



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE GRADUAÇÃO ENGENHARIA ELÉTRICA

AMANDA CAROLINE MONTEIRO DE SOUZA

**APLICAÇÃO DE SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA POR BATERIAS
PARA A SUAVIZAÇÃO DE POTÊNCIA EM USINAS EÓLICAS**

Recife
2022

AMANDA CAROLINE MONTEIRO DE SOUZA

**APLICAÇÃO DE SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA POR
BATERIAS PARA A SUAVIZAÇÃO DE POTÊNCIA EM USINAS EÓLICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica
da Universidade Federal de Pernambuco, como
requisito parcial para obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. José Filho da Costa Castro

Coorientador: Prof. Dr. Pedro André Carvalho Rosas

Recife
2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Souza, Amanda Caroline Monteiro de.

Aplicação de Sistemas de Armazenamento de Energia por Baterias para a Suavização de Potência em Usinas Eólicas / Amanda Caroline Monteiro de Souza. - Recife, 2022.

73 p. : il., tab.

Orientador(a): José Filho da Costa Castro

Cooorientador(a): Pedro André Carvalho Rosas

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Elétrica - Bacharelado, 2022.

1. Energia Eólica. 2. Qualidade de Energia. 3. Métodos de Suavização. 4. Sistema de Armazenamento de Energia por Baterias (BESS). 5. Suavização de Potência. I. Costa Castro, José Filho da. (Orientação). II. Rosas, Pedro André Carvalho. (Coorientação). III. Título.

AMANDA CAROLINE MONTEIRO DE SOUZA

**APLICAÇÃO DE SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA POR
BATERIAS PARA A SUAVIZAÇÃO DE POTÊNCIA EM USINAS EÓLICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica
da Universidade Federal de Pernambuco, como
requisito parcial para obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovado em: 28/10/2022.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. José Filho da Costa Castro (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Pedro André Carvalho Rosas (Coorientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. MsC. Davidson Costa Marques
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Rafael Cavalcanti Neto
Universidade Federal de Pernambuco

Prof.^a Dra. Tatiane Silva Costa
Instituto de Tecnologia Edson Mororó Moura

DEDICATÓRIA

*“...Fosse eu Rei do Mundo,
baixava uma lei:
Mãe não morre nunca,
mãe ficará sempre
junto de seu filho
e ele, velho embora,
será pequenino
feito grão de milho.”*

Carlos Drummond de Andrade

**À minha mãe e minha avó,
Eliane Bernardino e Maria Barbosa.**

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, Maria Eliane Monteiro Bernardino e José Ronaldo de Souza, pelo amor, esforço, apoio, confidências, desabafos e dramas durante toda a minha caminhada escolar e hoje, acadêmica. Principalmente à minha mãe, por ser exemplo de educadora e de incentivar sempre o estudo e a educação.

À minha avó Maria Barbosa Monteiro, pelo amor, companheirismo, risadas e confidências, esses fatores foram muito importantes para a minha caminhada desde criança. Ao meu tio, Adriano Marcus Bernardino, por estar sempre por perto e por todo apoio que me deu quando precisei.

A Gabriel Loureiro, por todo amor, paciência, confidências, parceria, carinho, compressão e todos os momentos que foram importantes para meu crescimento profissional e como pessoa.

Aos meus sogros, Cristina Loureiro e Fábio Medeiros, que durante esses últimos 2 anos sempre me receberam de portas abertas em sua casa, me incentivando e me apoiando nos estudos e tantos outros perrengues da vida na cidade grande.

A todos os professores do Departamento de Engenharia Elétrica (DEE), por todos os ensinamentos e conhecimentos passados, meu muito obrigada!

Ao Instituto de Tecnologia Edson Mororó Moura (ITEMM), que possibilitou a realização desse estudo, com a minha participação no projeto ao qual esse trabalho foi construído, assim como o meu crescimento profissional durante esses quase 2 anos como estagiária. Agradeço também a todas as pessoas que fazem parte desse Instituto, como também aos que contribuíram para meu crescimento, em especial à Andrea Sarmiento.

Ao professor Dr. José Filho, meu orientador, agradeço pelas colaborações, ensinamentos, questionamentos e parceria, para que meu trabalho fosse construído.

Ao professor Dr. Pedro Rosas, meu coorientador, agradeço a confiança, colaboração, ensino e reflexões sobre esse projeto desde a minha participação no laboratório da UFPE, abrindo portas e me dando oportunidade no LCMag. Agradeço também pelos conhecimentos passados na disciplina de Energia Eólica, que me fez estudar e ganhar mais conhecimento para a construção desse trabalho.

Agradeço à CPFL, especialmente ao engenheiro Guilherme Ferretti Rissi, coordenador do projeto no qual participei tanto na UFPE, quanto no ITEM, pela concessão dos dados para a construção do meu trabalho de conclusão de curso.

A todos os amigos de curso, que dividiram os choros, alegrias, dramas, histórias e risadas, vocês foram importantes. O conhecimento não se constrói sozinho e vocês são para mim a prova disso. Agradeço, especialmente a Clara, Aline, Felipe, Luciana e João. Minha gratidão, também, aos meus amigos de trabalho, mas que viraram da vida, especialmente a Tatiane, Laís, Cláudia e Gabi.

Por fim, meu total reconhecimento a todos os funcionários que compõem a Universidade Federal de Pernambuco, pela excelência no dever de promover pesquisa e ensino público e de qualidade.

A todos aqueles, que diretamente ou indiretamente passaram em minha vida, e me permitiram evoluir para uma pessoa melhor, minha eterna gratidão.

RESUMO

Com o crescimento acelerado da inserção de fontes renováveis de energia novos desafios estão surgindo. As fontes intermitentes, em função da dependência da energia na sua forma primária (que no caso das fontes do tipo eólica é o vento), intrinsecamente apresentam perfil de geração com elevada variabilidade e imprevisibilidade. As variações não controladas das fontes eólicas podem provocar efeitos indesejáveis nos sistemas elétricos, tal como a degradação dos indicadores de qualidade e confiabilidade, comprometimento da segurança sistêmica, com a possibilidade de ocorrência de instabilidades e flutuações de tensão não permitidas, aumento da complexidade da operação e a necessidade de acréscimos dos montantes de reservas operativas. Para que sejam mitigados esses impactos, uma das soluções em potencial é a instalação de Sistemas de Armazenamento de Energia (*Energy Storage System – ESS*), elemento com a capacidade de absorção local das variações de potência e energia da fonte renovável evitando a propagação dos efeitos de rampas rápidas para a rede. Nesse sentido, as este trabalho aborda a caracterização dos Sistema de Armazenamento de Energia por meio de Baterias eletroquímicas (*Battery Energy Storage System – BESS*) e o emprego visando a suavização de potência elétrica em usina híbrida (do tipo eólica com baterias). São descritos os principais métodos para suavização apresentados na literatura científica, com ênfase na estratégia de maior viabilidade técnico-econômica. Por fim, é realizado um estudo de caso para uma instalação real em um parque eólico, localizado no Nordeste brasileiro, mais precisamente no Rio Grande do Norte, analisando-se no ambiente de simulação, assim como avaliando os dados em campo. O BESS em estudo tem uma potência de 1 MW e energia útil de 1,29 MWh. Os resultados obtidos mostram que o índice de suavização de potência na saída da geração eólica exibe ganhos de até 4% para ambas as situações, tanto nos dados simulado quanto nos reais, demonstrando que o BESS contribui significativamente para o cenário de fontes variáveis que possam causar impactos. Adicionalmente, a partir da análise de dados simulados, observa-se que o BESS pode trazer também benefícios na qualidade de energia se aplicado para um serviço remunerado (tal como no modo de operação visando arbitragem de energia), ou seja, há um ganho espontâneo associado, ainda que a funcionalidade de suavização de potência não seja diretamente aplicada exclusivamente para o sistema.

Palavras-chave: Energia Eólica, Qualidade de Energia, Métodos de Suavização, Sistema de Armazenamento de Energia por Baterias (BESS), Suavização de Potência, Arbitragem de Energia.

ABSTRACT

The challenges regarding the increasing insertion of renewable energy sources are inevitable. Intermittent sources bring variability and unpredictability, as well as other factors, which are dependent on the primary source, in the case of this work, the wind. Some of the trouble spots that can arise from this source are power quality problems, system instability and fluctuations. To mitigate these impacts, it is suggested to install an Energy Storage System (ESS), which absorbs and supplies energy from the renewable source that will be connected. From this, the main methods of smoothing, found in a scientific article, are brought, and described, however it is understood that one of them has greater technical and economic feasibility. The characteristics of the Battery Energy Storage System (BESS) are discussed in this work, as well as its components. From this, the main methods of smoothing, found in a scientific article, are brought, and described, however it is understood that one of them has greater technical and economic feasibility. For the method analysis, a case study is carried out for a real installation in a wind farm, located in the Brazilian Northeast, more precisely in Rio Grande do Norte, in which they are analyzed both in a simulated view and in practice. The BESS in this study has a power of 1 MW with energy of 1.29 MWh. The study shows that the power smoothing index at the wind generation output shows gains up to 4%, as the data simulation as real data, and highlights that BESS is of great importance for the scenario of sources that can cause impacts, as previously mentioned. It is possible to conclude, from the analysis of simulated data, that the BESS can bring some benefit in the quality of energy if applied to a paid service, that is, there is an associated spontaneous gain, even though the power smoothing functionality is not applied exclusively to the system.

Keywords: Wind Power, Power Quality, Smoothing Methods, Battery Energy Storage System (BESS), Power Smoothing, Energy Arbitration.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Possíveis Serviços Prestados por Armazenamento por Baterias.....	15
Figura 2 – Faixa de Preço do Pack de Bateria ao Longo do Tempo.	17
Figura 3 – Complementaridade Anual das Diversas Fontes de Geração.	21
Figura 4 – Evolução da Capacidade Instalada de 2005 a 2026 (em MW).	21
Figura 5 – Parques Eólicos na Região Nordeste.	22
Figura 6 – Esquemático de uma Turbina Eólica com Conexão na Rede Elétrica.	24
Figura 7 – Oscilação de Potência Ativa em um Aerogerador.	29
Figura 8 – Componentes do BESS.	33
Figura 9 – Diagrama Esquemático da Interação dos Componentes do Sistema.	34
Figura 10 – Diagrama Unifilar do Complexo Eólico Campo dos Ventos.....	39
Figura 11 – Sistema Elétrico de Vizinhança do Ponto de Conexão do BESS.	40
Figura 12 – Local de Instalação do BESS.	41
Figura 13 – Diagrama do Sistema em Estudo – Simulação no Homer Pro.....	44
Figura 14 – Fluxograma de Integração das Ferramentas HOMER Pro e Excel.....	45
Figura 15 – Dados de Vento do Complexo Eólico.....	46
Figura 16 - Dados de Temperatura do Complexo Eólico.....	47
Figura 17 – Modelagem do Parque Eólico.	48
Figura 18 – Modelagem do BESS.	49
Figura 19 – Modelagem do Conversor.	50
Figura 20 – Diagrama do Modelo de Bateria KiBaM.	51
Figura 21 – Modelagem da Rede.....	54
Figura 22 – Geração Eólica (Simulado).	55
Figura 23 – Potência Injetada na Rede Elétrica (Simulado).....	56
Figura 24 – Potência Ativa do BESS (Simulado).....	57
Figura 25 – SoC da Bateria (Simulado).....	58
Figura 26 – Potência Ativa Suavizada e Potência da Geração Eólica (Simulado).....	59
Figura 27 – Fluxograma do Tratamento de Dados Reais.	61
Figura 28 – Operação do BESS a partir da Variação de Potência Ativa da Geração Eólica (1º Dia).	62
Figura 29 – Potência Ativa Suavizada e Potência da Geração Eólica (2º Dia).	63
Figura 30 – Potência Ativa Suavizada e Potência da Geração Eólica (3º Dia).	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Geração Eólica Acumulada e Fator de Capacidade em Cada Região do País.....	14
Tabela 2 – Principais Problemas da Integração da Geração Eólica.	29
Tabela 3 – Descrição dos Parâmetros para a Modelagem dos Aerogeradores.....	48
Tabela 4 – Descrição dos Parâmetros para a Modelagem do BESS.	49
Tabela 5 – Descrição dos Parâmetros para a Modelagem do Conversor - PCS.....	50
Tabela 6 – Melhores Resultados (Simulação).	59
Tabela 7 – Melhores Resultados (2º Dia).	65
Tabela 8 – Melhores Resultados (3º Dia).	65

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ABEEólica	Associação Brasileira de Energia Eólica
BESS	<i>Battery Energy Storage System</i> (Sistema de Armazenamento de Energia por Bateria)
BMS	<i>Battery Management System</i> (Sistema de Gerenciamento de Bateria)
BNEF	BloombergNEF
CA	Corrente Alternada
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
CC	Corrente Contínua
CPFL	Companhia Paulista de Força e Luz
DoD	<i>Deep of Discharge</i> (Profundidade de Descarga)
EMS	<i>Energy Management System</i> (Sistema de Gerenciamento de Energia)
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ESS	<i>Energy Storage System</i> (Sistema de Armazenamento de Energia)
G, T & D	Geração, Transmissão e Distribuição
GWEC	<i>Global Wind Energy Council</i> (Conselho Global de Energia Eólica)
HVAC	<i>Heating, Ventilation, and Air Conditioning</i> (Aquecimento, Ventilação e Condicionamento de Ar)
IRENA	<i>International Renewable Energy Agency</i> (Agência Internacional de Energia Renovável)
KiBaM	<i>Kinetic Battery Model</i> (Modelo de Bateria Cinética)
LFP	Lítio Ferro-Fosfato
MA	<i>Moving Average</i> (Média Móvel)
MM	<i>Moving Median</i> (Mediana Móvel)
MVP	Máxima Variação de Potência
MRR	<i>Modified Ramp Rate</i> (Taxa de Rampa Modificada)
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i> (Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço)
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PAC	Ponto de Acoplamento Comum

PCS	<i>Power Conversion System</i> (Sistema Conversor de Potência)
PDE	Plano Decenal de Expansão de Energia
PEN	Plano da Operação Energética
PNE	Plano Nacional de Energia
RMI	<i>Rocky Mountain Institute</i>
RR	<i>Ramp Rate</i> (Taxa de Rampa)
SAE	Sistema de Armazenamento de Energia
SEB	Setor Elétrico Brasileiro
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SIN	Sistema Interligado Nacional
SMA	<i>Simple Moving Average</i> (Média Móvel Simples)
SoC	<i>State of Charge</i> (Estado de Carga)
SoH	<i>State of Health</i> (Estado de Saúde)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVOS GERAIS	18
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	19
2	USINAS DE GERAÇÃO EÓLICA.....	20
2.1	CRESCIMENTO E PROJEÇÕES	21
2.2	PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO	23
2.3	MODELAGEM DA GERAÇÃO EÓLICA	25
2.4	IMPACTO DA GERAÇÃO EÓLICA	26
2.4.1	Impactos Gerais Ambientais	26
2.4.2	Impactos na Qualidade de Energia	27
3	SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA POR BATERIAS	31
3.1	COMPONENTES DO BESS	32
3.2	CARACTERÍSTICAS DO BESS E MÉTODOS DE SUAVIZAÇÃO DE POTÊNCIA	34
3.2.1	Métodos de Suavização de Potência	35
4	BESS PARA A SUAVIZAÇÃO DE POTÊNCIA – ESTUDO DE CASO PARA UM PARQUE EÓLICO	38
4.1	ESTUDO DE CASO – USINA EÓLICA DE CAMPOS DOS VENTOS.....	39
4.2	APLICAÇÃO DE SUAVIZAÇÃO DE POTÊNCIA ATIVA	41
4.3	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL – HOMER PRO	43
4.3.1	Modelagem dos Aerogeradores.....	45
4.3.2	Modelagem do BESS	48
4.3.2.1	<i>Modelo de Bateria KiBaM</i>	<i>51</i>
4.3.3	Modelagem da Rede	53
4.3.4	Resultados das Simulações – Funcionalidade de Arbitragem de Energia.....	54
4.4	DADOS REAIS – PARQUE EÓLICO	60
4.4.1	Resultados Reais – Funcionalidade de Suavização de Potência	61
5	CONCLUSÃO	67
5.1	PROPOSTAS DE CONTINUIDADE.....	68
5.2	PUBLICAÇÕES.....	68
	REFERÊNCIAS	70

1 INTRODUÇÃO

A expansão dos sistemas elétricos por meio de fontes de geração renováveis tem sido intensificada nos últimos anos, motivada por aspectos socioambientais e incentivos para redução de emissões de gases poluentes, como medida de combate às mudanças climáticas. No Brasil, a fonte eólica é a quarta maior fonte geradora de energia na matriz elétrica brasileira, tendo maior inserção na região Nordeste, em função da característica e abundância da fonte primária (perfil de velocidade do vento) [1]. A Tabela 1 descreve a geração e representatividade da fonte eólica em cada região do país, observa-se que a região Nordeste detém os maiores números.

Tabela 1 – Geração Eólica Acumulada e Fator de Capacidade em Cada Região do País.

