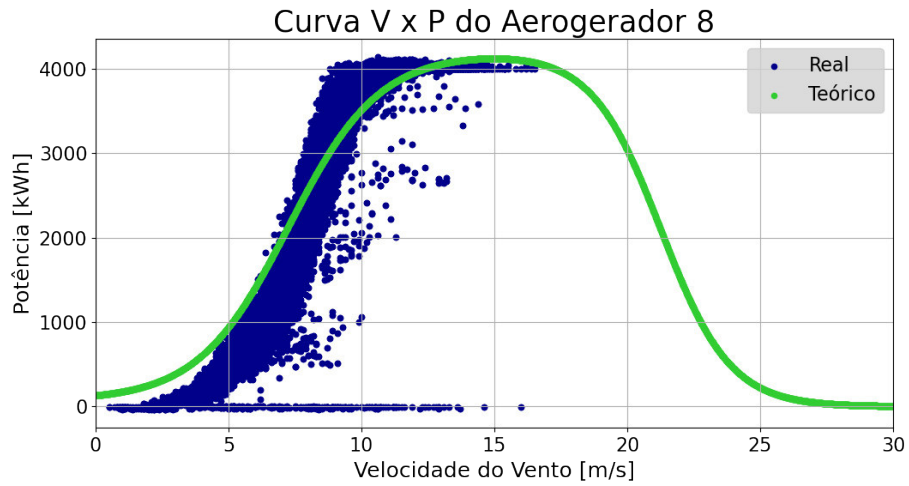
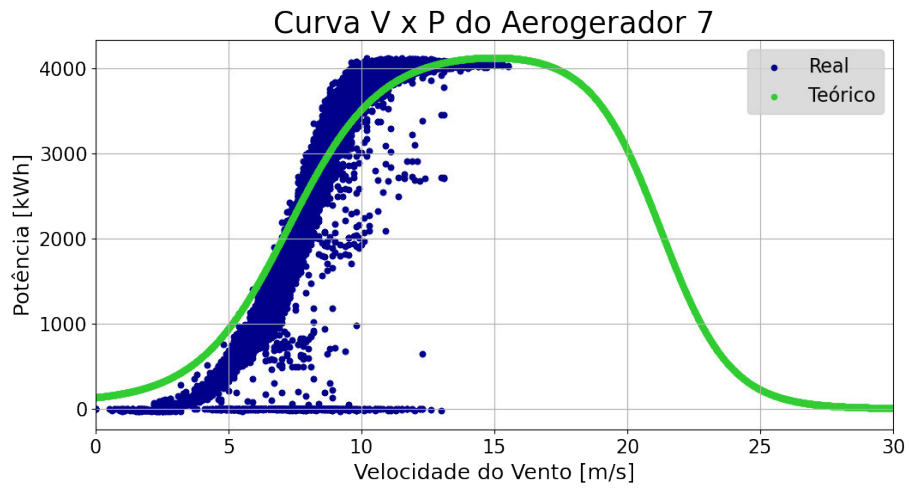
PROREDE: *Submódulo 6.5 procedimental - Apuração da geração e de indisponibilidade de empreendimentos de geração*. 2021. – URL <<http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-ons/procedimentos-de-rede/vigentes>>

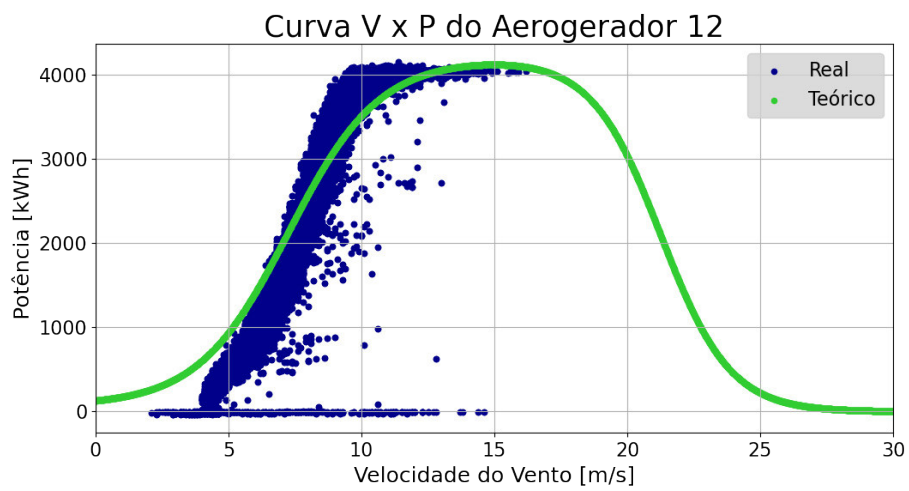
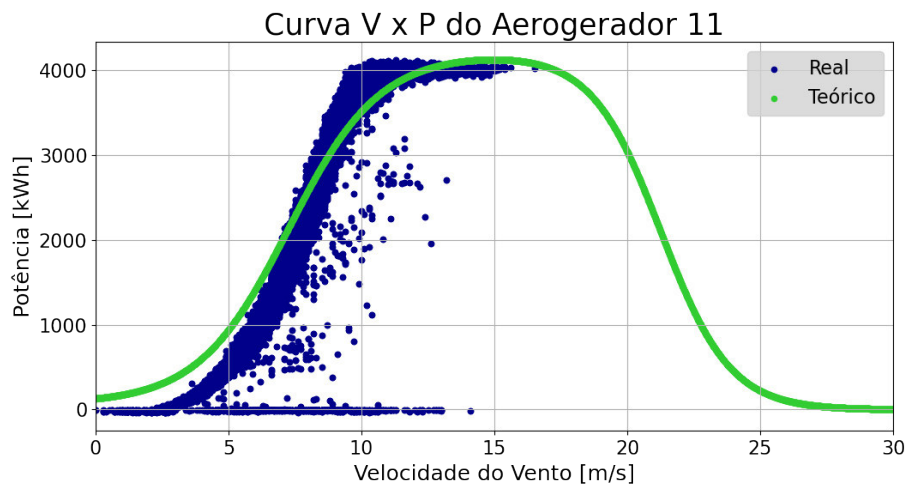
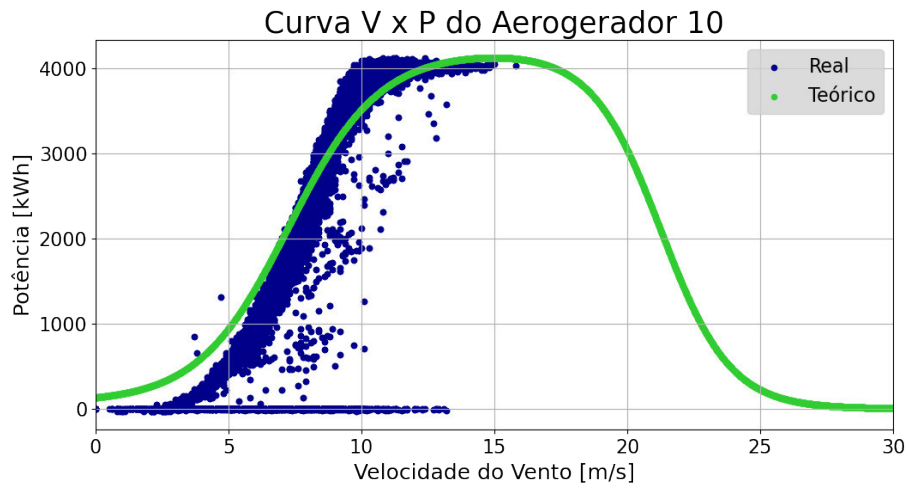
RIBEIRO, Lucas A.: *O desafio de regulamentação do constrained-off eólico no Brasil: Uma análise da evolução de posicionamento da ANEEL entre 2014 e 2021*. 9 2021. – Economista pela UFRJ e Mestrando em Planejamento de Sistemas Energéticos pela UNICAMP.