Subsistema	2020	2021
	Geração (GW)	Geração (GW)
Sul	8,7	8,45
Nordeste	63,25	84,06
Norte	2,16	2,4
Total	74,11	94,91

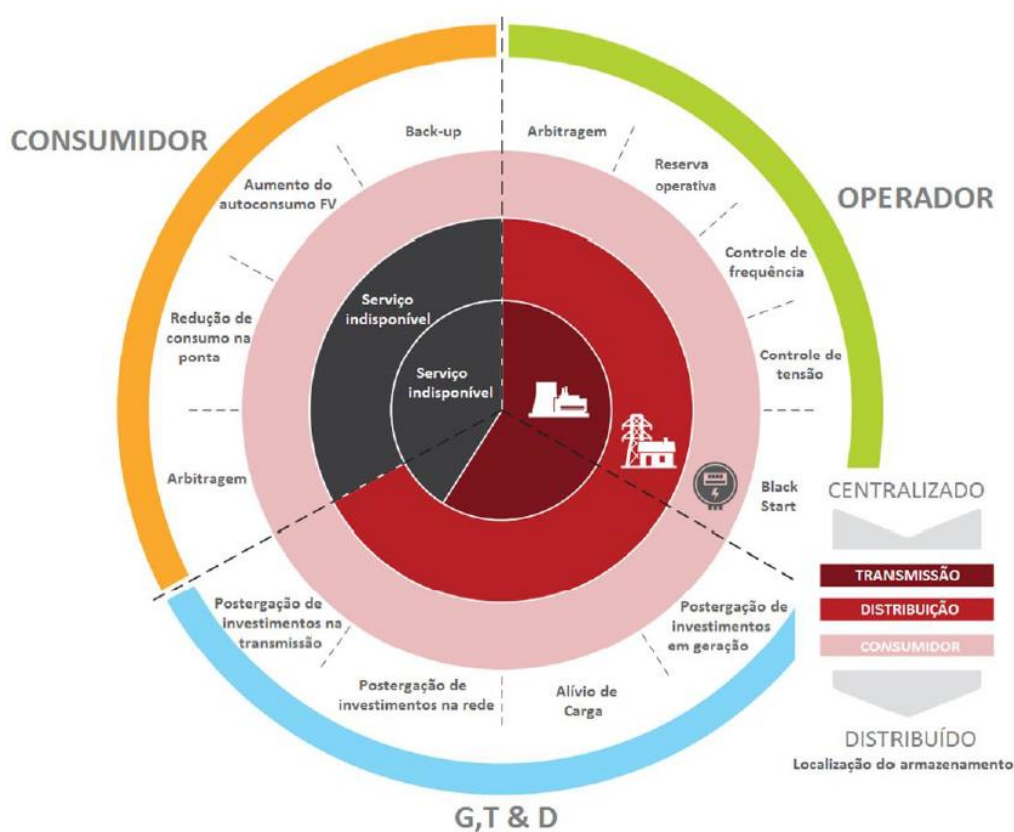
Fonte: [2].

Com a integração das fontes eólicas, cerca de 21,2 (vinte e um vírgula dois) milhões de toneladas de CO_2 foram evitadas em 2020. Adicionalmente, a implantação de usinas eólicas promove benefícios indiretos, tais como geração de renda, melhor custo-benefício (quando comparada com fontes do tipo termoelétrica) e capacitação de mão-de-obra local [3]. No quesito de viabilidade, a energia eólica se deu, principalmente, a partir da alta competitividade e aprimoramento das análises do potencial dessa tecnologia no Brasil [1].

Apesar dos benefícios, observa-se que a entrada massiva de fontes eólicas no Brasil, coincidente com a redução percentual de energia armazenada nos reservatórios de usinas hidrelétricas para suprimento da carga, traz consigo desafios para o planejamento e operação do Sistema Interligado Nacional (SIN). Neste contexto surge a oportunidade de implantação de Sistemas de Armazenamento de Energia (SAEs), que podem desempenhar um papel importante devido às suas características intrínsecas, como um recurso para os crescentes requisitos de capacidade e flexibilidade operativa do Setor Elétrico Brasileiro (SEB) [4].

O Armazenamento de Energia por Baterias (*Battery Energy Storage System – BESS*) é uma das tecnologias que apresenta um grande potencial para a utilização na matriz elétrica brasileira. O uso do armazenamento pode ser utilizado combinando diversas aplicações, realizando mais de um serviço, a depender da necessidade específica do sistema. Isso viabilizaria ainda mais, tornando a aplicação economicamente competitiva. Na Figura 1, são apresentados os serviços que o Sistema de Armazenamento pode desempenhar em cada segmento do setor elétrico, tal como uso nas cadeias de Geração, Transmissão e Distribuição (G, T & D).

Figura 1 – Possíveis Serviços Prestados por Armazenamento por Baterias.



Fonte: [4].

A crescente instalação de SAEs está em evolução intensa no mundo, acompanhando o desenvolvimento e crescimento da participação das fontes renováveis variáveis/intermitentes de energia. Segundo a BNEF, 1.095 GW/ 2.850 GWh terão sido implantados até 2040 e isso se

tornará possível em decorrência das quedas acentuadas nos custos das baterias, principalmente, as de íons de Lítio. A previsão é que os custos caiam pela metade até 2030, em função da expansão no número de projetos desenvolvidos nos dois mercados principais: armazenamento de energia estacionário e veículos elétricos [5].

As principais características que justificam o crescente uso de sistemas de armazenamento do tipo BESS no mundo em diversos projetos são: alta densidade de energia, alta eficiência e baixo tempo de resposta em operação, flexibilidade na capacidade de instalação, possibilidade de alocação física, versatilidade na utilização do sistema nas aplicações requeridas e rápida instalação, além do potencial de manutenção da confiabilidade/segurança da rede elétrica.

Em 10 anos, de 1996 a 2016, houve um crescimento exponencial na capacidade de instalação de baterias no mundo, atingindo cerca de 1,6 GW [4]. Segundo a IRENA, em 2017 as baterias de íons de Lítio foram responsáveis por quase 90% das adições de armazenamento de baterias em grande escala. Além destas, as de pequena escala tem aumentado a implantação em termos de capacidade de armazenamento de energia. A capacidade total de bateria em aplicações estacionárias pode aumentar de uma estimativa atual de 11 GWh para até 181 – 421 GWh, devido ao requisito de duplicação de energias renováveis no sistema global até 2030 [6]. Observando o histórico, as projeções indicam a tendência de maior utilização de sistemas de armazenamento de grande porte, em aplicações com ênfase na transição energética para matrizes de baixa emissão, fornecendo serviços para o sistema elétrico desde os setores da geração até consumidores finais.

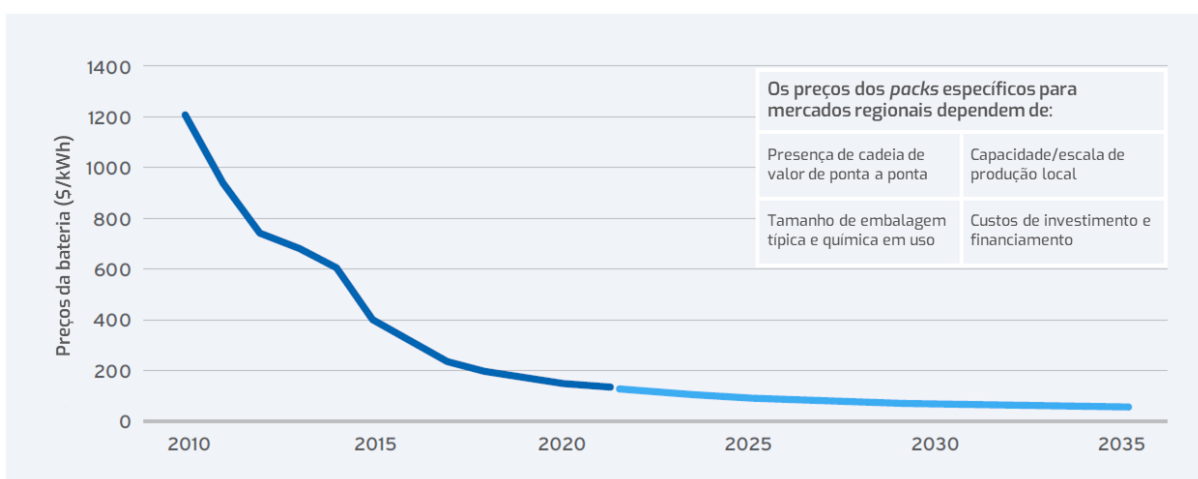
Em função dos custos elevados, a potencialização do crescimento do uso de baterias também ainda requer o emprego de estratégias de incentivo governamentais, com contribuição dos reguladores, operadores do sistema elétrico, geradores, como também financiadores. Por outro lado, há um entrave motivado pelo desconhecimento parcial dos benefícios e a escassez de estudos de caso. Consequentemente, observa-se defasagem nos processos e critérios de planejamento do sistema para emprego de baterias em aplicações de suporte ao sistema elétrico. Além disso, ainda há regulamentações específicas para o uso e implantação do sistema de armazenamento, que limitam a instalação de BESS em aplicações no setor elétrico.

Algumas sugestões de incentivos e políticas necessárias seriam: inclusão de soluções de armazenamento nos planos de expansão de capacidade de longo prazo, financiamento para projetos piloto ou demonstração e disseminação de aprendizado de estudo de caso, desenvolver

métodos de contabilidade, faturamento e medição para baterias conectadas à rede em grande escala, ou seja, valorar as aplicações do sistema de armazenamento, implantar sistemas de armazenamento de baterias em grande escala como uma das soluções para a redução de investimentos gerais em capacidade de geração e confiabilidade da rede, definir regulamentos claros para a propriedade e modelos operacionais de sistemas de armazenamento permitindo grande fluxo de receita [6].

Em relação aos preços de baterias de íons de Lítio, observa-se uma queda de 89% de 2010 a 2021. Em 2010 o custo médio era de US\$ 1.200/kWh e em 2021 este valor foi reduzido para US\$ 132/kWh. A diminuição ocorreu principalmente em função do aumento da produção, em cerca de 100 vezes, neste mesmo período, justificado pela alta demanda dos dois mercados principais, como também da Pesquisa e Desenvolvimento. Os preços globais das baterias devem chegar a US\$ 59/kWh até 2030, representando uma diminuição anual de 8,7% entre 2019 e 2030 [7]. Os preços dos minerais são o principal motivo do custo das baterias, assim, as mudanças nos preços dessas matérias-primas tem um efeito potencial no mercado. A Figura 2 exibe o decrescimento do valor do *pack* de baterias até 2035, em que a curva depois do ano de 2020 é uma projeção de preços do *pack*.

Figura 2 – Faixa de Preço do Pack de Bateria ao Longo do Tempo.



Fonte: Adaptado de [7].

As baterias integradas a usinas de geração eólica trazem benefícios, principalmente, devido à alta volatilidade dessa fonte de energia, em que a bateria oferece estabilização da

geração no curto prazo. Exemplificando, em alguns países é mandatório a utilização de Sistemas de Armazenamento de Energia para o cumprimento de regulatórios locais, a exemplo no Havaí, no qual junto à usina eólica de 21 MW tem-se um sistema de baterias de 11 MW/4,3 MWh [4]. Outro exemplo da aplicação de suavização de potência é citado em [8], no qual se fala do uso da bateria com alguns esquemas de configuração do BESS em um parque eólico, na finalidade de analisar o desempenho do sistema integrado.

Considerando o contexto descrito, o presente trabalho aborda o armazenamento por baterias junto a uma usina eólica, explorando a aplicação de suavização de potência na geração e como mensurar seu efeito, qualitativamente, tanto de maneira simulada, quanto por meio de medições verificadas em um projeto real.

1.1 Objetivos Gerais

Este trabalho tem como objetivo geral descrever a aplicação de um BESS como suporte à operação de uma usina eólica, para avaliar a operação do sistema de baterias visando a redução das variações de potência do grupo de aerogeradores.

1.2 Objetivos Específicos

O objetivo específico deste trabalho é comparar a aplicação de suavização de potência em geração eólica, por meio de simulações e análises de dados de medição. As análises devem ser entendidas do ponto de vista de índices, utilizados em países da Europa, abordados neste trabalho que respalda condições de um funcionamento eficaz no sistema elétrico instalado.

A apresentação dos métodos de suavização de potência é realizada, assim como as nuances de cada um deles. Porém, o estudo concentra-se em um método de suavização, no qual é implementado no sistema instalado, além de apresentar melhores resultados quando comparado aos outros métodos. Por fim, busca-se constatar que a utilização de um BESS pode contribuir para a aplicação de suavização de potência no cenário de instalações crescentes de gerações não controláveis.

1.3 Organização do Trabalho

O desenvolvimento deste trabalho detalha as usinas eólica, mostrando o crescimento e projeções de novos parques que podem ser instalados, assim como a complementariedade com diversas fontes na matriz elétrica brasileira. Após a introdução descrita neste capítulo, no Capítulo 2 são revisitados os princípios de funcionamento do gerador e a modelagem da geração eólica a partir da potência produzida, pela conversão de energia cinética em energia mecânica. A abordagem dos impactos da variabilidade da geração eólica é descrita no contexto dos critérios gerais de desempenho de sistema elétricos, e principalmente, com ênfase nos indicadores de qualidade de energia (aspecto essencial para compreender e propor soluções para perturbações no sistema elétrico).

Tendo como objetivo solucionar os problemas provocados pela geração intermitente, No Capítulo 3 os tópicos de armazenamento de energia por baterias são abordados na perspectiva de aplicações no setor elétrico. São apresentados os componentes que fazem parte do sistema, bem como os métodos de suavização que são aplicados em sistemas de armazenamento.

Considerando o levantamento realizado, no Capítulo 4 apresenta-se um estudo de caso simulado para uma central eólica, com base nos dados de medição obtidos no complexo de geração eólica Campos dos Ventos. Adicionalmente, apresenta-se também os resultados de simulação que reproduz os efeitos de suavização, mas impondo ao BESS a operação no modo de arbitragem de energia.

Por fim, os resultados associados aos índices de suavização de potência são discutidos e, na conclusão apresentada no Capítulo 5 são realizadas as considerações e comentários gerais sobre o estudo realizado. Além disso, propostas de trabalho futuras são comentadas, como também se apresenta o tópico de publicações relacionados ao presente trabalho de conclusão de curso.

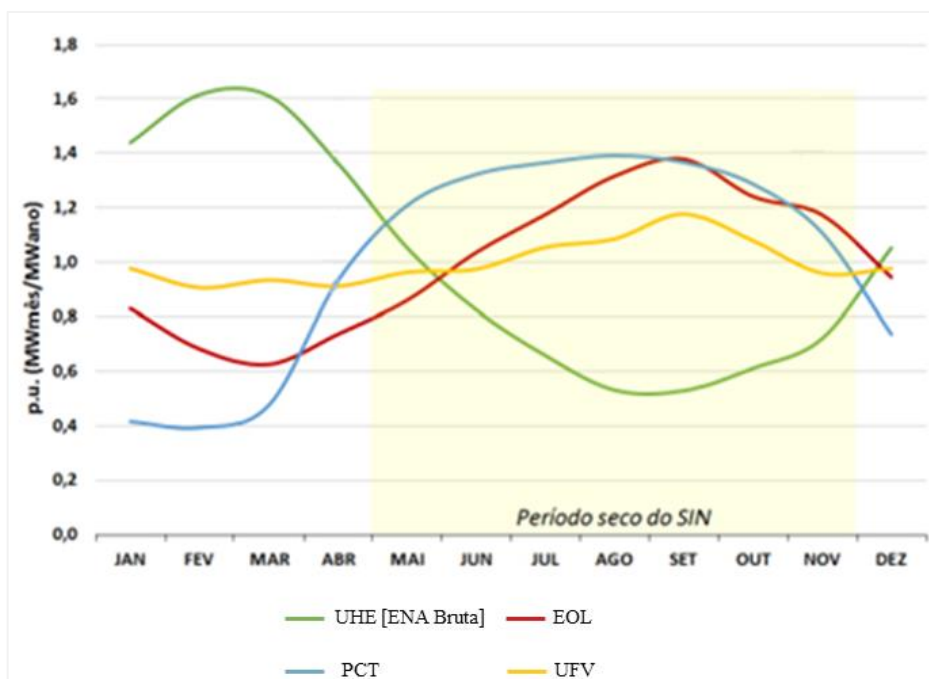
2 USINAS DE GERAÇÃO EÓLICA

A instalação de usinas eólicas no mundo tem sido acentuada nos últimos anos devido à diminuição dos custos da tecnologia, na busca pela descarbonização da matriz energética mundial, por se tratar de uma energia limpa e renovável. Diante do cenário internacional, o Brasil tem mostrado elevado potencial, estando na sexta posição no ranking mundial de Capacidade Total Instalada de Energia Eólica *Onshore* e é um dos países que tem papel fundamental no enfrentamento das mudanças climáticas [9].

De acordo com a ABEEólica, a geração eólica no Brasil conta com 12% (doze por cento) ou, aproximadamente, 22 GW (vinte e dois) de capacidade instalada na matriz elétrica brasileira, sendo a terceira maior fonte de geração no país, perdendo apenas para a hidro e a térmica [10]. Uma estimativa de consumo residencial mostra que a capacidade atual instalada no país conseguiria abastecer 28,8 milhões de residências, beneficiando 86,4 milhões de habitantes [11].

A localização geográfica de parques eólicos no Brasil tem ganhos potencializados em função da sinergia da produção histórica das fontes. No período corresponde ao período seco do SIN, como é possível observar da Figura 3, tem-se as maiores gerações pela fonte eólica. Nos meses de maio a outubro, que coincide com o período de menores gerações pelas usinas hídricas. Essa característica contribui para mitigar o efeito da sazonalidade, principalmente nas maiores hidrelétricas que estão concentradas nas regiões Sul e Sudeste. Essa complementariedade, nas mais diversas formas de geração, é um fator positivo que permite a alta participação do recurso renovável na matriz elétrica nacional. Contudo, essa energia renovável proveniente dos ventos tem a característica de ser variável, ou semi despachável, uma vez que a geração depende da quantidade de vento momentânea [12].

Figura 3 – Complementaridade Anual das Diversas Fontes de Geração.



Fonte: [12].

2.1 Crescimento e Projeções

Em 2020, o mercado mundial observou uma crescente instalação de usinas eólicas, cerca de 86,9 GW, representando 59% de aumento quando comparado ao ano anterior. No ranking mundial, o Brasil se destaca em relação à sua posição de Capacidade Total Instalada, onde em 2012 ocupava a 15ª posição, passando para a 6ª posição em 2021. Além disso, é o 3º país do mundo que mais instalou usinas eólicas no período [9].

O Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, desenvolvido pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) em 2017, indicava que o potencial instalável é de 143 GW considerando todo o território do país. Além disso, os resultados do Plano Nacional de Energia no horizonte de 2050, indicam enorme potencial eólico *onshore* a ser explorado [1]. Na Figura 4 é apresentada a evolução da capacidade instalada no Brasil, tanto instalações novas, quanto as acumuladas. A expectativa é que até 2024 o Brasil tenha, cerca de 34 GW de capacidade eólica instalada, tendo em vista os leilões realizados e os contratos assinados.

Figura 4 – Evolução da Capacidade Instalada de 2005 a 2026 (em MW).



Fonte: [3].

No Plano da Operação Energética, o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) apresenta a expansão da oferta de geração no SIN em um horizonte de 5 anos e mostra um crescimento de 7,5 GW de janeiro de 2022 a dezembro de 2026 [13].

O crescimento dessa tecnologia é evidente e pode ser observado nesses dados, principalmente, quando se trata de uma evolução que mostram recordes de potência instalada. Segundo a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), em 2021 o Brasil obteve o maior acréscimo de potência instalada, com destaque para a eólica, em que apresentou a maior entrada em operação registrada. As usinas que entraram em operação responderam por 3,7 GW aproximadamente, ultrapassando a marca registrada em 2014, de 2,7 GW. A capacidade instalada correspondeu a quase metade (48,85%) da potência total no período de 2021 [14].

Sabe-se que esse potencial eólico brasileiro se concentra na região Nordeste, em que as características de vento são relativamente constantes, com velocidade estável e não mudam de direção com frequência. Tais características classificam a região como tendo um dos melhores ventos do mundo [3]. Com base no banco de dados da ANEEL e EPE (Empresa de Pesquisa Energética), a capacidade instalada nessa região é de 20,3 GW, ou 90,6% de toda a capacidade instalada no país. A Figura 5 mostra onde estão localizadas as usinas eólicas nessa região (cada ponto azul corresponde a um complexo de geração eólica em operação).

Figura 5 – Parques Eólicos na Região Nordeste.



Fonte: [15].

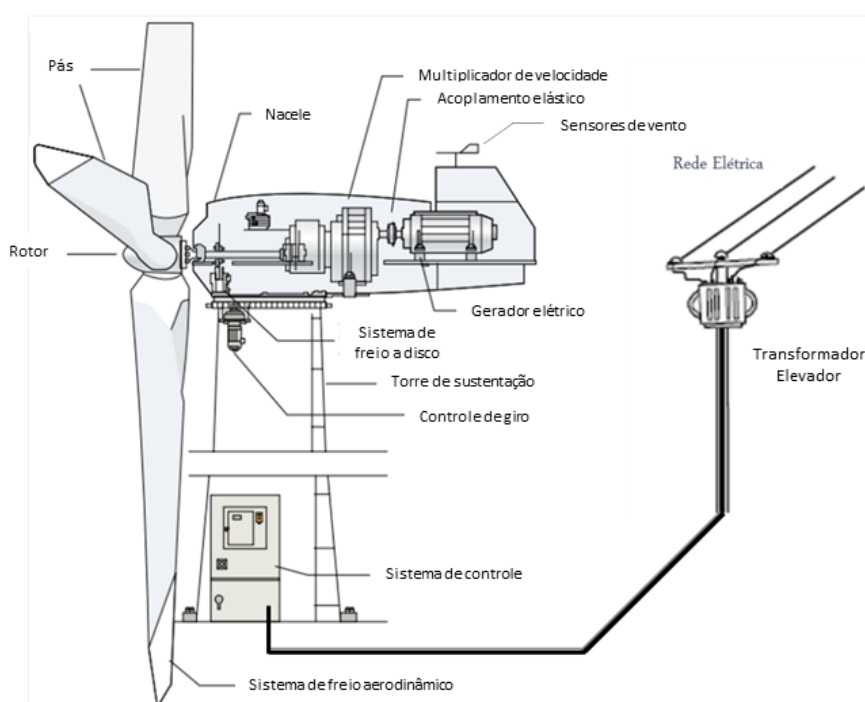
Em relação aos parques eólicos *onshore*, é possível analisar a tendência de crescimento das alturas dos aerogeradores, tendo uma média de 112 metros em 2019. Junto a isso, tem-se as inovações no aumento da área de varredura das pás, assim como o aumento de potência nominal, consequentemente, esses aumentos viabilizam melhor o aproveitamento do recurso eólico, permitindo o aumento do fator de capacidade nos locais com características similares aos da região Nordeste [1]. Além disso, os projetos eólicos *offshore* estão sendo mais estudados e investigados para uma maior perspectiva de geração, este tem o uso de aerogeradores ainda maiores do que aqueles empregados em instalações *onshore*.

2.2 Princípio de Funcionamento

A geração eólica utiliza a energia cinética do vento como fonte de energia primária. O processo de produção de energia ocorre através de um aerogerador (turbina eólica ou sistema de geração eólica), equipamento capaz de converter a energia cinética dos ventos em energia elétrica. O aerogerador é composto por uma torre, responsável pelo sustentamento e

posicionamento do rotor na altura adequada, um conjunto de pás conectadas a um rotor e uma nacele que abriga vários equipamentos, tais como gerador elétrico, em que há a conversão de energia mecânica em elétrica, multiplicador ou caixa de engrenagem (em alguns casos, uma vez que o eixo do rotor pode ser acoplado diretamente à carga), dispositivos de medição da velocidade e direção dos ventos e o transformador. Esses e outros componentes podem ser observados na Figura 6.

Figura 6 – Esquemático de uma Turbina Eólica com Conexão na Rede Elétrica.



Fonte: [16].

O princípio de funcionamento de um aerogerador se dá a partir da incidência de vento, que movimenta a pá. O aerogerador converte a energia cinética em potência mecânica no seu eixo. A potência mecânica se transmite ao gerador, gerando energia elétrica por meio de um processo de conversão eletromecânica de energia. A energia segue para a subestação do parque eólico e, então, por meio de linhas de transmissão, é transportada para a subestação coletora mais próxima e, finalmente, à rede básica, ou SIN.

Como é possível observar por meio da Figura 6, o aerogerador é dotado de sistema de freio, possibilitando o interrompimento da rotação das pás quando não há necessidade de

geração. Para isso, a unidade de controle monitora todas as características de vento e envia os comandos para que as pás sejam posicionadas de forma que o vento possa ser aproveitado com mais eficiência.

A pá se movimenta como resultado de duas forças incidindo sobre ela: a força de arrasto e a de sustentação. A força de arrasto é a componente na direção da velocidade de vento relativa, enquanto a força de sustentação é a componente perpendicular a esta direção. Outros parâmetros de interesse serão vistos no tópico 2.3 a seguir – que descreve a Modelagem da Geração Eólica.

2.3 Modelagem da Geração Eólica

Nesta seção objetiva-se revisitar os conceitos associados a produção da energia elétrica a partir das características da fonte primária dos aerogeradores. Segundo Thomas Ackermann, a potência de uma massa de ar que escoar com uma velocidade V através de uma área A pode ser calculada por meio da Equação 1 [17].

$$P = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (1)$$

Onde:

- ρ é a densidade do ar em kg/m^3 ;
- V é a velocidade do vento em m/s ;
- A é a área varrida pelas pás do rotor em m^2 .

Em termos do raio do rotor, a equação 1 pode ser escrita a partir da expressão 2.

$$P = \frac{1}{2} \rho \pi r^2 V^3 \quad (2)$$

Onde:

- r é o raio do rotor em m .

Essa equação pode ser utilizada como um modelo físico-matemático para representar o vento e viabilizar a extração da potência. Porém, é importante ressaltar que essa equação não possibilita converter toda essa potência em potência útil. Justificando isso, sabe-se que há a conversão da potência do vento em energia mecânico-rotacional do rotor da turbina, resultando em uma velocidade reduzida nas massas de ar [17].

Segundo [18], o coeficiente de potência C_p é definido como a razão entre a potência mecânica extraída pela turbina e a potência disponível no vento. Assim, a potência mecânica extraída pela turbina pode ser representada pela equação 3.

$$P_{m\acute{a}xima} = \frac{1}{2} \rho \pi r^2 V^3 C_p \quad (3)$$

Onde:

- C_p é o coeficiente de potência.

Na análise da expressão 3, supondo um aerogerador em que a velocidade do vento varie de 10 km/h para 11km/h, ou seja, um aumento de 10%, a potência máxima se eleva em 33% (variação cúbica), observando-se a importância da escolha de locais com ventos estratégicos para potencializar o aproveitamento da energia eólica.

2.4 Impacto da Geração Eólica

Neste tópico, serão apresentados os impactos provocados na implantação de centrais eólicas. A abordagem será realizada de maneira geral, no que se refere ao ambiental e até mesmo de logística, como também os problemas que podem surgir na qualidade de energia. Segundo [19], a inserção massiva e não coordenada de energias renováveis variáveis pode provocar impactos indesejáveis na rede elétrica, com potencial de degradação do desempenho dinâmico da rede. Sendo assim, é importante analisar os mais diversos parâmetros associados para que se tenham soluções para mitigar efeitos desfavoráveis para o sistema elétrico.

2.4.1 Impactos Gerais Ambientais

As inovações para a crescente tecnologia de aerogeradores têm aspectos que merecem ser destacados, uma vez que essa forma de geração pode apresentar significativos benefícios. Por outro lado, alguns problemas também podem existir, já que essa tecnologia exibe potências elevadas por aerogerador (com tendências a aumentar), como também um peso associado.

A partir desses fatores, é imprescindível analisar os aspectos logísticos, uma vez que essa fonte tem perspectivas de crescimento em relação à expansão. A preocupação no transporte dos equipamentos é algo presente tanto por parte dos fabricantes, quanto nos empreendedores, já

que a infraestrutura da maior parte do país é precária, principalmente na região Nordeste, onde há o trânsito para transporte dos equipamentos eólicos. Diante disso, melhorias no transporte e na infraestrutura precisam estar alinhados com esse crescimento tecnológico. Além disso, crescimento no segmento eólico *offshore* é algo que está em ascensão e possibilita menores custos, todavia a maior característica dos parques eólicos *offshore* é o uso de aerogeradores ainda maiores, o que fará ter uma dependência maior da infraestrutura portuária, tanto na fase de instalação quanto na fase de operação [1].

Por outro lado, os aerogeradores são uma fonte segura e renovável de energia, sem causar danos ao meio ambiente quando comparado com outras fontes de geração de energia. A ocupação de pequenas áreas, cerca de 6% a 8%, gera grande quantidade de energia elétrica, além disso essa área pode ser aproveitada para a agricultura e pecuária. A energia eólica tem diminuído bastante seu preço, uma vez que a tecnologia utilizada na produção tem tido um menor custo ao longo dos anos, como também menores custos de manutenções, uma vez que esses equipamentos não dependem de manutenções frequentes. Outro benefício dessa fonte é a geração de empregos nos locais onde são instalados os parques eólicos, impactando de maneira positiva regiões de baixa renda e longe de grandes metrópoles [11], [20], [21].

O incentivo à descarbonização é outro fator bastante benéfico para a sociedade, onde a fonte não conta com a emissão de CO_2 , fazendo a substituição de outras fontes de energia que têm emissão. De acordo com a ABEEólica, o total de emissões evitadas no ano de 2020 foi de 21,2 milhões de toneladas de CO_2 , o que representa a emissão anual de cerca de 21 milhões de automóveis de passeio [11].

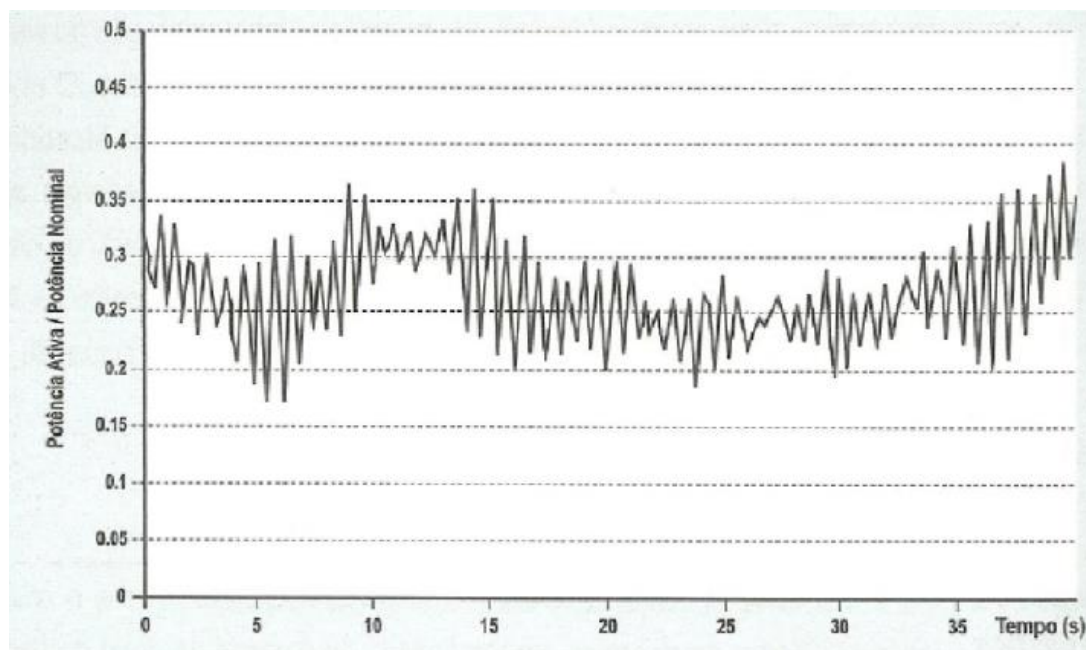
2.4.2 Impactos na Qualidade de Energia

A implementação da geração eólica na rede elétrica pode apresentar algumas características indesejáveis devido à natureza altamente incerta e variável do vento, podendo impactar o desempenho da rede elétrica. O comportamento do sistema pode ser significativamente influenciado em cenários de alta penetração de energia. Desta forma, tal impacto necessita ser considerado a fim de mitigar possíveis problemas. A partir disso, operadores de rede poderão sentir dificuldades para equilibrar geração e demanda, uma vez que existe o crescimento dessa fonte de energia renovável trazendo flutuações, impactando na qualidade de energia, dinâmica e estabilidade do sistema [22]. Essencialmente, qualquer desacerto entre geração e demanda possibilita desvios na frequência, enquanto as perdas nas

linhas causam desvios na amplitude da tensão. Essa falha não é tão comum no cenário brasileiro, uma vez que o SIN tem uma robustez e inércia baseadas nos geradores hidráulicos.

Devido à intermitência do vento, os efeitos relacionados à injeção de potência pelos aerogeradores são mais críticos. Os principais impactos à qualidade de energia podem ser: variação da potência do aerogerador, potência reativa e fator de potência, transitórios de chaveamentos elétricos, flutuação de tensão e harmônicos. A Figura 7 exemplifica o efeito da variação de potência ativa em um aerogerador [23].

Figura 7 – Oscilação de Potência Ativa em um Aerogerador.



Fonte: [23].

Inúmeros são os desafios relacionados à integração de centrais eólicas, sejam elas de pequeno ou grande porte. Em resumo, na Tabela 2 são apresentados os fatores que existem na problemática de integração da geração eólica.

Tabela 2 – Principais Problemas da Integração da Geração Eólica.

Integração		Problemas	Causas
Grande Escala	Pequena Escala	Elevação da tensão no estado estacionário	Variações na velocidade do vento
		Sobrecorrente	Picos na velocidade do vento
		Erros de atuação do sistema de proteção	Picos na velocidade do vento
		Emissão de <i>flicker</i> durante operação contínua	Operação dinâmica das turbinas eólicas
		Emissão de <i>flicker</i> durante operações de comutação	Operações de comutação/religamento de geradores

Integração		Problemas	Causas
		Queda de tensão	Corrente de <i>in rush</i> devido à operação de comutação de geradores
		Harmônicos	Conversores de eletrônica de potência
	Oscilações no sistema elétrico		Incapacidade dos controladores do sistema elétrico de lidar com as variações de potência das usinas eólicas e cargas
	Instabilidade na tensão		Limitações de potência reativa e demanda excessiva de potência reativa por parte do sistema elétrico

Fonte: [16].