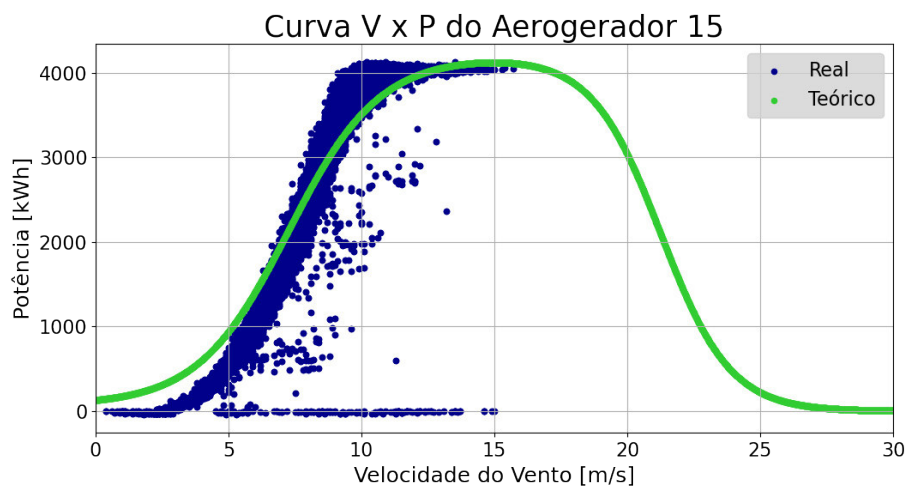
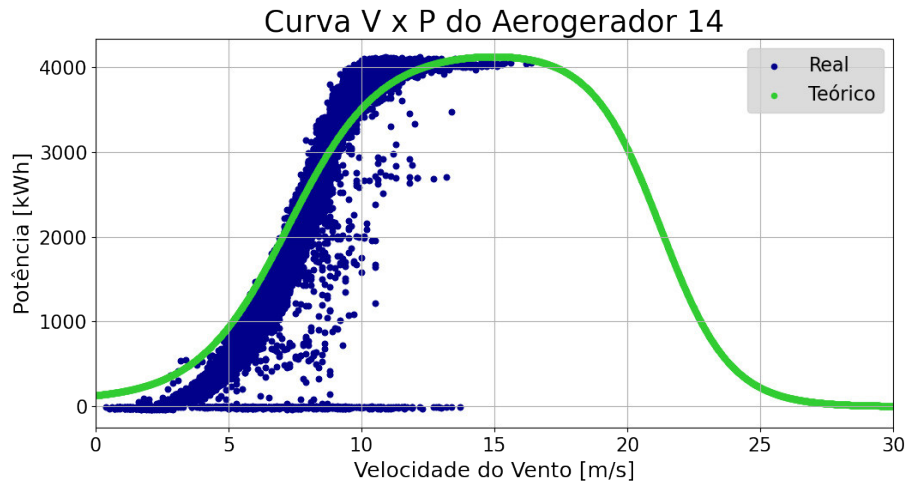
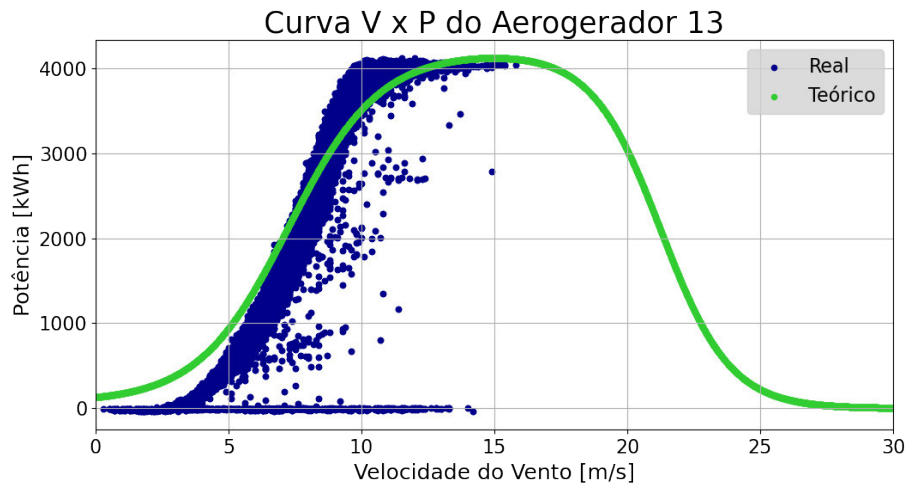
APÊNDICE A – CURVAS DE PRODUTIVIDADE POR AEROGERADOR

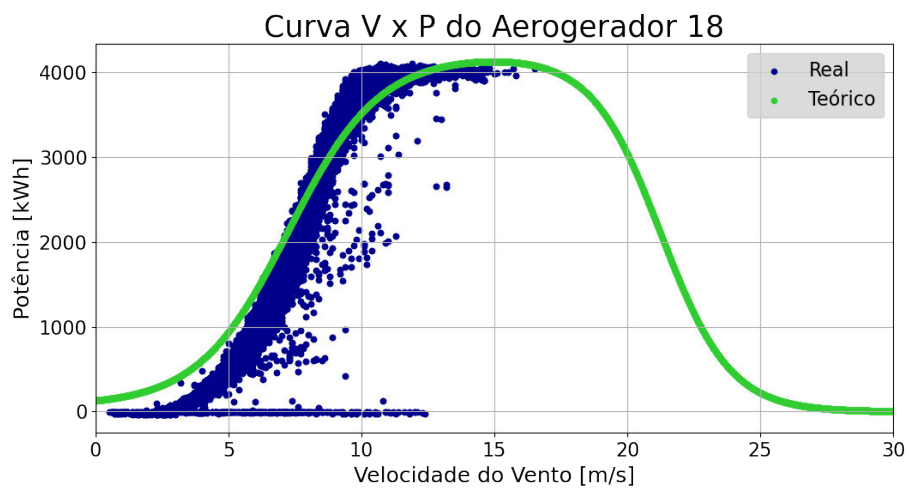
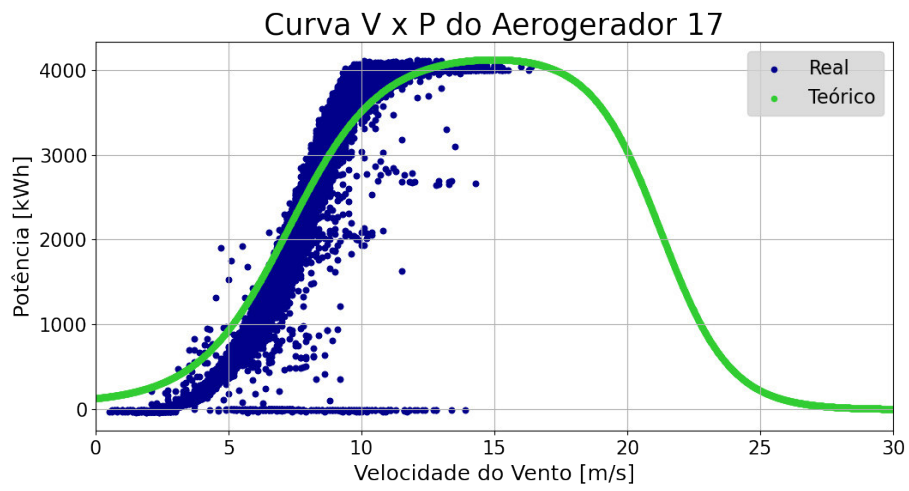
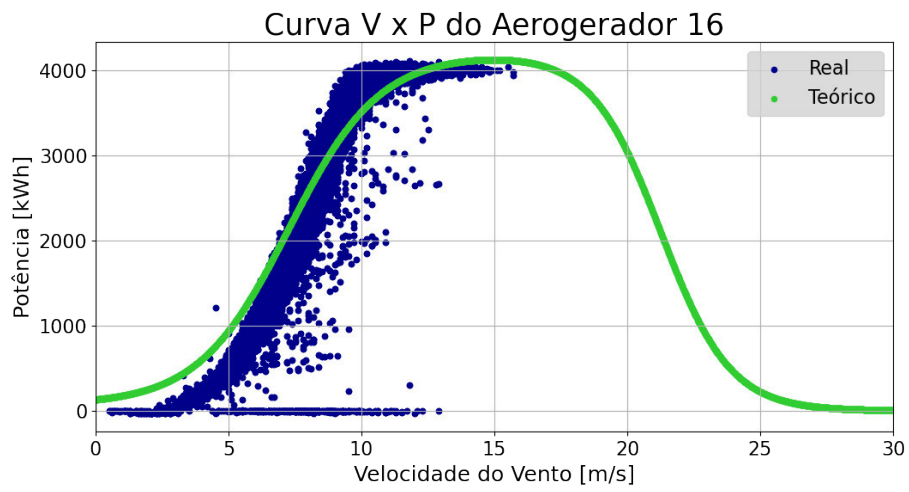