Como é possível observar por meio da Tabela 2, os problemas de pequena escala também são problemas de grande escala adicionando problemas de oscilações no sistema elétrico e instabilidade na tensão. Problemas relacionados com a instabilidade de tensão se deve à limitação de transferência de potência reativa [16].

No próximo capítulo é apresentado uma solução para mitigar em parte a variabilidade da geração eólica, que impacta diretamente na qualidade do sistema, além de sua estabilidade.

3 SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA POR BATERIAS

A inserção massiva de fontes renováveis variáveis, apesar dos benefícios socioambientais, pode provocar violações dos limites aceitáveis dos indicadores de qualidade e segurança. Desta forma, há desafios a serem contornados visando garantir a estabilidade e confiabilidade sistêmica no longo prazo. Neste sentido, a adoção de estratégias para mitigar a intermitência e reduzir a variabilidade de fontes de geração variável e não-controlável tem se tornado essencial.

Uma das soluções para a variabilidade de potência é o emprego de SAE, possibilitando a redução da flutuação de potência de curto prazo, por exemplo. Essa tecnologia converte energia elétrica em outra forma de energia que possa vir a ser armazenada e, quando necessário, converte-se novamente em energia elétrica [24].

Dentre as mais diversas formas de armazenamento de energia, neste trabalho será estudado o armazenamento na forma eletroquímica, ou seja, por baterias, ou ainda Sistema de Armazenamento por Baterias (BESS, *Battery Energy Storage System*).

As baterias são compostas de um ânodo e de um cátodo os quais são imersos em um eletrólito. Uma reação eletroquímica é desencadeada ao se aplicar uma diferença de potencial ao cátodo e ânodo, convertendo-se em energia armazenada. Essa reação é reversível, que desencadeia no descarregamento da bateria quando se é solicitada.

Como descrito anteriormente, o BESS pode mitigar os efeitos adversos da oscilação de energia na geração eólica e, conseqüentemente, contribuir como ativo para operação da rede. Os sistemas de armazenamento por baterias podem desempenhar diferentes serviços, como arbitragem, reserva operativa, controle de frequência e controle de tensão e correção do fator de potência. Porém, necessita-se analisar as tecnologias para que seja aplicada a adequada para cada situação.

O sistema elétrico brasileiro tem passado por recentes mudanças, com a redução do percentual de energia armazenada nos reservatórios de usinas hidrelétricas em relação à carga. Com isso, embora o cenário seja de degradação da segurança eletroenergética, a situação se torna favorável para as tecnologias de armazenamento, uma vez que os recursos de um BESS podem agregar nos quesitos de capacidade e flexibilidade. Como informa o Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE), no Brasil há a necessidade de suprimento de potência a partir de

2024 e considera o armazenamento de energia por baterias como uma das tecnologias aplicáveis para esta finalidade [25].

3.1 Componentes do BESS

Um sistema de armazenamento, geralmente, é composto pelos principais componentes: baterias, *Battery Management System* (BMS), *Energy Management System* (EMS), *Power Conversion System* (PCS), sistema de detecção e supressão de incêndio, ventilação, ar-condicionado (HVAC – *Heating, Ventilation, Air Conditioning*), contêiner e outros sistemas auxiliares.

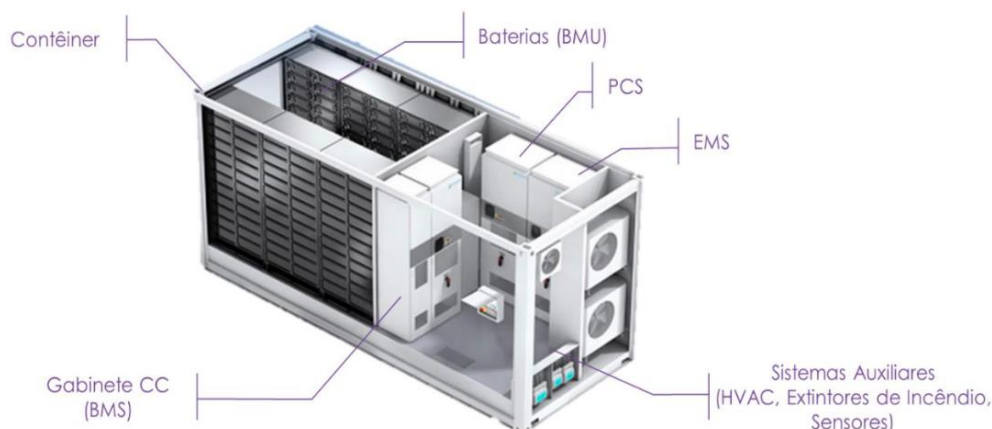
O BMS é o dispositivo responsável pela operação lógica para os diferentes modos de operação, bem como garantir a segurança de todo o sistema - controlando a potência de saída e o estado de carga (*State of Charge*, SoC). Além disso, é responsável por estimar o estado de saúde das baterias (*State of Healthy*, SoH), como também tem a função de monitorar a temperatura, tensão e nível de carga da bateria. As baterias de lítio precisam de um BMS, uma vez que o Lítio é altamente reativo e deve ser constantemente monitorado.

O EMS é uma classe de sistemas supervisórios, ou seja, é um software para monitoramento e operação de equipamentos e sistemas, por exemplo o BESS. O EMS atualiza e armazena continuamente dados relevantes, como tensão, corrente, frequência, potência ativa e reativa em bancos de dados locais ou remotos. O EMS pode ser considerado o “cérebro” do sistema, ou seja, uma parte essencial do BESS, em que todas as funções são coordenadas. Desta forma, concentra as informações do sistema e subsistemas e, caso necessário, envia os comandos para os subsistemas. O EMS recebe comandos de controle para permitir alterações nos modos de operação do BESS em diferentes aplicações. Essas aplicações, em essência, podem ser: suavização de potência, controle de frequência, controle de tensão, correção do fator de potência, backup e arbitragem (*time-shifting*).

O PCS é o equipamento utilizado para conectar o sistema de armazenamento à rede elétrica, proporcionando uma interface confiável tanto no lado CC quanto CA. Todas as funcionalidades projetadas para o BESS devem ser realizadas através do PCS, por exemplo, regulação de frequência e compensação de reativo, desde que as baterias utilizadas preencham os requisitos de funcionamento para esses modos operativos. Outra função do PCS é o controle

de recarga/descarga das baterias, sendo a comunicação via EMS. A Figura 8 mostra detalhadamente o BESS e seus componentes.

Figura 8 – Componentes do BESS.



Fonte: Adaptado de [26].

O componente principal de um BESS são as células de baterias. As baterias podem ser encontradas em várias tecnologias, dentre as de íons de Lítio, tem-se a LFP (lítio ferro-fosfato – LiFePO_4). Esta tecnologia possui um baixo custo, é termicamente estável, tem um alto ciclo de vida com uma capacidade de carregamento rápido, usa minerais de fácil acesso na natureza e possui uma curva *flat* de tensão na descarga [7]. Em geral, as baterias de íons de lítio apresentam uma densidade de energia satisfatória, em torno de 200 – 500 Wh/L, alta eficiência (70 – 100%), boa ciclagem (2500 ciclos, no mínimo), capacidade de carregar e descarregar de forma rápida e é bastante sustentável, não sendo tóxica [24], [27], [28], [29]. Seu uso é bastante comum em aplicações estacionárias para armazenamento de grande escala. Um dos desafios enfrentados por baterias de íons de lítio é manutenção da segurança, pois quando há sobrecarregamento, dano físico ou aumento da temperatura, as células podem explodir e/ou entrar em autocombustão. Além disso, paradas prematuras durante sua descarga podem vir a danificar o equipamento de maneira permanente, assim, é essencial o monitoramento da tensão e temperatura de cada célula e *pack* de bateria [30], [31].

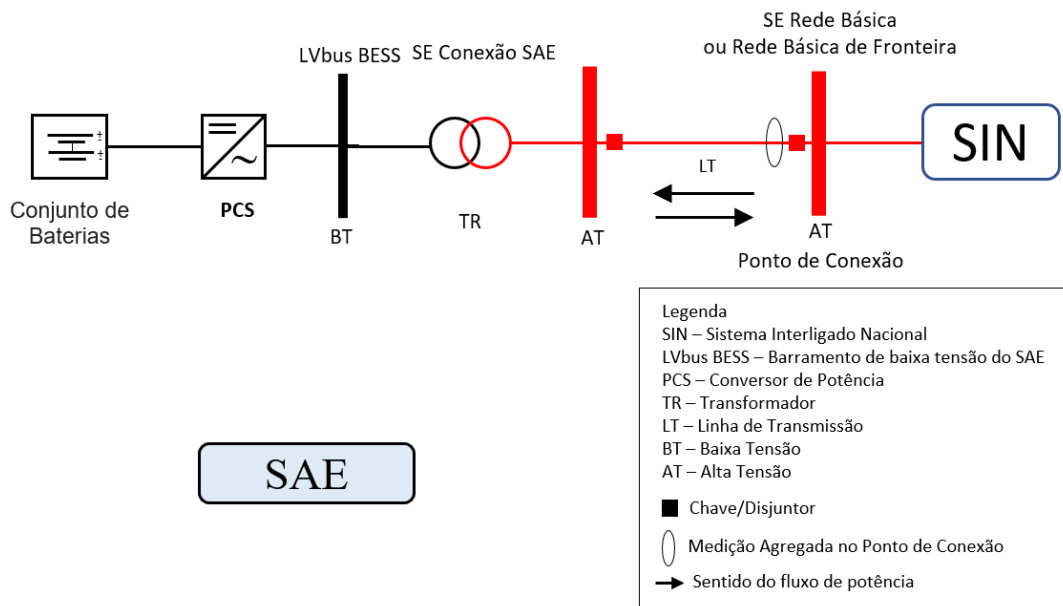
Por fim, entre os componentes de um sistema de armazenamento por baterias há ainda o sistema de detecção e supressão de incêndio, subsistema cujos componentes são utilizados para a garantia de segurança do local no qual o BESS está instalado, assim como das pessoas que

circulam nas instalações internas e próximas ao sistema de armazenamento. Desta forma, o sistema de detecção e supressão de incêndio está configurado para respostas rápidas e eficientes, devendo ser acionado rapidamente em momentos que se julguem necessários, visando garantir a evacuação de indivíduos (quando necessário).

3.2 Características do BESS e Métodos de Suavização de Potência

A partir do apresentado no tópico anterior que descreveu os componentes de um BESS, necessita-se, então, entender como funciona o modo operativo do BESS conectado à rede elétrica. Na Figura 9 há um diagrama esquemático da interação dos componentes do BESS e como este se conecta até a rede, ademais, mostrando os possíveis sentido de fluxo de energia no sistema.

Figura 9 – Diagrama Esquemático da Interação dos Componentes do Sistema.



Fonte: A Autora (2022).

Os bancos de baterias são formados por células individuais em série e/ou em paralelo. De acordo com [32], um grupo de células de baterias é conectado entre si através de contadores CC para formar bancos de baterias. A função desses contadores é desconectar uma bateria do restante em caso de falhas, como por exemplo, sobretensão, afundamento de tensão ou

sobrecarga de corrente em uma célula de bateria. De acordo com o diagrama esquemático, formado pelo PCS (CC-CA e conversor fonte de tensão), a operação se dá através da conversão de tensão CC em CA, no qual também é responsável por conectar o equipamento à rede.

Em relação ao sistema de controle, este tem como função o controle do fluxo de potência entre o sistema de armazenamento e a rede elétrica, assegurando a exportação/importação da potência requerida e executando a sincronização entre tensão e corrente elétrica no Ponto de Acoplamento Comum (PAC) entre o BESS e a rede elétrica. A potência no PAC pode apresentar valores positivos (o BESS absorve energia da rede) ou negativos (o BESS fornece energia para a rede).

3.2.1 Métodos de Suavização de Potência

Para que haja uma melhor qualidade de energia e estabilidade da rede, tem-se alternativas como a suavização da geração na saída da fonte com o uso de BESS absorvendo ou fornecendo a energia (com a finalidade de manter as variações em intervalo aceitável). Nessa perspectiva, esse tópico descreve, resumidamente, alguns métodos utilizados para suavização de potência em fontes renováveis variáveis, não controláveis, com ênfase no método utilizado no presente estudo. Como dito anteriormente, o autor [8] mostra o método da taxa de rampa, que é apresentado aqui neste trabalho, também utilizado em um sistema de armazenamento conectado a um grupo de aerogeradores.

Um dos desafios para a formatação de uma estratégia de suavização é a definição de atributos associados à potência elétrica. Segundo [33], o método da Média Móvel Simples (*Simple Moving Average* – SMA) tem sua aplicação utilizada em saídas de potências suaves, tendo como vantagem um menor esforço computacional. Fundamenta-se na soma de valores recentes de potência de saída do gerador eólico (P_{eol}), dividido pelo número de intervalos de tempo (w) na média de cálculo. A expressão 4 representa o método SMA no k -ésimo momento. P_{SMA} é um indicador para mensurar a potência elétrica suavizada.

$$P_{SMA} = \frac{\sum_{i=0}^{w-1} P_{eol}(k-i)}{w} \quad (4)$$

No método da Média Móvel Dupla (*Double Moving Average* – DMA) utiliza-se da SMA, aplicando-se a técnica duas vezes: aos dados originais e, em seguida, à sua resposta [34].

A Média Móvel Exponencial (*Exponential Moving Average* – EMA) [35], mostra-se diferente da média móvel simples a partir da sensibilidade que exibe, no que se refere às variações repentinas. Enquanto a EMA atribui um peso mais elevado aos valores recentes de potência, a SMA confere um peso igual. Além do parâmetro de intervalo (w), esse algoritmo conta com um peso, α , que geralmente é $2/(n + 1)$. Para esse método é dada a equação 5.

$$P_{EMA} = \alpha \left[\sum_{i=0}^{w-1} (1 - \alpha)^i P_{eol}(k - i) \right] \quad (5)$$

A Mediana Móvel (*Moving Median* – MM) é similar ao método SMA, porém o método MM utiliza a mediana no intervalo escolhido, enquanto na SMA são os valores médios [36].

No método da Taxa de Rampa (*Ramp Rate* – RR) [37] o cálculo se baseia de uma maneira diferente das que foram vistas anteriormente. O método calcula a variação de potência e só utiliza a energia do BESS se o limite configurado for ultrapassado, por exemplo, 500 kW por minuto. Esse método é o utilizado no PCS no presente estudo, em que o BESS injeta potência a partir da variação excedida, positivamente ou negativamente, absorvendo ou fornecendo, respectivamente. A variação percentual, Δ_{RR} , calcula-se a partir da diferença entre a potência da saída eólica, P_{eol} , e a potência de saída da taxa de rampa anterior, P_{RR} , dividida pela potência eólica nominal, P_{eol_n} . Essa variação pode ultrapassar os limites, tanto positivo, quanto negativo, ou ainda estar dentro do limite. Se a variação for positiva, o *Limite* deve ser subtraído da variação e se for negativa, o *Limite* deve ser adicionado à variação. Esse método se dá a partir da equação 6.

$$P_{RR} = P_{eol} - P_{eol_n}(\Delta_{RR} \mp Limite) \quad (6)$$

O método da Taxa de Rampa Modificada (*Modified Ramp Rate* – RRM) [33] exibe uma modificação da RR, em que a RRM busca controlar o SoC do BESS. O princípio se dá a partir da recarga ou descarga com a rede para que se atinja um valor desejado de SoC quando a variação desse parâmetro estiver dentro do intervalo limite estabelecido.

É importante mencionar que o método implementado em cada BESS é uma definido usualmente pelo fabricante, que desenvolve a parte computacional, considerando os custos,

bem como a aplicação que será utilizada. Sendo uma funcionalidade que, dependendo do equipamento, a aplicação de suavização de potência pode não ser utilizada.

Ademais, segundo [33] o método RR e RRM são os que mais tem a capacidade de limitar a taxa de variação, como também o melhor consumo ou fornecimento do banco de baterias, melhor aproveitamento da potência máxima de descarga ou recarga do banco de baterias, que se estabelece no algoritmo. Deste modo, nota-se que esses métodos (RR e RRM) são os mais eficazes, sendo usualmente utilizados como *benchmarking* para validação/comparação aos outros métodos.

Este capítulo apresentou uma descrição geral dos aspectos técnicos e métodos de mensuração das estratégias de suavização de potência. No próximo capítulo será apresentado um estudo de caso de implantação de BESS para suavização de potência.

4 BESS PARA A SUAVIZAÇÃO DE POTÊNCIA – ESTUDO DE CASO PARA UM PARQUE EÓLICO

A versatilidade de aplicações de sistemas de armazenamento no setor elétrico contribui para uma tendência de utilização e implementação da tecnologia no mercado brasileiro. No SIN, as tecnologias de armazenamento podem ser importantes para atender as necessidades de capacidade e flexibilidade do sistema elétrico. Além disso, o BESS pode contribuir, por exemplo, para um aumento da capacidade de integração de novas fontes no sistema, uma vez que pode ser controlado para se recarregar em momentos de maior produção de fontes renováveis.

Um BESS também pode operar, simultaneamente, em funcionalidades que envolvam ativo/reactivo, uma operação permitida por meio do controle do conversor. A ampla diversidade de aplicações contribui para a busca da viabilidade econômica, uma vez que maximizando a utilização da bateria ao longo do tempo, as múltiplas fontes de receitas tornam o sistema de armazenamento mais competitivo [4]. Junto a isso, o uso de sistemas de armazenamento se tornará maior, visto que essa solução traz flexibilidade, estabilidade e capacidade de resposta rápida [4], [38].

Diante desse cenário, este capítulo trata de uma das várias aplicações e funcionalidades que o BESS pode desempenhar quando em conjunto com fontes de energias não despacháveis/controláveis (como as fontes do tipo eólica), que é a suavização de potência ativa ou (simplesmente) suavização de potência (*power smothing*). Nesta funcionalidade, como descrito anteriormente, atuação do sistema de armazenamento tem como objetivo atuar como suporte à geração da potência ativa junto a fontes de geração, visando reduzir a intermitência/variabilidade, suavizando a curva de potência no ponto de acoplamento.

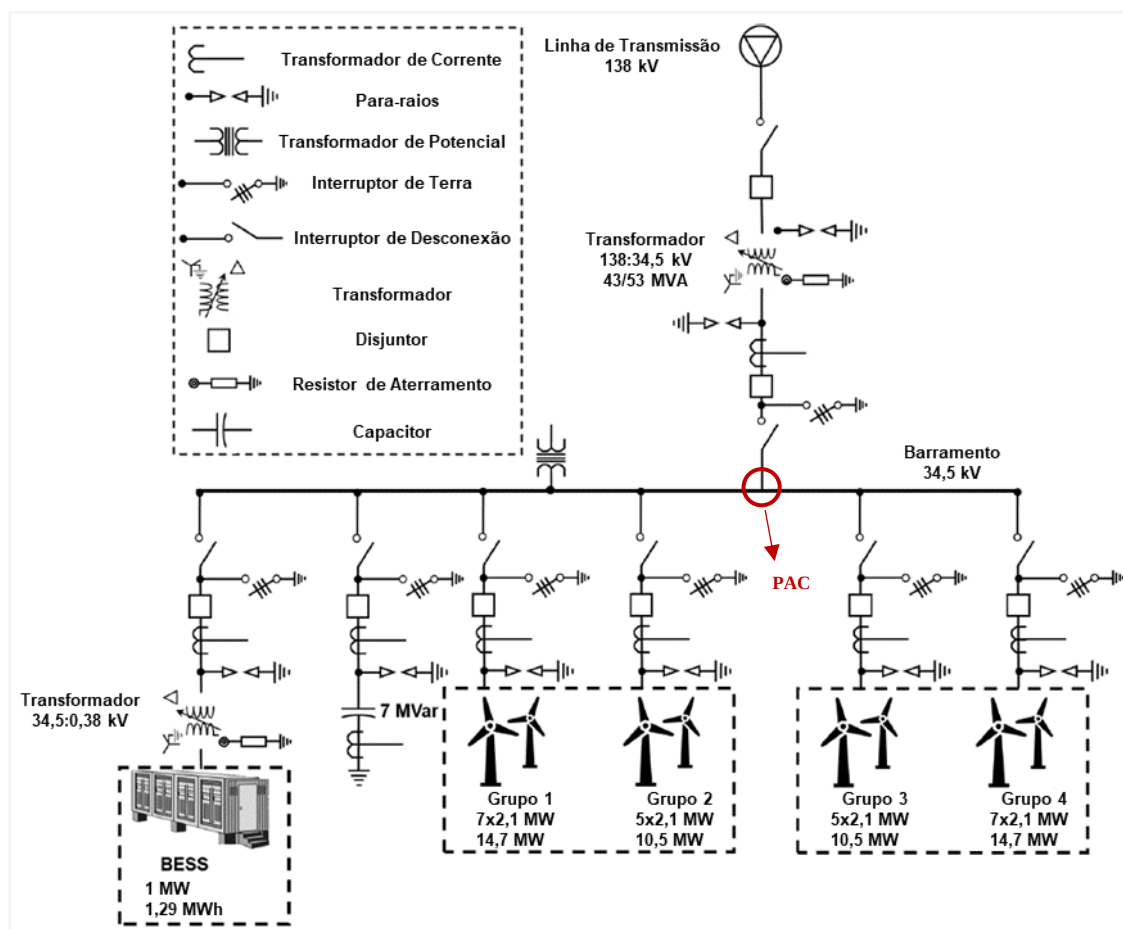
Adicionalmente, neste capítulo são analisados os resultados da operação, tanto simulados quanto reais, de um sistema de armazenamento de 1 MW/1,29 MWh conectado em paralelismo com 50,4 MW de potência instalada de geração eólica. Para a simulação, foi utilizado o software HOMER Pro, enquanto a avaliação real foi observada em um parque eólico localizado no Rio Grande do Norte. O tópico a seguir descreve o empreendimento de geração considerado no estudo de caso.

4.1 Estudo de Caso – Usina Eólica de Campos dos Ventos

A Figura 10 ilustra o diagrama unifilar simplificado da usina de geração eólica à qual foi adicionada um BESS. A conexão do BESS com os aerogeradores foi realizada em paralelo (no mesmo barramento de 34,5 kV) e o monitoramento se dá através de um sistema supervisório. Nesta instalação, o BESS atuará como suporte de potência ativa da fonte eólica, injetando ou recebendo potência para suavizar a potência total observada pela rede no ponto de acoplamento.

A escolha do parque eólico veio a partir do projeto de pesquisa da chamada pública da ANEEL de número 21. O Complexo Eólico Campo dos Ventos de posse da CPFL (Companhia Paulista de Força e Luz) está localizado em João Câmara – Rio Grande do Norte (RN) e conta com 24 aerogeradores de 2,1 MW de potência totalizando 50,4 MW. No que se refere ao sistema de armazenamento, este é de 1 MW/1,29 MWh com tecnologia de Lítio-Íon LFP.

Figura 10 – Diagrama Unifilar do Complexo Eólico Campo dos Ventos.



Fonte: [22].

Figura 12 – Local de Instalação do BESS.



Fonte: [22].

A partir da Figura 10, nota-se que no PAC a potência ativa do BESS (P_{BESS}) se soma à potência ativa da geração eólica (P_{eol}), resultando na potência da rede elétrica (P_{rede}). Em resumo, a equação 7 expressa a potência total entregue à rede [40].

$$P_{rede} = P_{eol} + P_{BESS} \quad (7)$$

O tópico 4.2 a seguir descreve o índice utilizado para avaliar a suavização de potência. Nos próximos tópicos serão apresentados os resultados de uma simulação que busca reproduzir o sistema real implantado na central de geração de Campos dos Ventos. Em seguida, no tópico 4.4 deste capítulo serão apresentados os dados de medição do projeto.

4.2 Aplicação de Suavização de Potência Ativa

Os resultados para a aplicação de suavização de potência são analisados, matematicamente, por meio de um índice de Máxima Variação de Potência (MVP). Essa avaliação numérica se dá através de uma porcentagem, no qual o indicador corresponde a uma máxima variação de potência na potência nominal do conjunto de aerogeradores ($P_{nominal}$) em um intervalo de tempo estabelecido, todavia quanto menor esse intervalo mais preciso é o

resultado. A equação 8 mostra como pode ser estimado o índice MVP em qualquer intervalo de tempo.

$$MVP (\%) = \left(\frac{P_{m\acute{a}x} - P_{m\acute{i}n}}{P_{nominal}} \right) \times 100 \quad (8)$$

Onde:

- $P_{m\acute{a}x}$: é a maior potência de geração eólica no intervalo calculado;
- $P_{m\acute{i}n}$: é a menor potência de geração eólica no intervalo calculado;
- $P_{nominal}$: é a potência nominal conectada ao BESS.

Para se obter o ganho na suavização de potência é necessário se avaliar o índice antes e após a inserção do sistema de armazenamento. A diferença entre o índice de antes e depois da contribuição reflete o quanto que houve de ganhos em porcentagem. O resultado do ganho se obtém a partir da equação 9.

$$MVP_{ganho} (\%) = MVP (\%)_{sem\ BESS} - MVP (\%)_{com\ BESS} \quad (9)$$

Onde:

- $MVP (\%)_{sem\ BESS}$: é o índice calculado sem os efeitos do BESS;
- $MVP (\%)_{com\ BESS}$: é o índice calculado com os efeitos do BESS.

Empresas de energia e operadores de sistemas de diversos países europeus adotam esse índice para que sejam reduzidas as flutuações, principalmente, de fontes eólicas, limitando-o a 10% em intervalos de 1 ou 10 minutos (o intervalo é definido considerando as aplicações em cada região) [41], [42].

No presente trabalho, utiliza-se um intervalo de tempo de 5 minutos (MVP5), no qual emprega-se a equação 8 para obter o índice nos resultados de medição reais. No caso simulado, por uma limitação da plataforma de simulação empregada, os dados de previsão de produção de potência do aerogerador são discretizados em um intervalo de 15 minutos. Portanto, as simulações consideram uma análise com o intervalo de tempo maior do que o observado no

caso real, ou seja, um índice MVP¹⁵. Como mencionado anteriormente, quanto menor o valor do MVP, mais suavizada a curva é e, conseqüentemente, melhor a qualidade de energia na saída para a rede elétrica. Idealmente, uma curva totalmente suavizada teria um MVP de 0%.

Quanto ao funcionamento da aplicação, o BESS opera por meio do sistema de controle do EMS, no qual este verifica a potência ativa da geração eólica no barramento onde se está conectado. No momento que o EMS observa uma variação de 500 kW em um intervalo de tempo de 60 segundos, o sistema de armazenamento atua, absorvendo ou fornecendo potência ativa, a depender de como esteja a geração no momento. O sistema de armazenamento atua absorvendo nos pico de elevada geração e fornecendo potência quando há redução da potência de geração do aerogerador.

Em resumo, uma das formas de se reduzir a variabilidade da potência da geração eólica é a realização do controle da potência ativa despachada pelo BESS, observando o estado de carga da bateria. Dessa forma, isso impacta na entrega da potência ativa à rede em que se melhora a qualidade de energia, assim como a estabilidade da rede.

Nos próximos tópicos os gráficos com a simulação da operação serão exibidos, elucidando-se a atuação do BESS para suavização.

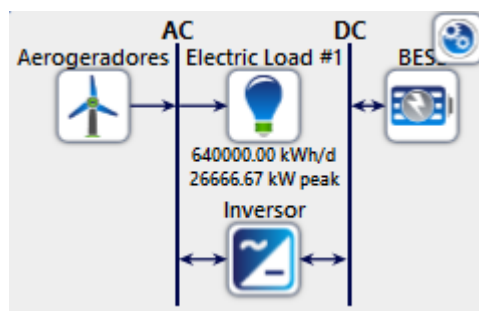
4.3 Simulação Computacional – HOMER Pro

Neste tópico é realizada a descrição de como a ferramenta foi utilizada, levando em conta características intrínsecas e como contribuiu no resultado. O software HOMER tem a característica de avaliar os projetos de microrredes (conectados ou não à rede), considerando os equipamentos envolvidos no sistema, além de calcular as possíveis combinações/alternativas de topologia desses equipamentos (visando análise comparativa de alternativas de investimento). Utilizado para encontrar uma configuração otimizada de um sistema híbrido de energia, a plataforma é capaz de avaliar parâmetros como economia, tamanho e número de componentes. Além disso, a ferramenta também simula a operação do sistema - analisando o balanço de energia ao longo do prazo especificado ou de um ano. A escolha da ferramenta se fez necessária a partir da aplicação e simplicidade da simulação de um sistema de armazenamento conectado a um parque eólico.

Para o sistema analisado neste trabalho, as variáveis de interesse foram o balanço de potência e o despacho da energia renovável, bem como o funcionamento/comportamento do

BESS (operação com recarga e descarga) [43], [44]. A Figura 13 mostra o diagrama do sistema simulado do presente estudo.

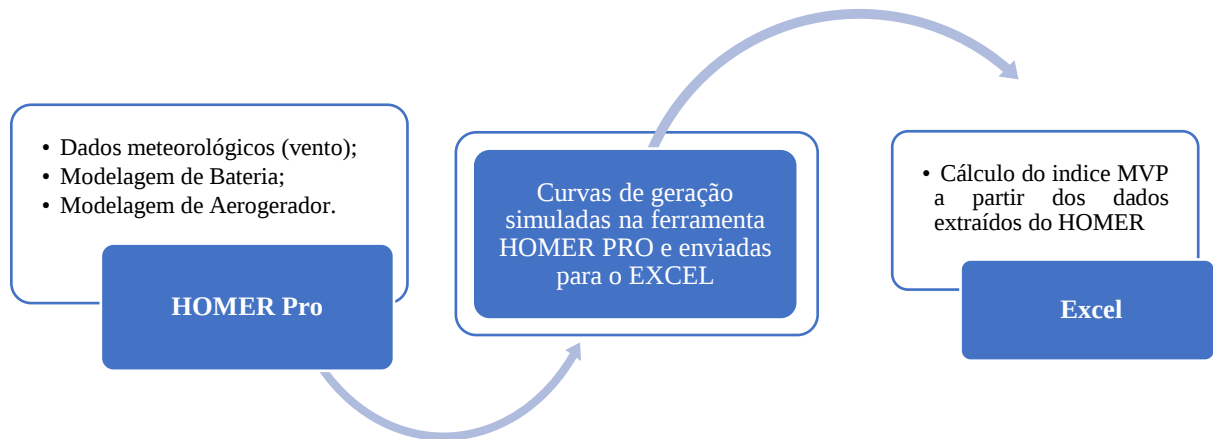
Figura 13 – Diagrama do Sistema em Estudo – Simulação no Homer Pro.



Fonte: A Autora (2022).

No esquemático da Figura 14, o retângulo de “HOMER Pro” exibe alguns dos parâmetros necessários para que fossem obtidas as curvas de geração, desde os dados de vento até os dados de modelagem de aerogeradores (potência, modelo do aerogerador, entre outros), assim como na modelagem de baterias (tamanho do sistema, profundidade de descarga, corrente e tensões máximas, entre outros). No passo seguinte, os dados foram extraídos do HOMER em arquivos no formato .csv e migrados para o Excel, no qual a ferramenta HOMER não dispõe da análise do indicador utilizado no presente estudo. No passo “Excel” são realizados os cálculos com os dados que foram simulados e extraídos do HOMER, a partir do detalhamento de energia e potência da geração e potência absorvida ou fornecida do BESS.

Figura 14 – Fluxograma de Integração das Ferramentas HOMER Pro e Excel.

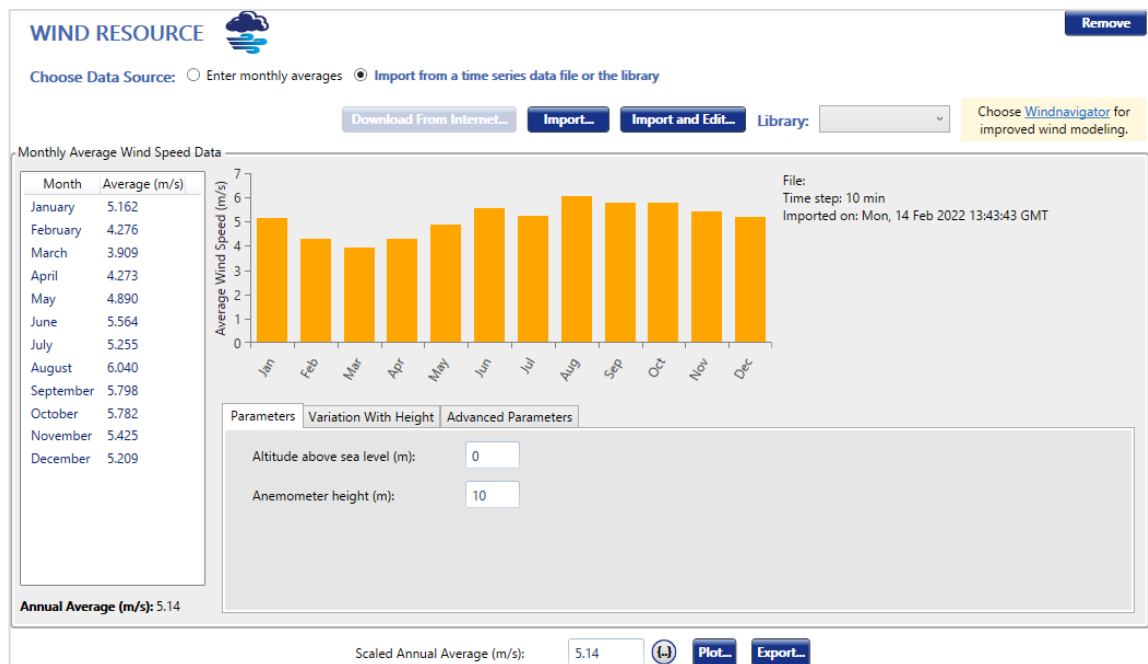


Fonte: A Autora (2022).