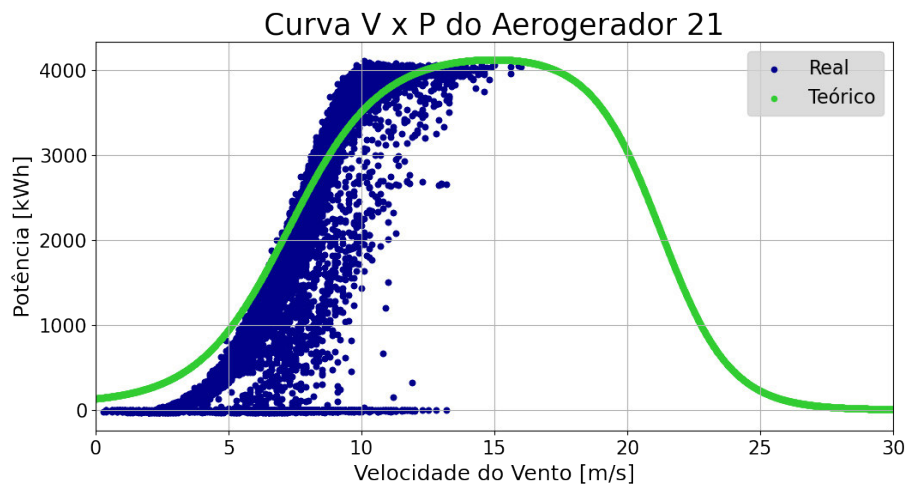
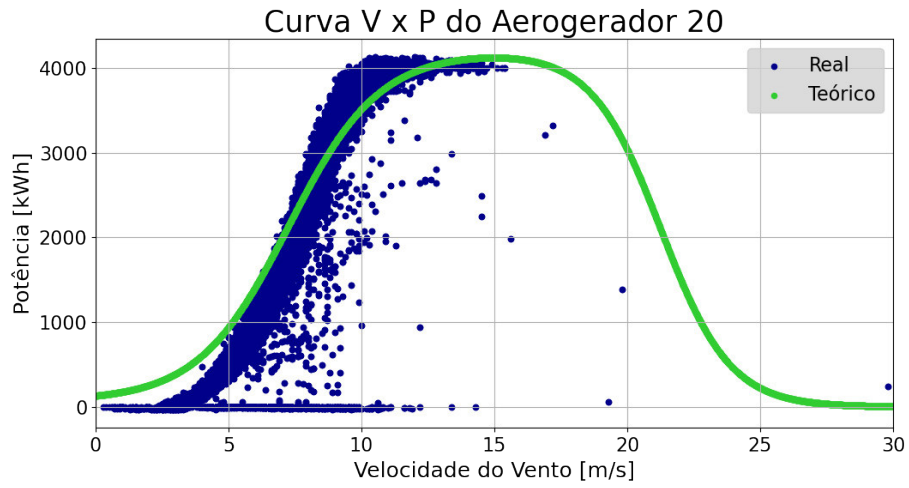
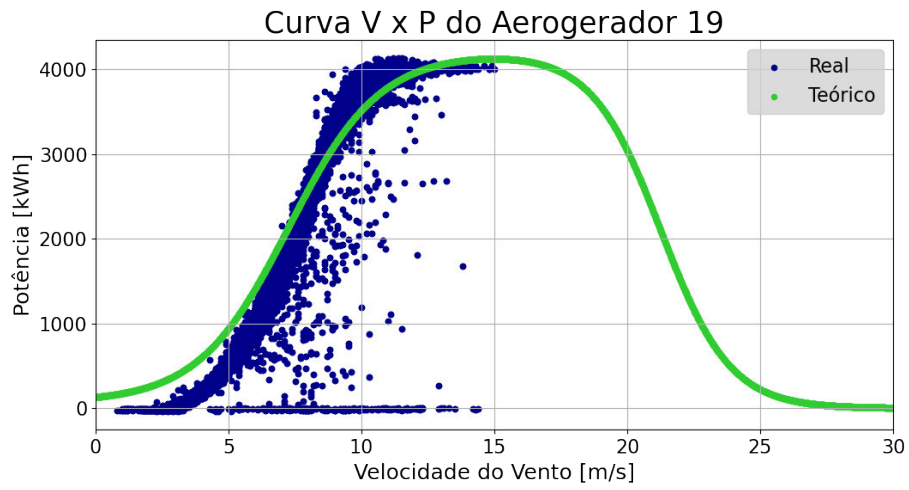


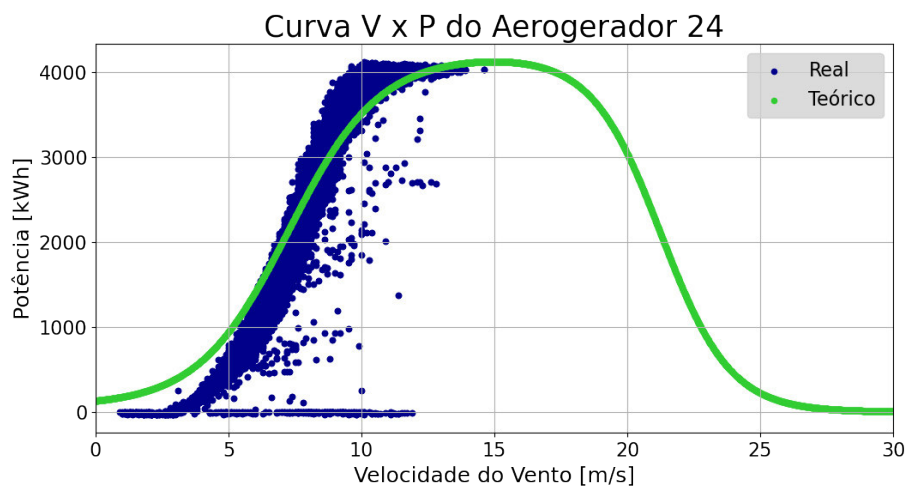
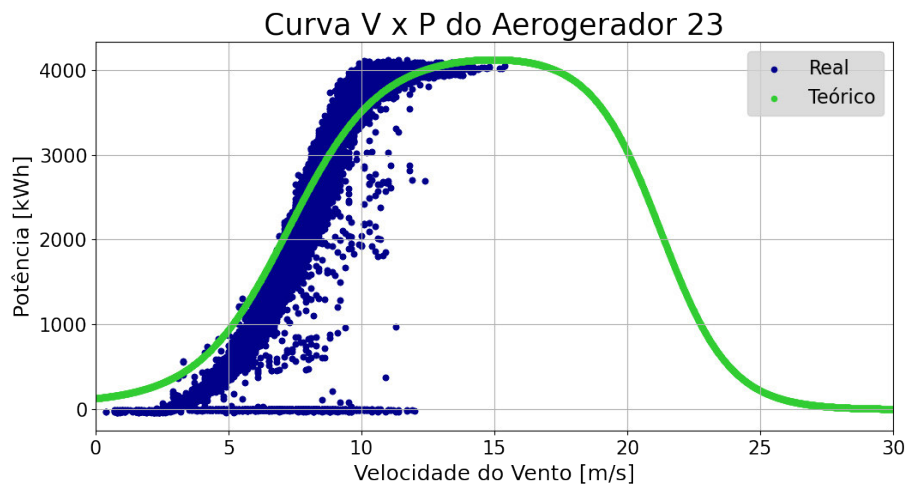
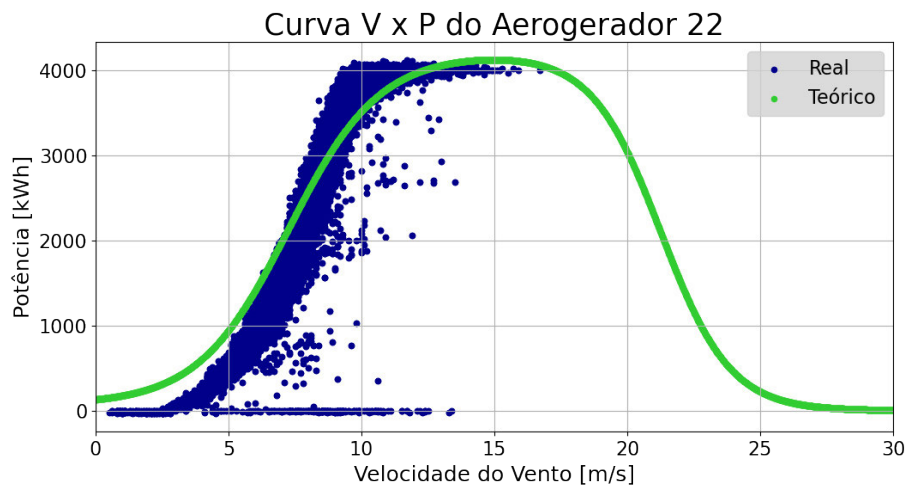


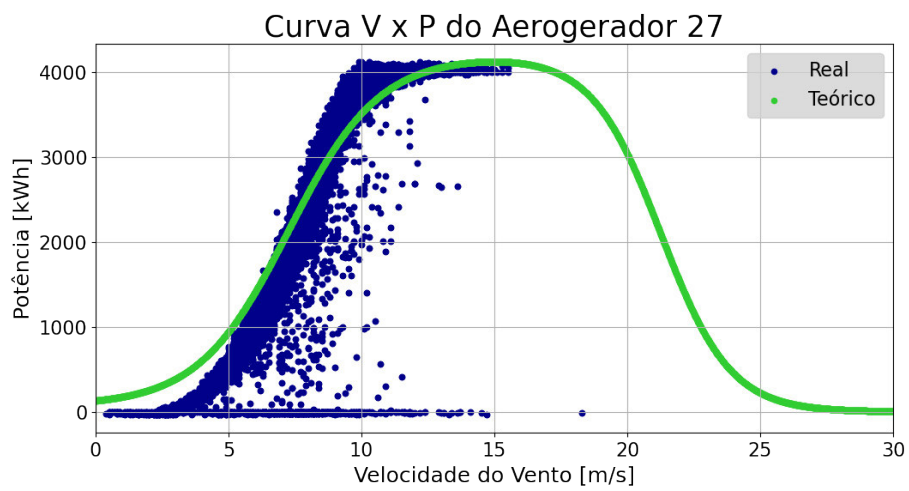
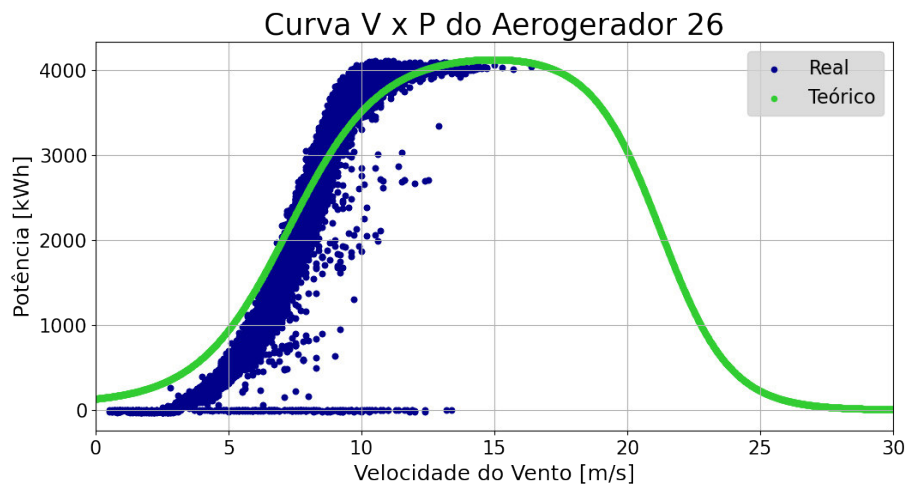
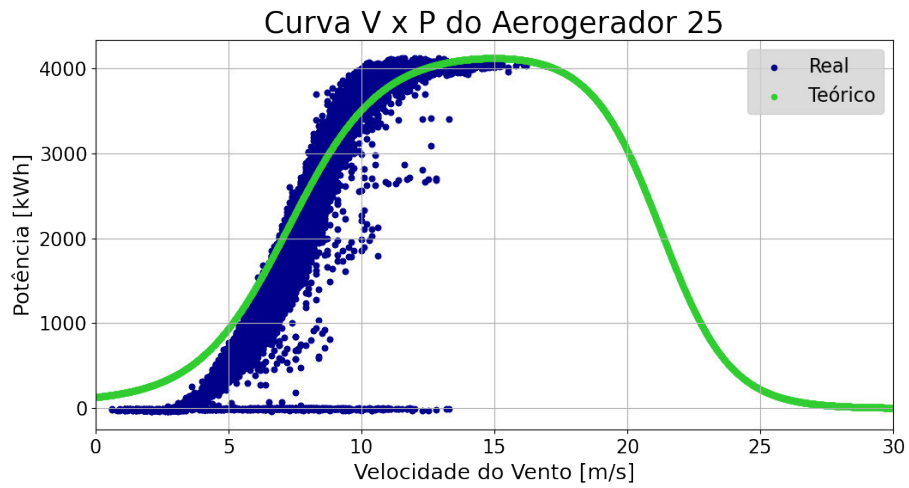