4.3.1 Modelagem dos Aerogeradores

A modelagem dos aerogeradores se deu a partir da característica do local do Complexo Eólico estudado. A partir disso, são necessários dados meteorológicos do local em que estão instaladas as torres anemométricas. Na Figura 15 está ilustrado o espaço de inserção de dados de vento, nas simulações utiliza-se um período de um ano. Para os demais parâmetros (tal como altitude acima do nível do mar e altura do anemômetro), foram considerados dados estimados coerentes com a aplicação real.

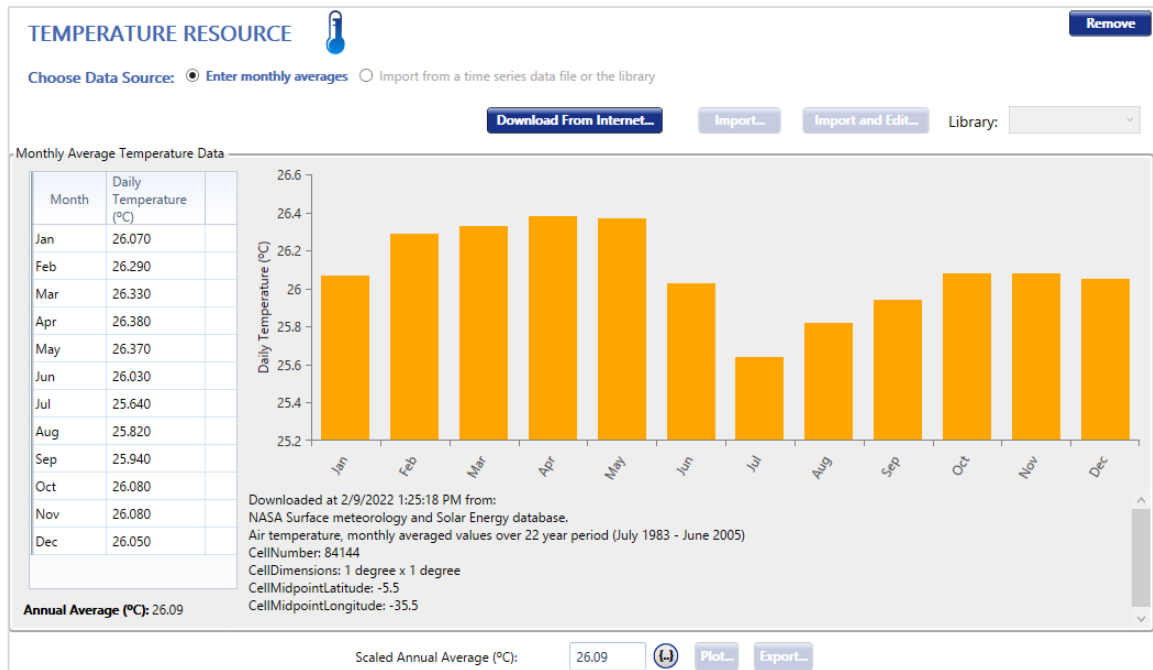
Figura 15 – Dados de Vento do Complexo Eólico.



Fonte: A Autora (2022).

Outro dado relevante para ser considerado na geração eólica, são os de temperatura do local, em que estes foram considerados a partir da base de dados da NASA [45]. Na Figura 16 está ilustrada a janela da ferramenta com dados no período de um ano.

Figura 16 - Dados de Temperatura do Complexo Eólico.



Fonte: A Autora (2022).

Na Figura 17, é mostrada a janela de modelagem da turbina eólica. Os parâmetros considerados foram: modelo da turbina eólica, quantidade de turbinas e altura da turbina, além de considerar os efeitos da temperatura ambiente. A seleção do modelo da turbina eólica foi realizada a partir dos dados do parque eólico que serviu de base para a construção deste trabalho. Os custos inseridos não terão impactos para os resultados da simulação.

Figura 17 – Modelagem do Parque Eólico.

WIND TURBINE

Name: Gamesa G114 2.1 MW Abbreviation: Aeroge: Remove Copy To Library

Properties

Name: **Gamesa G114 2.1 MW**
 Abbreviation: **Aerogeradores**
 Rated Capacity (kW): **2100.00**
 Manufacturer: **Gamesa**
[SAM Software Download](#)

Costs

Quantity	Capital (R\$)	Replacement (R\$)	O&M (R\$/year)
1	R\$14,938,875.00	R\$0.0	R\$298,777.50
Click here to add new item			

Multiplier: [] [] []

Site Specific Input

Lifetime (years): 15.00 [] Hub Height (m): 93.00 [] ☒ Consider ambient temperature effects?

Quantity Optimization

☒ HOMER Optimizer™
☒ Search Space

Quantity: 24

Electrical Bus: ☒ AC ☐ DC

Fonte: A Autora (2022).

Na Tabela 3, são descritos os parâmetros utilizados na simulação. A escolha da potência das turbinas foi realizada a partir dos dados disponibilizados pelo parque eólico.

Tabela 3 – Descrição dos Parâmetros para a Modelagem dos Aerogeradores.

Parâmetros	
Potência da Turbina Eólica	2,1 MW
Quantidade de turbinas	24 turbinas
Capacidade Instalada	50,4 MW
Tempo de vida da turbina	15 anos
Altura da turbina	93 metros

Fonte: A Autora (2022).

4.3.2 Modelagem do BESS

Por meio da Figura 18 é possível observar os parâmetros de representação e a janela para a modelagem do sistema de armazenamento por baterias, em que as suas propriedades estão descritas no canto esquerdo da figura. Em especificações de entrada do sistema, a capacidade nominal da *string* é definida em 1,29 MWh, assim como o estado inicial de carga (90%) e o

estado mínimo de carga (10%). Os custos inseridos não terão impactos para os resultados da simulação da operação, sendo utilizados apenas para análises de viabilidade econômica.

Figura 18 – Modelagem do BESS.

STORAGE Name: BESS 1000kW Abbreviation: BESS Remove Copy To Library

Properties
Idealized Battery Model
 Nominal Voltage (V): 717
 Nominal Capacity (kWh): 1.29E+03
 Nominal Capacity (Ah): 1.8E+03
 Roundtrip efficiency (%): 87.5
 Maximum Charge Rate (A/Ah): 180
 Maximum Charge Current (A): 200
 Maximum Discharge Current (A): 200
[Link to Data Sheet](#)
 The nominal capacity is: 1.29kWh.

Cost

Quantity	Capital (R\$)	Replacement (R\$)	O&M (R\$/year)
1	4,000,000.00	0.00	40,000.00

Lifetime
 time (years): 10.00
 throughput (kWh): 4,128,768.0

Sizing
☒ HOMER Optimizer™
☒ Search Space
 # 1

Site Specific Input
 String Size: 1
 Initial State of Charge (%): 90.00
 Minimum State of Charge (%): 10.00
☐ Minimum storage life (yrs): 5.00
[Maintenance Schedule...](#)

Generic homerenergy.com

Fonte: A Autora (2022).

Na Tabela 4, são descritos os parâmetros utilizados na simulação. A potência do sistema foi especificada de acordo com os dados disponibilizados do projeto. A profundidade de descarga, ou DoD (*Deep of Discharge*) é definida em 80%, já que se trata de uma bateria de lítio, uma vez que isso pode interferir na vida útil do sistema de armazenamento.

Tabela 4 – Descrição dos Parâmetros para a Modelagem do BESS.

Parâmetros	
Energia total fornecida	4.128.768,00 kWh (considerando 4000 ciclos)
Tamanho da <i>string</i>	1 <i>string</i> de 716,8 V
Estado inicial de carga	90%
Estado mínimo de carga	10%
DoD (Deep of Discharge)	80%

Fonte: A Autora (2022).

Outro componente do BESS, responsável pelo fornecimento/absorção de energia é o conversor de conexão (PCS) das *strings* de baterias (que operam em regime de corrente contínua - CC) ao barramento CA. Na Figura 19, mostra-se a janela de modelagem do equipamento no HOMER Pro. O equipamento é modelado como dois conversores de 500 kW, integralizando 1,0 MW de potência nominal. Na Tabela 5, são descritos os parâmetros utilizados na simulação. A escolha do PCS foi realizada a partir dos dados disponibilizados do projeto. Pelo que se pode observar, a eficiência do PCS é de 98,20%. Trata-se de um sistema que com eficiência de conversão considerada satisfatória, tendo pouca porcentagem de perdas. A operação do PCS também pode influenciar na vida útil do sistema de armazenamento, uma vez que ele é responsável por toda a conversão bidirecional de energia do sistema.

Figura 19 – Modelagem do Conversor.

The screenshot displays the 'Converter 500kW' configuration window in HOMER Pro. The interface includes a 'Properties' panel on the left with fields for Name, Abbreviation, and Notes. The main area contains a 'Costs' table, a 'Capacity Optimization' section with radio buttons for 'HOMER Optimizer™' and 'Search Space', and input fields for 'Inverter Input' and 'Rectifier Input'. The 'Inverter Input' section includes 'Lifetime (years)' set to 15.00 and 'Efficiency (%)' set to 98.20. The 'Rectifier Input' section includes 'Relative Capacity (%)' set to 100.00 and 'Efficiency (%)' set to 98.20. A checkbox 'Parallel with AC generator?' is checked. The 'Costs' table shows a single entry for 500 kW capacity with a capital cost of R\$1,160,000.00, no replacement cost, and an O&M cost of R\$11,600.00 per year.

Capacity (kW)	Capital (R\$)	Replacement (R\$)	O&M (R\$/year)
500	R\$1,160,000.00	R\$0.0	R\$11,600.00

Fonte: A Autora (2022).

Tabela 5 – Descrição dos Parâmetros para a Modelagem do Conversor - PCS

Parâmetros	
Capacidade Nominal	1000 kW
Tempo de vida	15 anos
Eficiência	98,20%

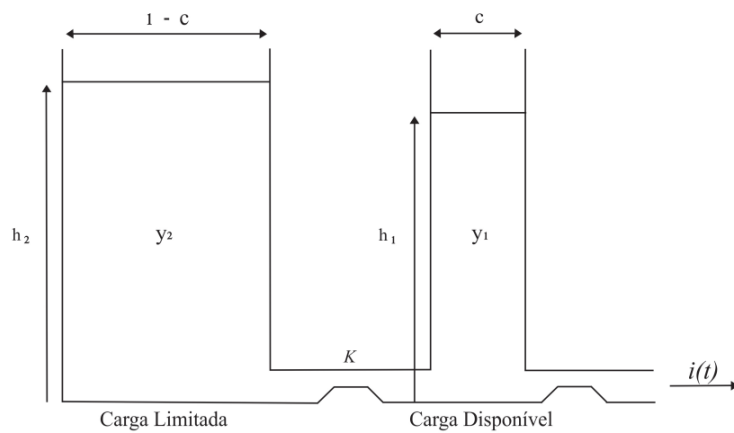
Fonte: A Autora (2022).

4.3.2.1 Modelo de Bateria KiBaM

Para a representação da dinâmica de carga e descargas das células das baterias o HOMER utiliza como base o Modelo de Bateria Cinética de Manwell e McGowan [46], mais conhecido como KiBaM (*Kinetic Battery Model*), que se consiste na caracterização do processo químico da bateria para aplicações em sistemas híbridos de energia. Este modelo, através de um processo cinético, determina a quantidade de energia que pode ser absorvida ou fornecida do banco de baterias a cada intervalo de tempo.

Segundo [47], o modelo de bateria cinética constitui-se de dois tanques, em que um contém a carga disponível, ou àquela disponível para a conversão de energia CC e o outro tanque que contém carga limitada, ou àquela que está quimicamente conectada, porém indisponível para o uso. A Figura 20 mostra o diagrama do modelo com os tanques mencionados, em que eles apresentam todas as dimensões diferentes. Observa-se que uma parcela c da capacidade total representa a carga disponível (y_1) e a outra parcela $1 - c$ representa a carga limitada (y_2). O processo químico se inicia com o tanque em que comporta a carga disponível, fornecendo elétrons para a carga $i(t)$, enquanto o tanque que comporta a carga limitada fornece elétrons ao tanque de carga disponível. O parâmetro k é o responsável pelo fluxo do tanque de carga limitada para o de carga disponível. Para fins de cálculo, considera-se que $i(t) = I$, ou seja, uma corrente constante.

Figura 20 – Diagrama do Modelo de Bateria KiBaM.



Fonte: [48].

As equações que representam o modelo são expressas por 10 e 11.

$$\frac{dy_1(t)}{dt} = -I - k(h_1(t) - h_2(t)) \quad (10)$$

$$\frac{dy_2(t)}{dt} = k(h_1(t) - h_2(t)) \quad (11)$$

As expressões de h_1 e h_2 , alturas dos tanques, são descritas pelas equações 12 e 13.

$$h_1(t) = \frac{y_1(t)}{c} \quad (12)$$

$$h_2(t) = \frac{y_2(t)}{1-c} \quad (13)$$

Para uma constante k' , tem-se a expressão 14.

$$k' = \frac{k}{c(1-c)} \quad (14)$$

Substituindo as expressões 12, 13 e 14 nas equações 10 e 11, tem-se as equações 15 e 16.

$$\frac{dy_1(t)}{dt} = -I - k'(1-c)y_1(t) + k'cy_2(t) \quad (15)$$

$$\frac{dy_2(t)}{dt} = k'(1-c)y_1(t) - k'c - y_2(t) \quad (16)$$

Aplicando-se a Transformada de Laplace em 15 e 16, chega-se às equações finais 17 e 18.

$$y_1(t) = y_1(0)e^{-k't} + \frac{(y_0k'c - I)(1 - e^{-k't})}{k'} - \frac{Ic(k't - 1 + e^{-k't})}{k'} \quad (17)$$

$$y_2(t) = y_2(0)e^{-k't} + y_0(1-c)(1 - e^{-k't}) - \frac{I(1-c)(k't - 1 + e^{-k't})}{k'} \quad (18)$$

Das expressões 17 e 18:

- $y_1(0)$ e $y_2(0)$ são a quantidade de carga disponível e limitada no instante em $t = 0$;
- $y_0 = y_1(0) + y_2(0)$ a quantidade de carga total no instante inicial;

- Os parâmetros k' , c e y_0 são considerados com base em dados experimentais.

A expressão que define a diferença das alturas é dada por 19.

$$\delta(t) = h_2(t) - h_1(t) = \frac{y_2(t)}{(1 - c)} - \frac{y_1(t)}{c} \quad (19)$$

O SoC (ou estado de carga da bateria) é zero quando $y_1 = 0$, ou seja, descarga completa. Assim, a carga limitada e, conseqüentemente indisponível é dada pela equação 20.

$$u(t) = (1 - c)\delta(t) \quad (20)$$

Onde

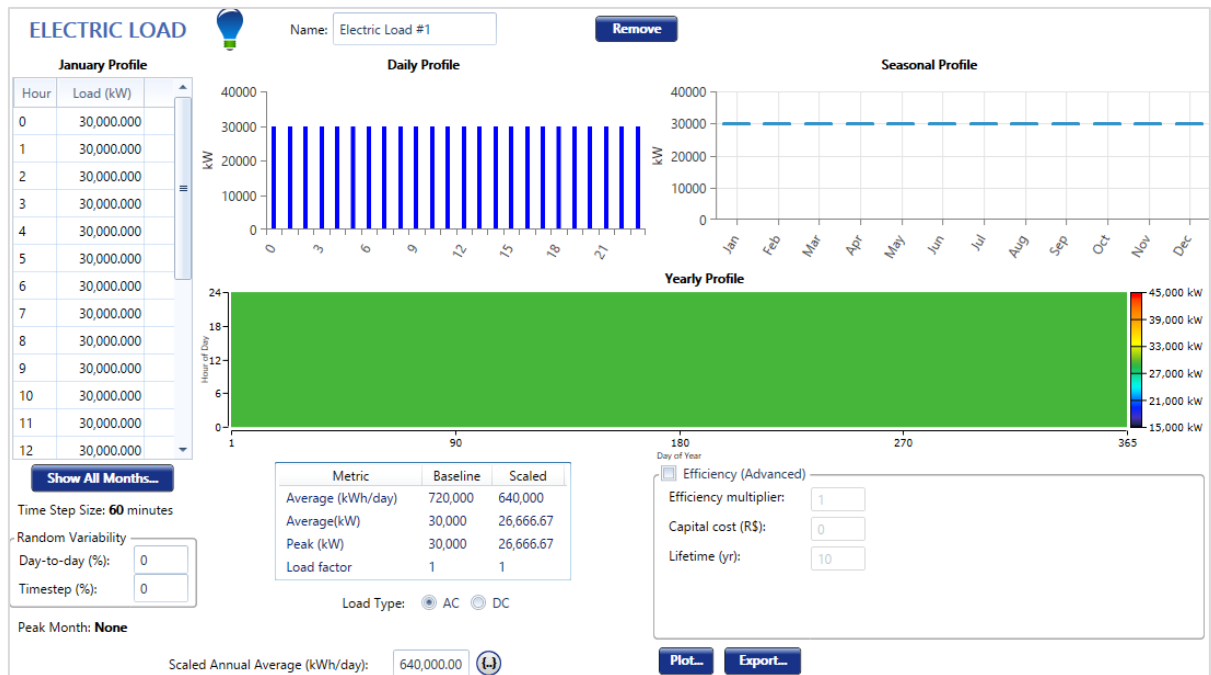
- $u(t)$ é a carga indisponível da bateria.