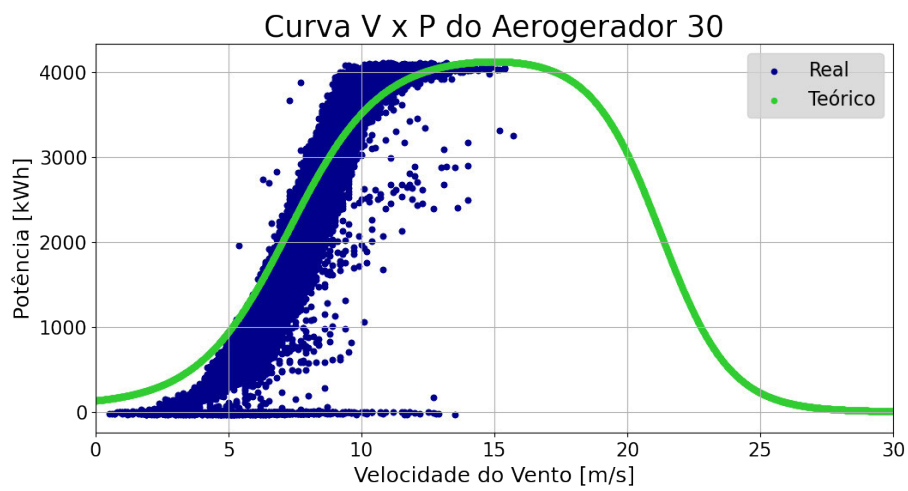
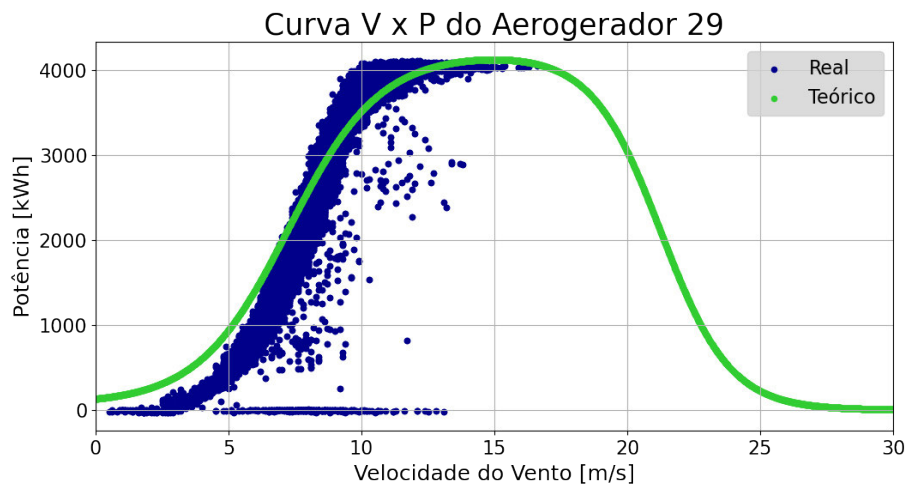
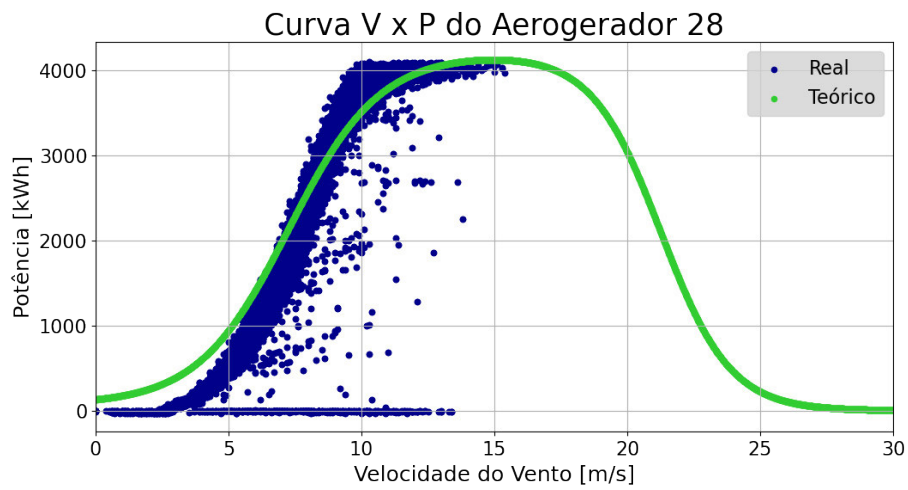


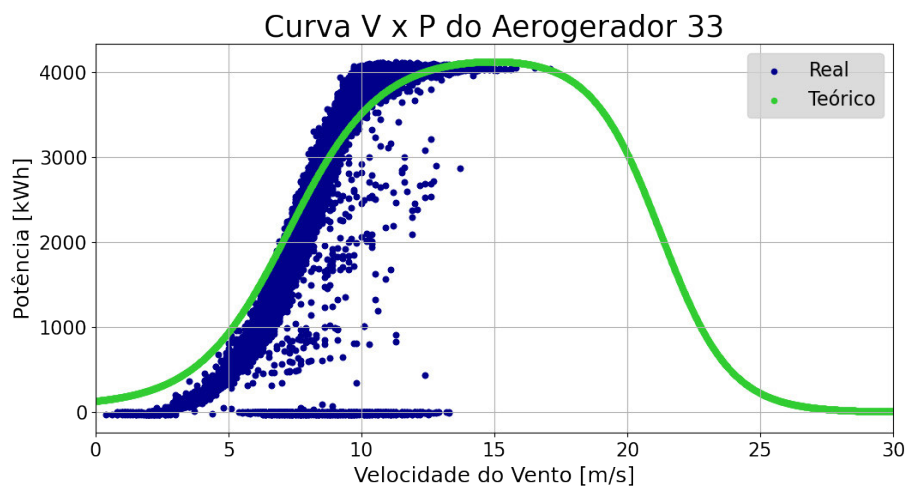
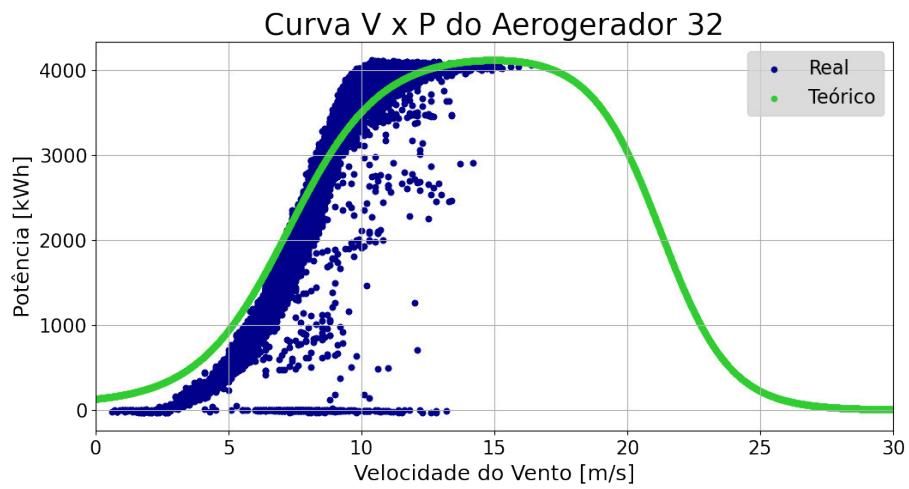
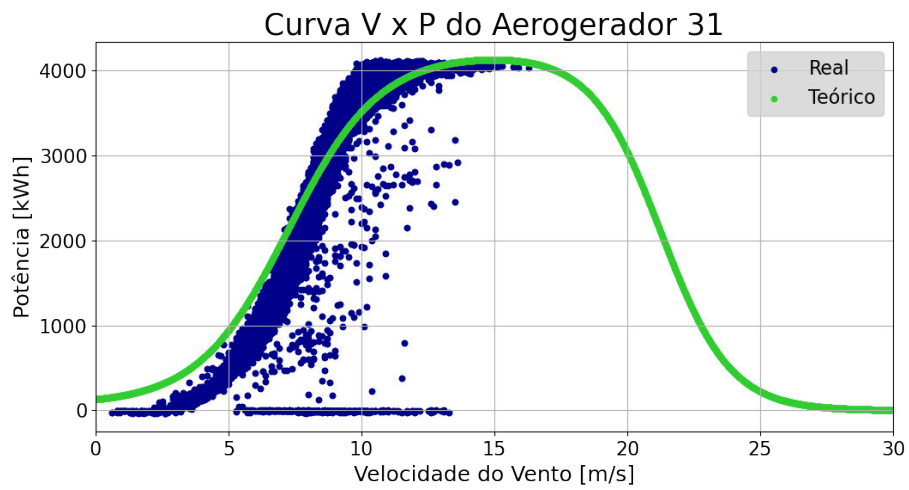


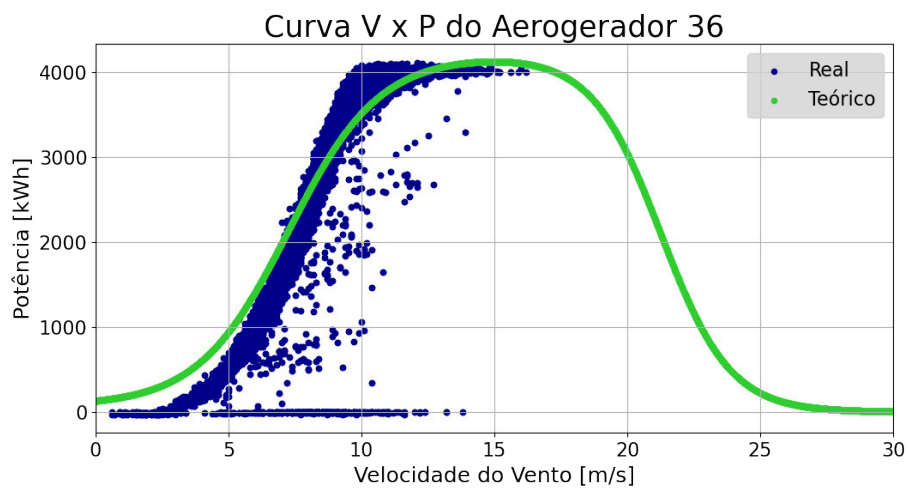
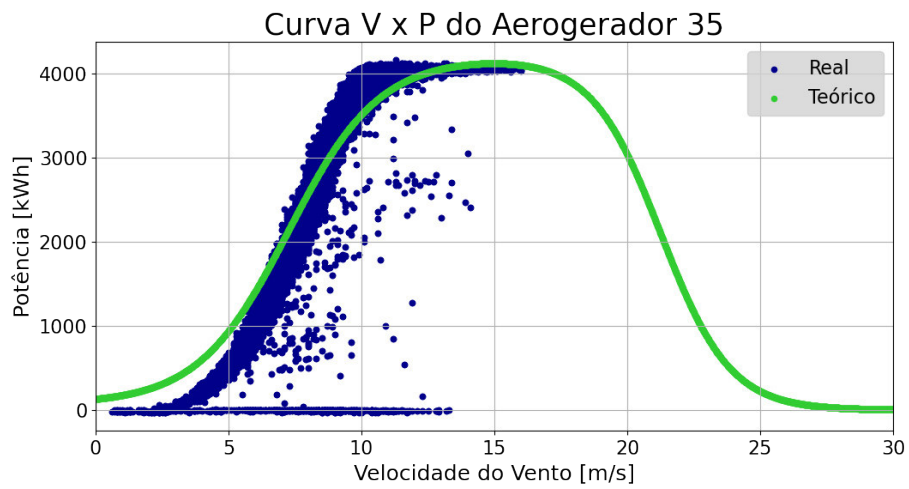
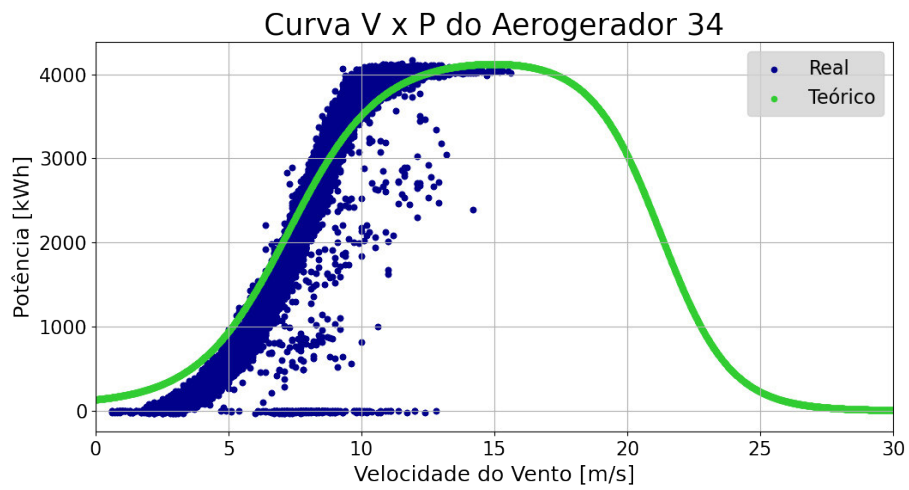


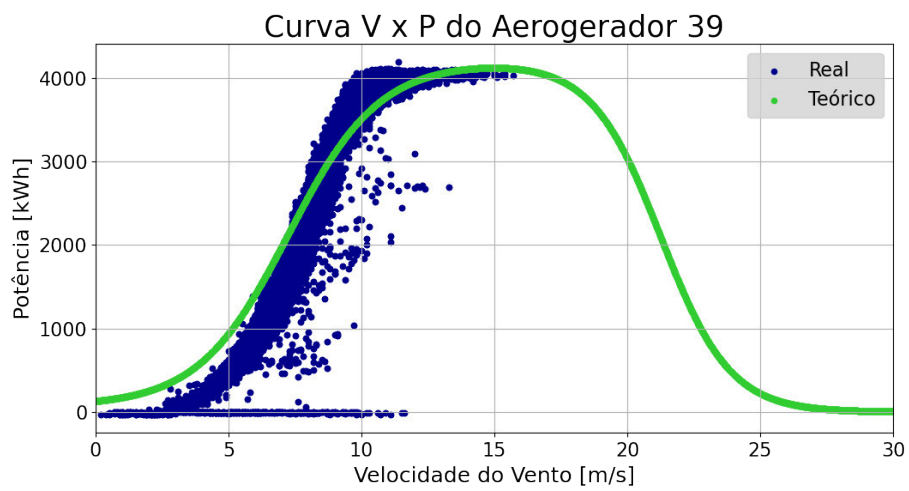
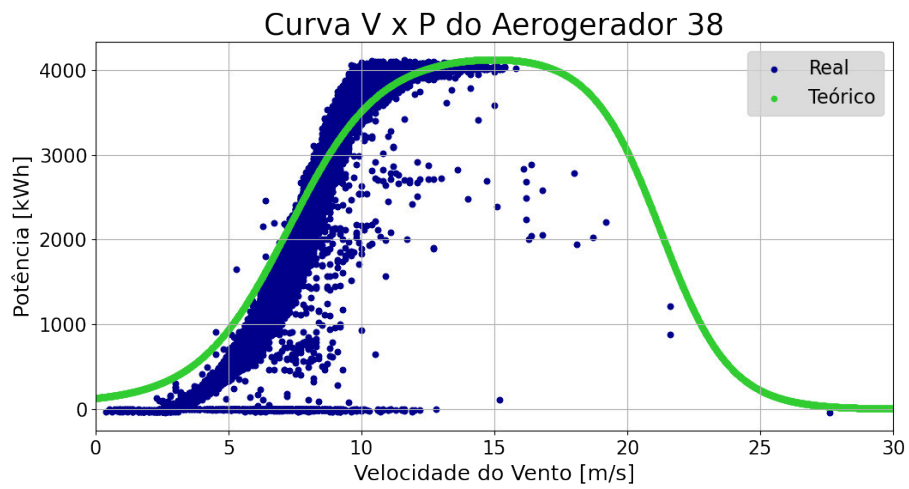
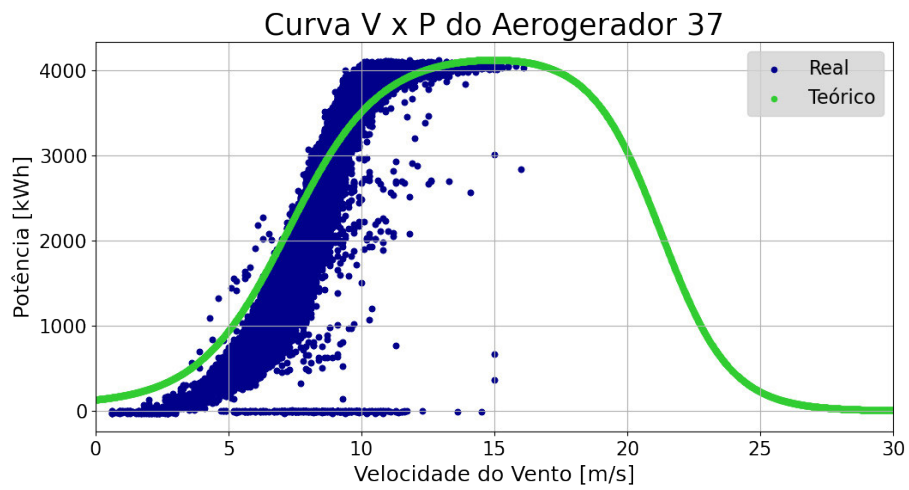