4.3.3 Modelagem da Rede

Neste tópico, descreve-se sobre a modelagem da rede no HOMER. Por ser uma ferramenta desenvolvida para análise de microrredes e sistemas híbridos de pequeno porte, uma das limitações da plataforma de simulação é a representação do sistema elétrico. Como neste estudo de caso o objetivo é emular o comportamento de uma central eólica e avaliar a suavização de potência, a interface com a rede foi modelada como se a rede se comportasse como uma carga constante (de modo não há contribuições de fluxos da rede para suavização no ponto de acoplamento).

Na Figura 21, mostra-se a rede modelada (como uma carga), ou seja, assegura-se um valor, no qual corresponde a um melhor uso da bateria, no período de um ano. Esses dados estão inseridos na tabela no canto esquerdo da Figura 21. Em um quadro no canto inferior, notam-se as métricas (média de energia por dia, média de potência, pico de potência e fator de carga) linha de base e a escala em que essas métricas são geradas a partir do valor inserido manualmente na coluna de dados. Recomenda-se que seja inserido os dados na escala de acordo com a linha de base, uma vez que é necessário avaliar os resultados e alterar conforme as curvas geradas, como também da curva do funcionamento da bateria.

Figura 21 – Modelagem da Rede.



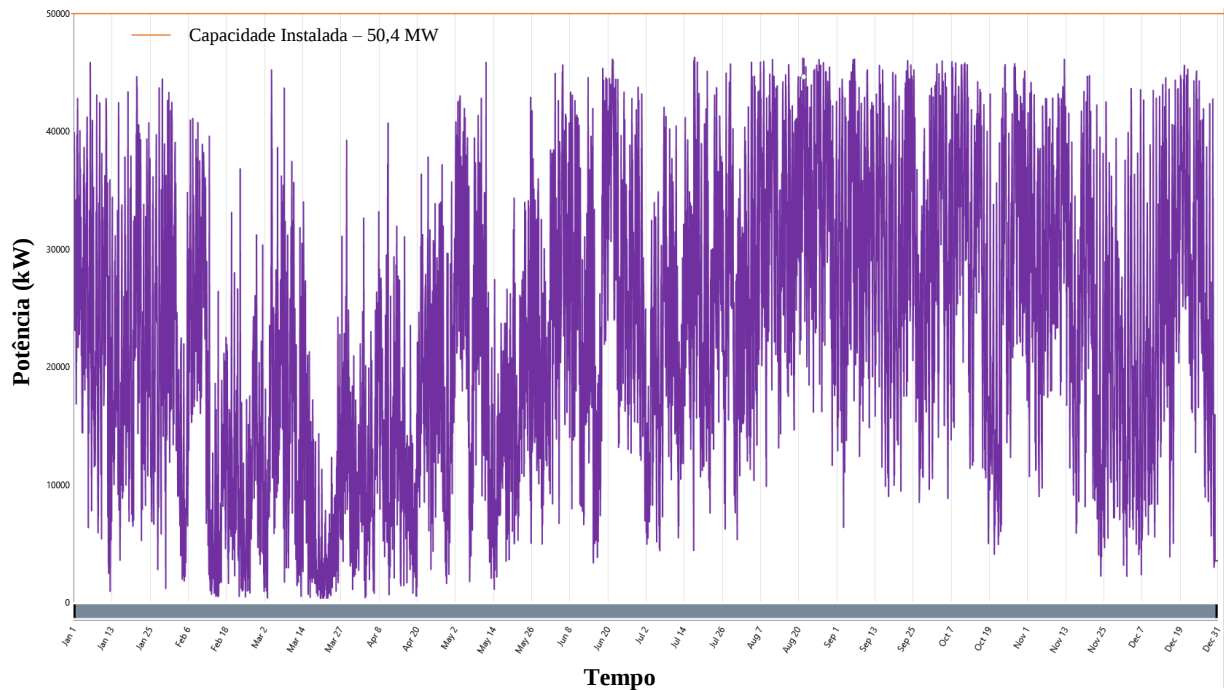
Fonte: A Autora (2022).

4.3.4 Resultados das Simulações – Funcionalidade de Arbitragem de Energia

Nesta seção, apresentam-se resultados da operação considerando a representação da usina eólica e BESS por meio de simulação. Foi utilizado como um período de simulação de um ano (365 dias). Como mencionado anteriormente, nos dados simulados, o índice MVP é tratado de maneira diferente no que diz respeito ao intervalo de tempo (15 minutos), porém o propósito se mantém, diferenciando-se somente na precisão do que se é observado no caso real (10 minutos).

A produção de potência da central de geração eólica simulada no intervalo de um ano, a partir do HOMER, é mostrada na Figura 22. Observa-se que a potência varia significativamente entre os intervalos. Nota-se que o período de maior produção (devido à sazonalidade) da geração eólica ocorre aproximadamente nos meses de junho a setembro.

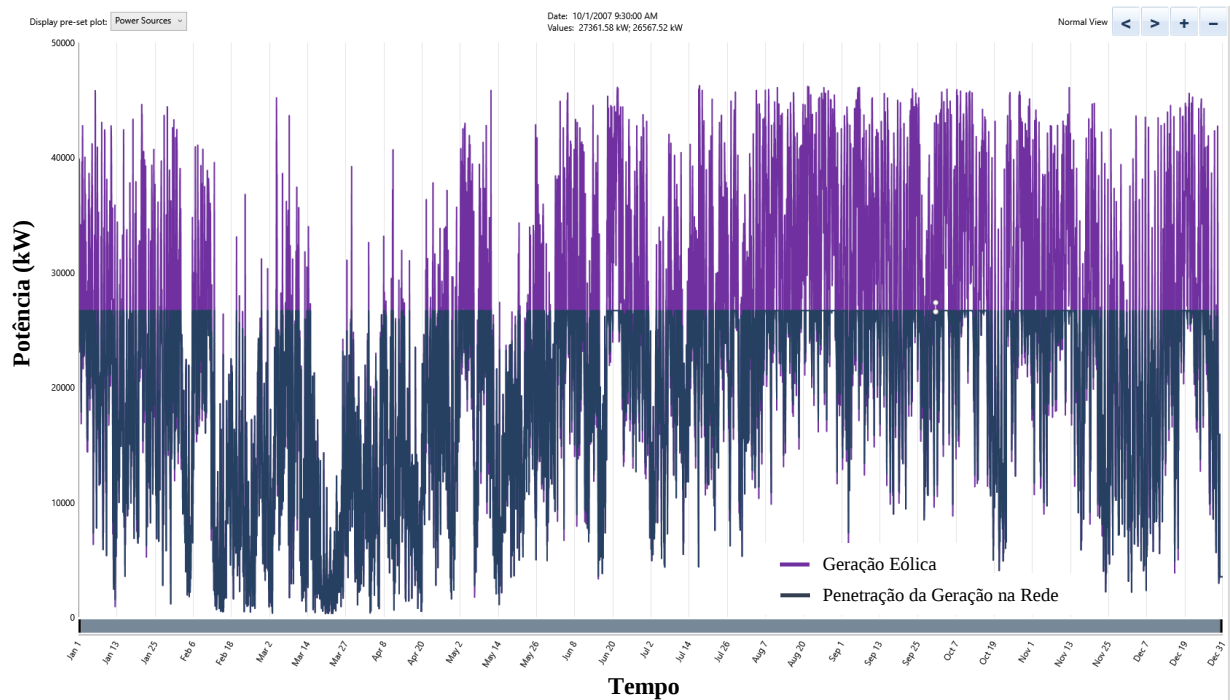
Figura 22 – Geração Eólica (Simulado).



Fonte: A Autora (2022).

Como descrito anteriormente, em relação à entrega de potência à rede, simulou-se uma carga constante, de modo que as análises de suavização não sejam influenciadas pelo perfil de carga. Na Figura 23, observa-se a entrega de potência à rede, tendo como fonte principal a geração eólica. Observa-se que a curva em azul escuro é a potência injetada na rede elétrica, limitando a potência instalada 52,91% ou seja, 26,67 MW. Como justificativa do valor da potência injetada, à medida que as simulações no HOMER Pro foram sendo executadas, sempre se observava o comportamento do BESS e como este conseguiria atuar, de forma satisfatória, na conexão com um parque modelado.

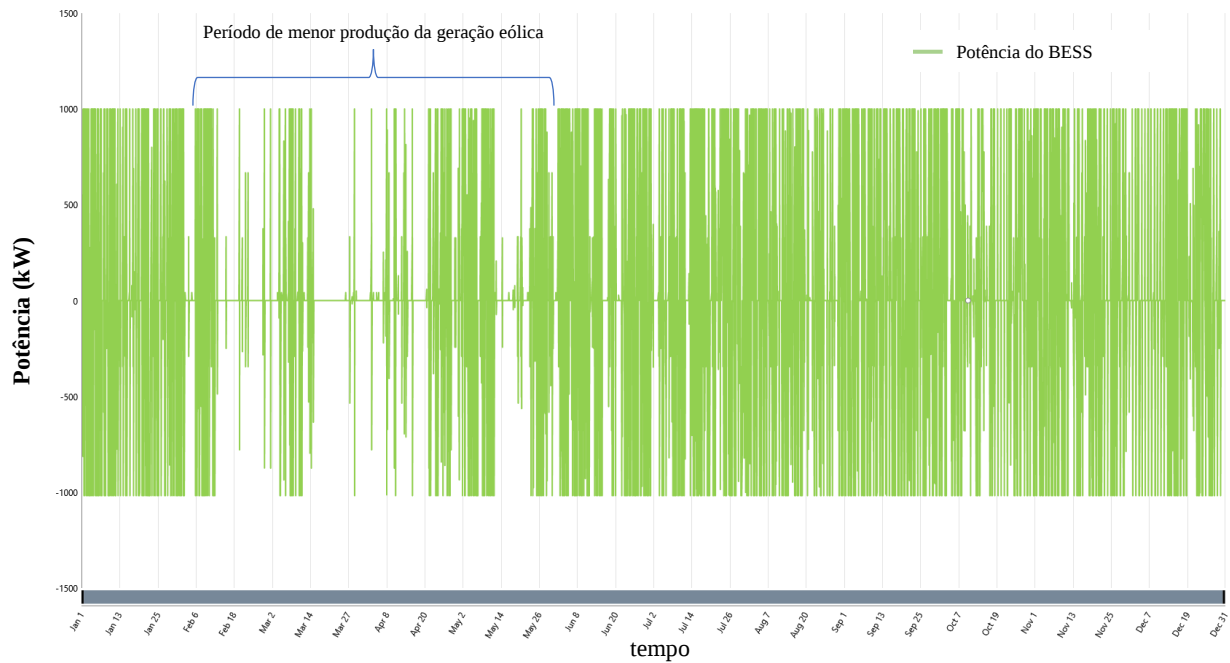
Figura 23 – Potência Injetada na Rede Elétrica (Simulado).



Fonte: A Autora (2022).

A Figura 24 apresenta a potência despachada pelo sistema de armazenamento (representando a curva de uso da bateria). Ressalta-se que o despacho da bateria visa auxiliar a central de geração eólica no suprimento de potência à rede/carga. Observa-se que há uma razoável utilização, porém nos momentos em que há uma menor geração, o BESS pode entrar em ociosidade (evita-se a recarga no sistema de armazenamento), uma vez que a produção do sistema de geração dos aerogeradores é destinada para a rede/carga.

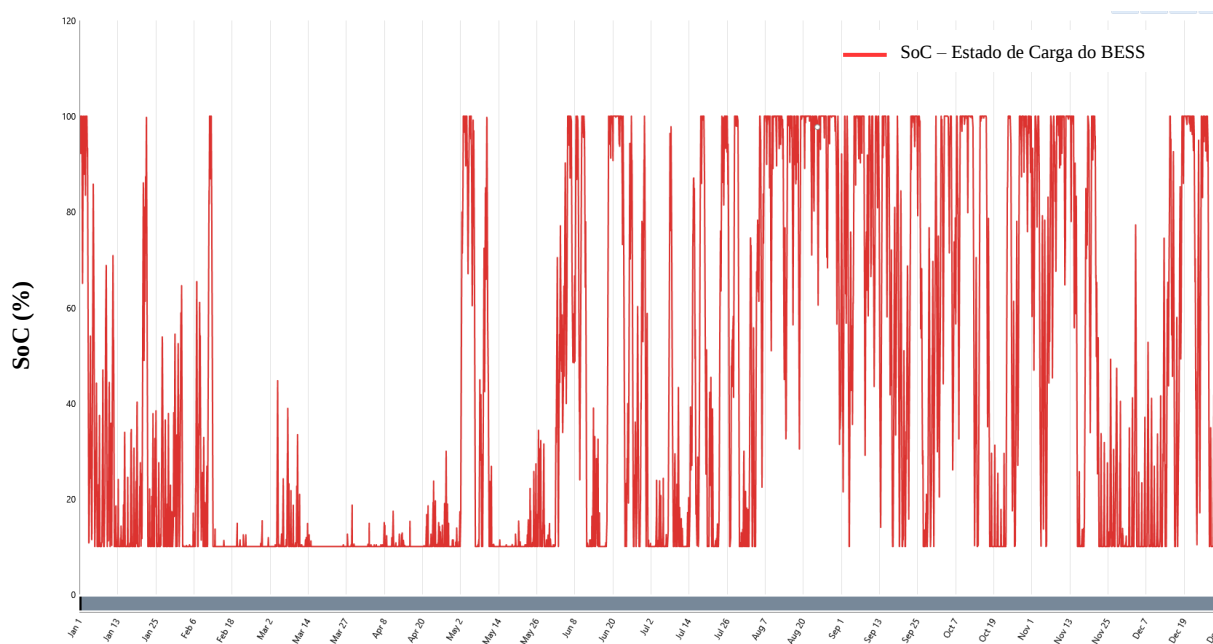
Figura 24 – Potência Ativa do BESS (Simulado).



Fonte: A Autora (2022).

Na Figura 24 observa-se o SoC da bateria, em que na parte do ano em que há maior geração, há também um maior uso da bateria, uma vez que a geração se torna maior, consequentemente, há um melhor uso da bateria. Contudo, observa-se que nos períodos em que há uma menor geração, pode ocorrer ociosidade, como descrito anteriormente.

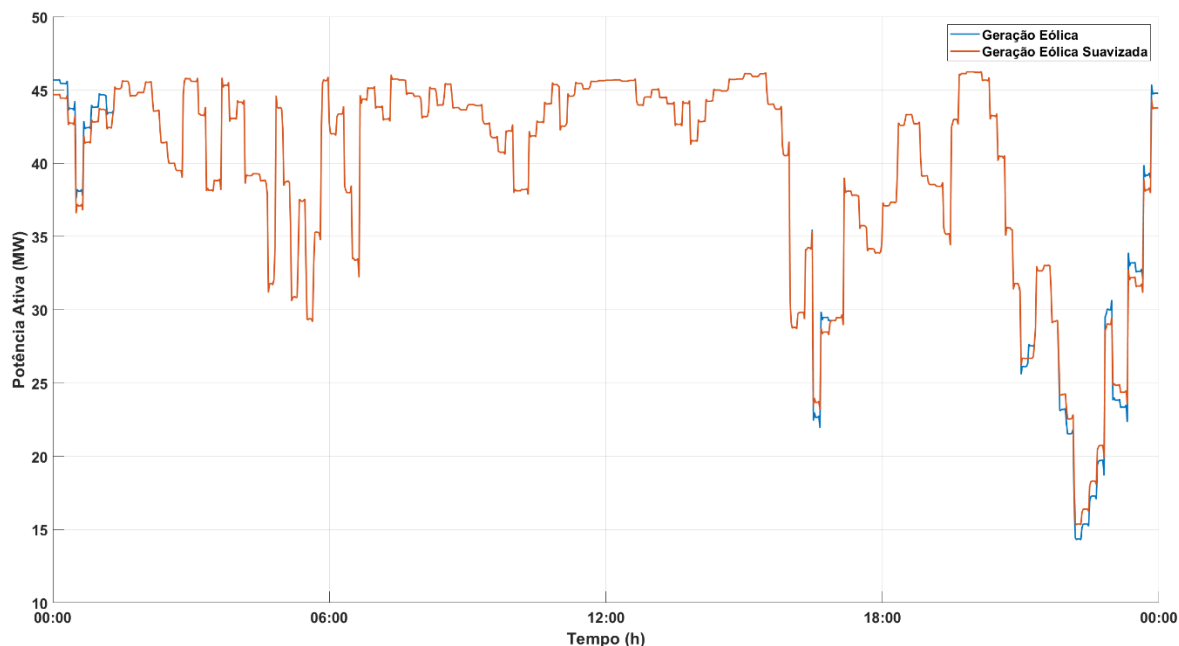
Figura 25 – SoC da Bateria (Simulado).



Fonte: A Autora (2022).