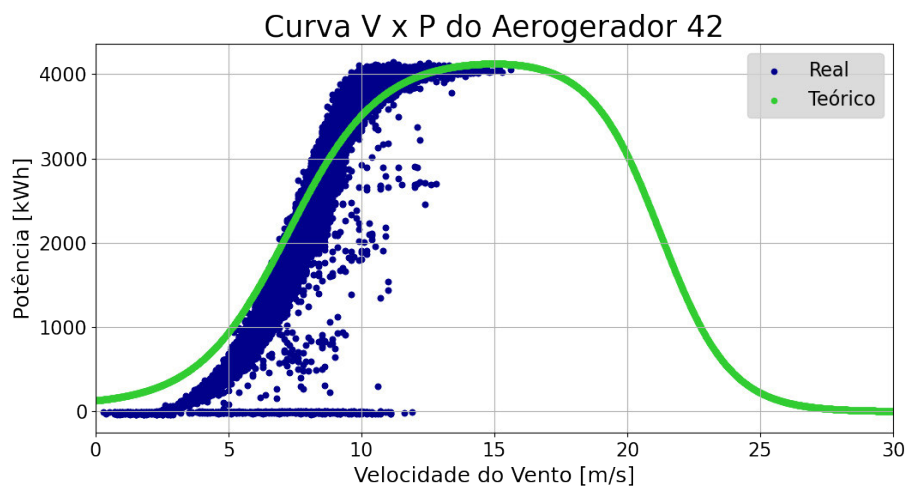
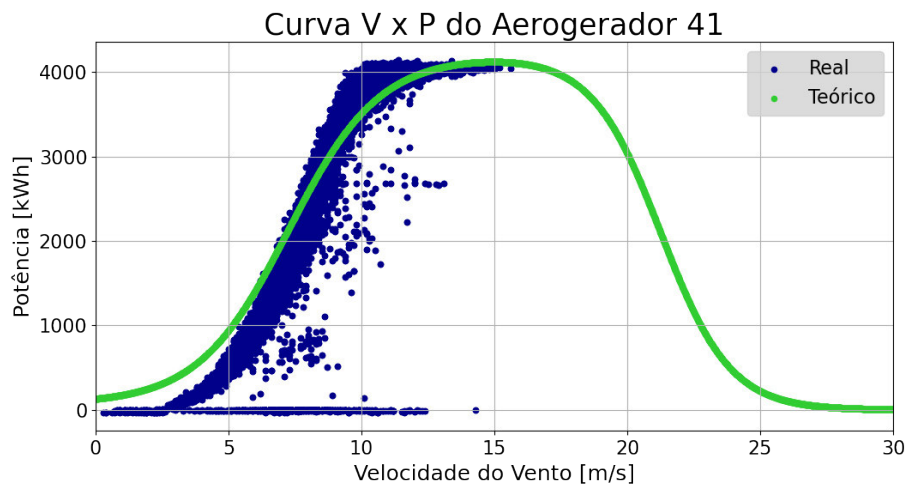
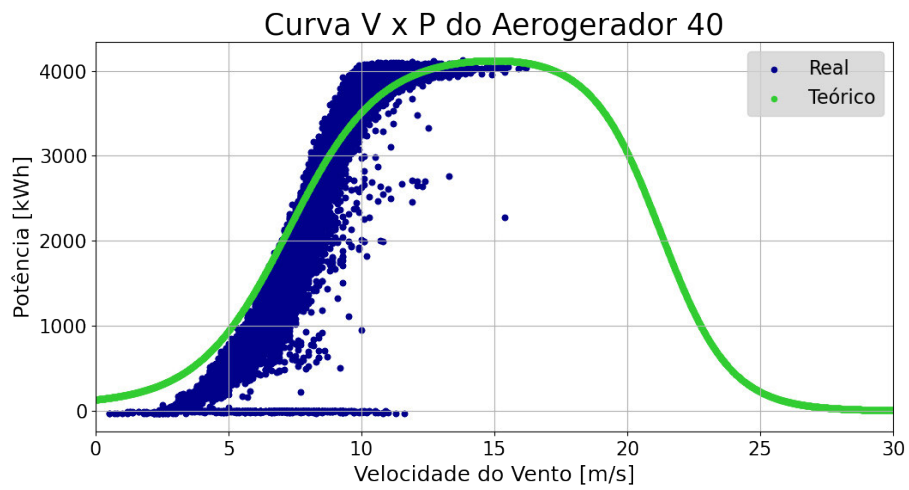


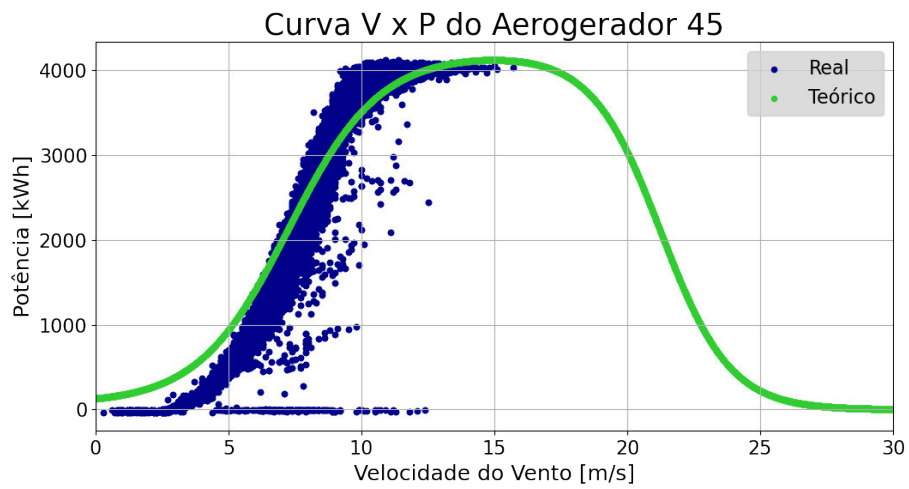
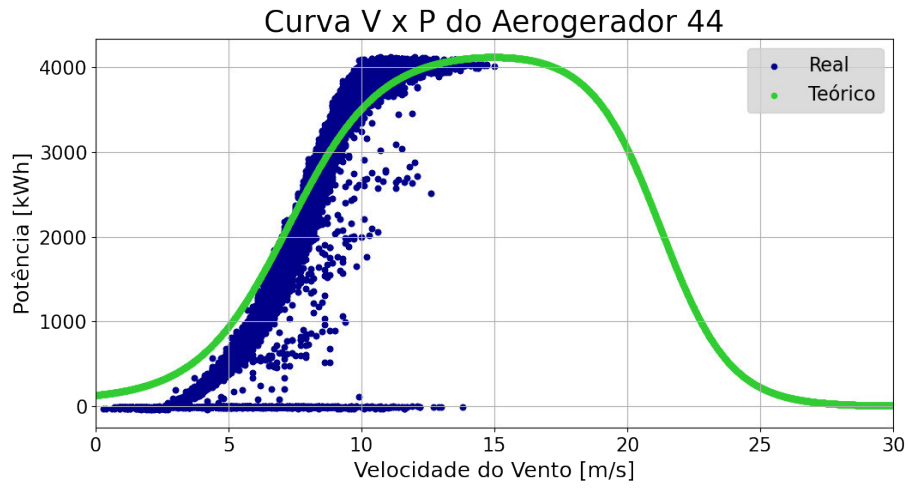
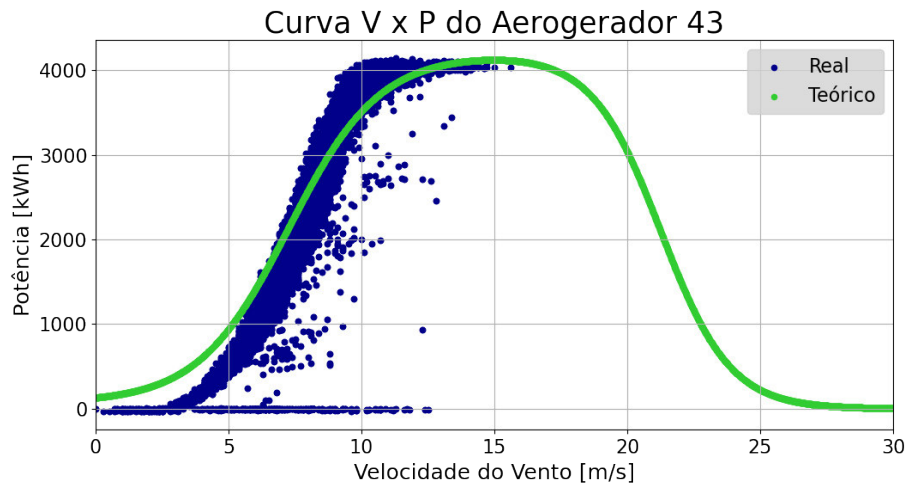


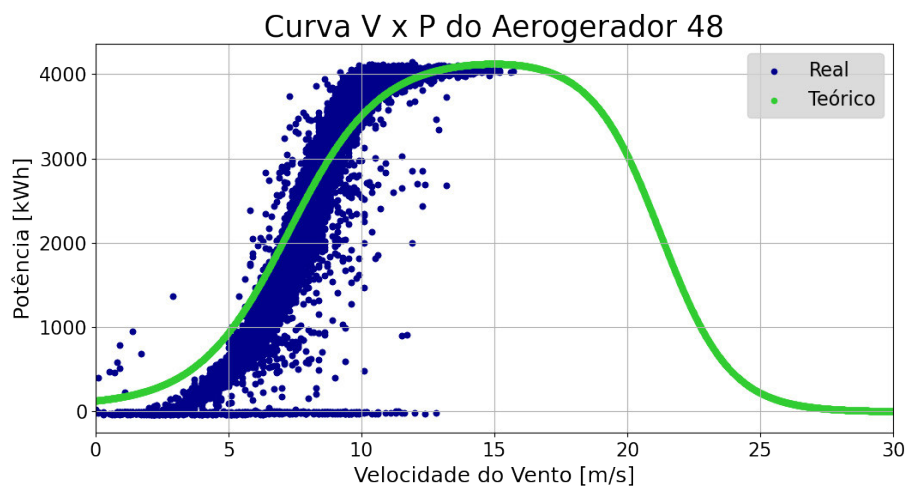
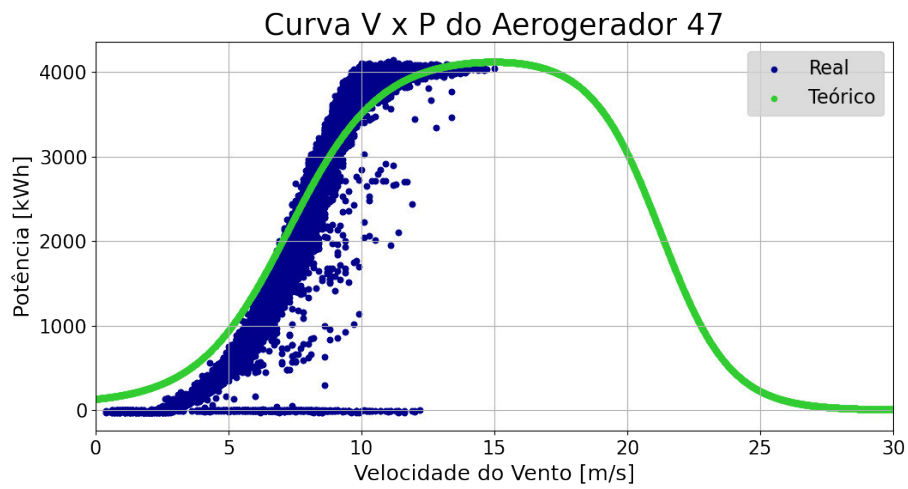
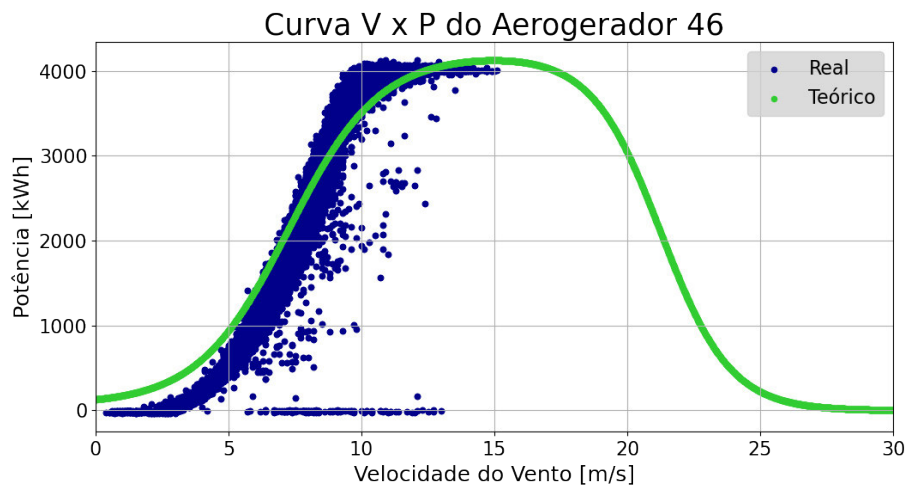


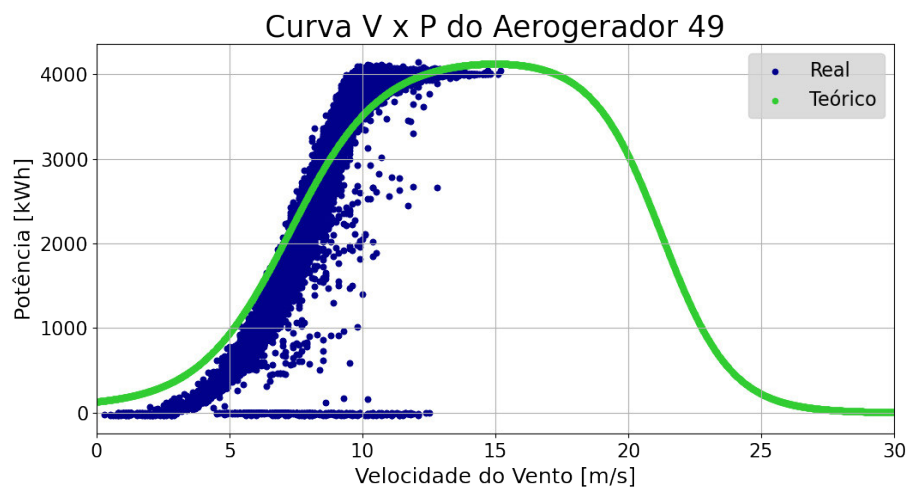












APÊNDICE B – GRÁFICOS DE GERAÇÃO REAL X GERAÇÃO ESTIMADA