Na simulação, necessitou-se tratar os dados para analisar os índices com e sem o sistema de armazenamento. É importante ressaltar que a simulação contou com a aplicação de arbitragem de energia (estratégia utilizada para despacho do BESS visando maximizar o uso diário), porém observa-se que essa aplicação, automaticamente, traz ganhos no que se refere à funcionalidade em análise, que é a suavização de potência. Como se pode observar da Figura 26, o efeito da suavização é nítido principalmente na parte do final da tarde até à noite, em que há uma maior variabilidade do vento, acarretando a maior operação do BESS. Observa-se que nos horários de menor produção da geração eólica, a geração eólica suavizada (potência dos aerogeradores mais despacho do BESS) é incrementada. Por outro lado, nos picos de produção da fonte eólica, a potência eólica suavizada é reduzida. Em função da proporção de potência do BESS em relação a capacidade da central de geração eólica (1 MW de BESS *versus* 50,4 MW de geração eólica), as diferenças de potência líquida no caso com e sem o BESS são relativamente pequenas. Entretanto, o efeito de suavização é obtido.

Figura 26 – Potência Ativa Suavizada e Potência da Geração Eólica (Simulado).



Fonte: A Autora (2022).

De maneira quantitativa, a Tabela 6 mostra os resultados numéricos do índice de MVP no intervalo de 15 minutos. É observado que o ganho de suavização pode ser de até 4%. Nota-se que, em cada intervalo, há uma compensação em um dos valores da potência (na potência mínima ou na máxima do período), ou até mesmo em ambos, contribuindo para a redução da amplitude da variação da curva da geração.

Tabela 6 – Melhores Resultados (Simulação).

Intervalo de Tempo	SEM BESS		COM BESS		Ganho
	Máximo Valor de Potência (MW)	Mínimo Valor de Potência (MW)	Máximo Valor de Potência (MW)	Mínimo Valor de Potência (MW)	
16:30 às 16:45	29,47	22,66	28,47	23,68	4,00%
21:00 às 21:15	27,54	26,12	26,68	26,68	2,80%
21:45 às 22:00	29,20	23,20	29,20	24,22	2,02%
22:45 às 23:00	30,02	19,71	29,02	20,72	4,00%
23:15 às 23:29	33,20	23,35	32,20	24,37	4,00%

Fonte: A Autora (2022).

Em termos teóricos, o efeito de suavização e redução da variabilidade obtido pode ser comparado as máquinas girantes de usinas hidroelétricas. Entretanto, tem-se aqui neste estudo de caso um serviço ancilar sendo realizado pela bateria, automaticamente. Ou seja, mesmo a aplicação do BESS no modo de arbitragem de energia contribui para a suavização de potência das usinas eólicas.

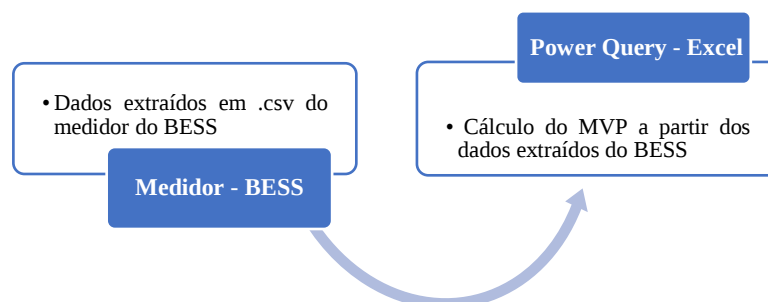
Um dos desafios verificados é a representação coerente de todos os componentes, principalmente do BESS (modos de operação e estratégias de despacho) nos estudos de análise de impacto. Neste sentido, uma das estratégias para avaliar a eficácia da suavização de potência é medir as potências em um sistema real. Nesse sentido, finalmente, no próximo tópico serão apresentados os dados de medição da operação do BESS no PAC do empreendimento em Campos do Ventos.

4.4 Dados Reais – Parque Eólico

Neste tópico são analisados os resultados reais da aplicação da suavização de potência, considerando as curvas características da geração eólica, assim como a atuação do BESS observando o comportamento de ambas as curvas. Para o sistema aqui analisado, os parâmetros de interesse medidos foram a potência ativa da geração eólica e a potência ativa do BESS.

No esquemático da Figura 27 é indicado o passo realizado para o que os dados fossem coletados e, posteriormente, efetuam-se os cálculos do índice a partir dos parâmetros de geração e BESS. O sistema de armazenamento de 1 MW/1,29 MWh está conectado em paralelo a um grupo de aerogeradores que fornecem uma potência de, aproximadamente, 50,4 MW.

Figura 27 – Fluxograma do Tratamento de Dados Reais.



Fonte: A Autora (2022).

4.4.1 Resultados Reais – Funcionalidade de Suavização de Potência

Neste tópico serão apresentados os resultados numéricos, com as respectivas curvas de potência da geração eólica, bem como a curva suavizada, ou seja, com a atuação do BESS.

Na Figura 28, observa-se que a atuação do BESS ocorre a partir da variação da potência ativa da geração eólica. A convenção utilizada na lógica do EMS foi a seguinte: sinal negativo – fornecimento, sinal positivo – absorção. No momento em que a geração eólica tem uma diminuição na potência, em que seja maior, em módulo, que 500 kW no intervalo de 60 segundos, o BESS, quase instantaneamente, atua no fornecimento de potência ativa. Da mesma maneira, observa-se esse comportamento quando há um aumento de potência na geração eólica, dentro da margem mencionada anteriormente, ou seja, o BESS atua na absorção de potência ativa. A curva apresentada é relativa a medições em um dia no mês de julho no ano de 2021.

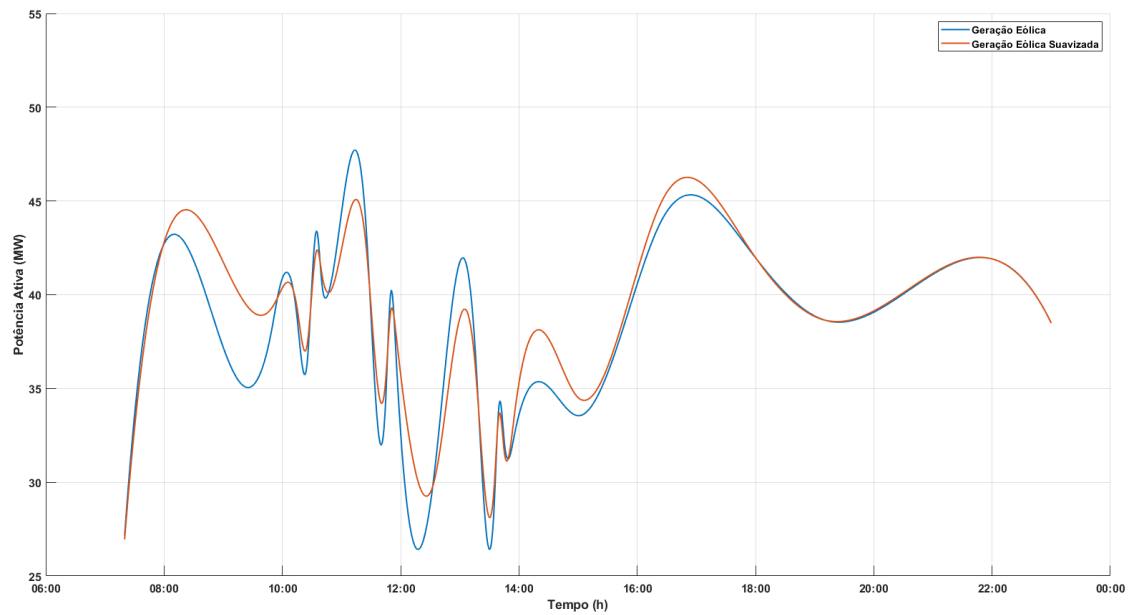
Figura 28 – Operação do BESS a partir da Variação de Potência Ativa da Geração Eólica (1º Dia).



Fonte: A Autora (2022).

Na Figura 29, observa-se a curva suavizada em contraste com a curva da geração eólica, esse gráfico exibe os melhores resultados em um dia. Nota-se que a curva em laranja (suavizada) tem menores picos e vales. Considerando que a potência do sistema de armazenamento é muito menor que a potência total gerada em que se está conectado, o efeito de suavização é efetivo.

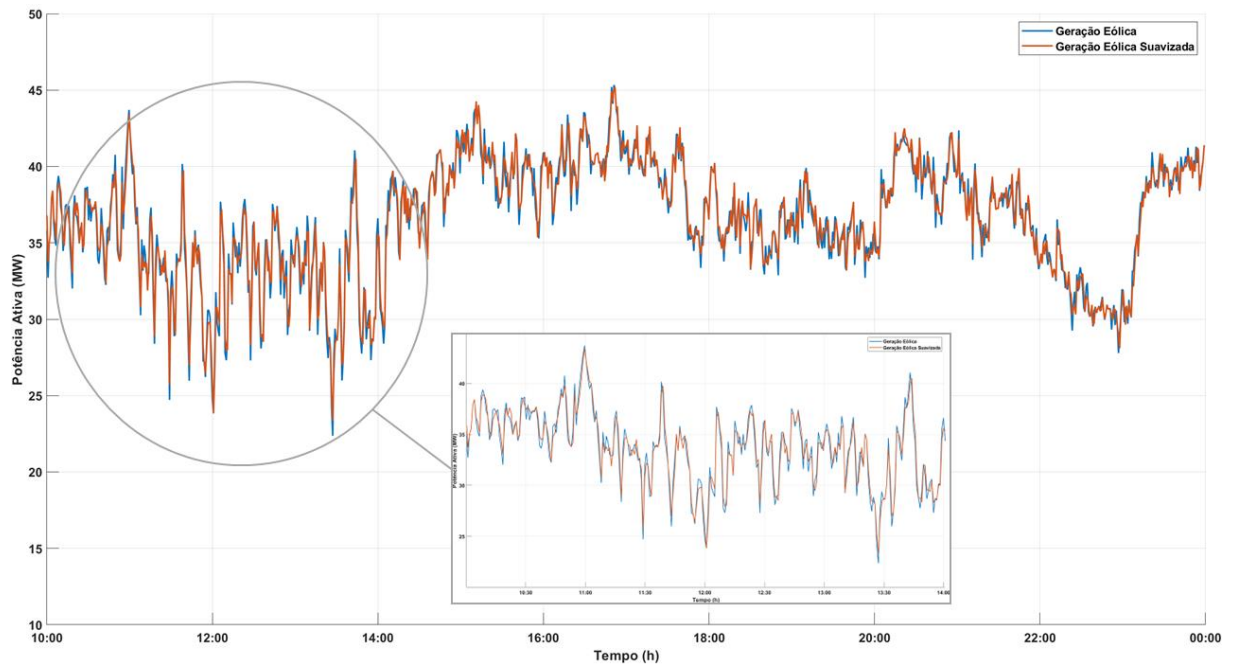
Figura 29 – Potência Ativa Suavizada e Potência da Geração Eólica (2º Dia).



Fonte: A Autora (2022).

Para uma análise mais detalhada, a Figura 30 mostra um *zoom* de um trecho das curvas de um dia. Nota-se que a curva em laranja é a curva suavizada, ou seja, com a atuação do BESS, enquanto a curva azul é a curva da geração eólica.

Figura 30 – Potência Ativa Suavizada e Potência da Geração Eólica (3º Dia).



Fonte: A Autora (2022).

De maneira quantitativa, a Tabela 7 e Tabela 8 apresenta os resultados numéricos do índice de MVP no intervalo de 5 minutos. É observado que os ganhos de suavização chegam em, aproximadamente, 4%. Nota-se que em cada intervalo há uma compensação em um dos valores da potência, ou até mesmo em ambos, reduzindo a variabilidade da geração resultante.

Tabela 7 – Melhores Resultados (2º Dia).

Intervalo de Tempo	SEM BESS		COM BESS		Ganho
	Máximo Valor de Potência (MW)	Mínimo Valor de Potência (MW)	Máximo Valor de Potência (MW)	Mínimo Valor de Potência (MW)	
07:35 às 07:40	39,29	32,00	38,29	32,83	3,63%
09:45 às 09:50	43,71	37,62	43,52	38,62	2,37%
10:20 às 10:25	42,66	35,72	42,13	36,72	3,05%
11:20 às 11:25	43,86	35,99	42,86	36,99	3,97%
11:40 às 11:45	42,35	34,19	41,53	35,19	3,62%
11:45 às 11:50	43,62	34,45	42,89	35,45	3,43%
12:30 às 12:35	33,72	26,67	32,72	26,76	2,16%
13:10 às 13:15	38,37	22,70	37,37	23,70	3,97%
13:30 às 13:35	40,03	28,84	39,53	29,84	2,97%
13:40 às 13:45	34,25	25,39	33,72	26,39	3,03%
17:45 às 17:50	46,05	41,87	45,69	42,56	2,09%

Fonte: A Autora (2022).

Tabela 8 – Melhores Resultados (3º Dia).

Intervalo de Tempo	SEM BESS		COM BESS		Ganho
	Máximo Valor de Potência (MW)	Mínimo Valor de Potência (MW)	Máximo Valor de Potência (MW)	Mínimo Valor de Potência (MW)	
12:00 às 12:05	34,29	22,00	33,29	23,00	3,97%
12:05 às 12:10	39,43	26,87	39,43	27,87	3,97%
12:25 às 12:30	38,09	26,73	37,09	27,73	3,97%
13:25 às 13:30	31,22	21,76	30,46	22,76	3,49%
13:30 às 13:35	35,22	25,84	34,22	26,40	3,09%
13:55 às 14:00	36,81	25,64	35,81	26,20	3,09%
14:00 às 14:05	37,23	26,87	36,51	27,87	3,41%
15:30 às 15:35	42,31	36,86	41,64	37,86	3,31%
16:15 às 16:20	44,44	36,84	43,71	37,84	3,44%
19:25 às 19:30	37,72	32,07	36,72	32,72	3,28%
20:40 às 20:45	41,95	35,86	40,95	36,75	3,75%

Fonte: A Autora (2022).

Este capítulo apresentou os resultados de suavização de potência estimada por meio do índice MVP, considerando um sistema simulado e os dados de medição real. Observou-se que

o emprego de um BESS pode ser uma estratégia eficaz para redução da variabilidade de fontes de geração. O próximo capítulo apresenta as conclusões do trabalho.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como principal objetivo analisar a aplicação do sistema de armazenamento por baterias em uma Central Eólica. A aplicação de Suavização de Potência foi observada em uma central de geração real com um BESS instalado em paralelo a um grupo de aerogeradores. Adicionalmente, também foi avaliada a funcionalidade de redução de variabilidade de geração por meio de simulação, utilizando a ferramenta de software HOMER Pro.

Através do estudo de caso relatado neste trabalho para a aplicação do BESS, Suavização de Potência, observou-se que, considerando a análise utilizando os índices MVP de antes e depois da inserção do sistema, os ganhos de suavização são consideráveis. Ressalta-se que a análise utiliza um Sistema de Armazenamento de escala reduzida, quando comparado ao sistema eólico conectado. Desta forma, a redução de variabilidade de cerca de 4% pode ser considerada um percentual satisfatório. A avaliação desses dados reais foi possibilitada a partir do consentimento do proprietário do empreendimento.

O estudo, através da simulação, analisou o cenário existente, no qual necessitou-se inserir dados de alguns parâmetros do parque no HOMER Pro. Diante disso, analisou-se o comportamento da bateria para um melhor funcionamento, avaliando-se esta aliada a uma maior vida útil, observando o quanto se tem de ociosidade, como também de um funcionamento exaustivo. Na perspectiva de simulação, a ferramenta detém de uma única aplicação para análise, que é a de arbitragem de energia. Porém, no tratamento de dados com o uso do índice MVP, observou-se que a Suavização de Potência é realizada de maneira intrínseca por parte do BESS.

Ainda se tratando da aplicação de arbitragem de energia, é possível compreender que o uso dessa funcionalidade em aplicações atrás do medidor, ou seja, associado a uma unidade geradora, pode ser além de um serviço remunerado, uma solução para garantir o funcionamento do sistema elétrico com um determinado grau de qualidade, segurança e confiabilidade. Em outras palavras, o BESS pode fornecer serviços ancilares ao sistema elétrico, tal qual como aqueles prestados pelas usinas hidrelétricas.

Aplicações do BESS são consideradas viáveis, do ponto de vista técnico, para lidar com a variabilidade e, por consequência, com desafios que podem ser encontrados quando se depara com a instabilidade da rede na integração com a energia eólica. A tecnologia é relevante para

atender, parcialmente, as necessidades de ampliação de capacidade de potência, sendo uma alternativa nos próximos anos, mais ainda quando se pode atrelar outros serviços adicionais, podendo ter algum serviço de remuneração associado. Junto a isso, os atributos nesse atendimento é, predominantemente, devido à alta capacidade de resposta rápida e automática, que podem prover a chamada inércia sintética ao sistema.

5.1 Propostas de Continuidade

Este trabalho se limitou a comparar a aplicação de Suavização de Potência do BESS em geração eólica, em que observa que, de maneira técnica, se viabiliza seu uso para essa aplicação, exibindo um considerável índice de ganho percentual. Por outro lado, a análise se tornou limitada do ponto de vista da simulação, uma vez que a escala de tempo mínima foi de 1 minuto. Assim, uma sugestão para corrigir essa limitação seria a implementação de uma ferramenta que atingisse uma escala de tempo menor.

Uma outra possibilidade de trabalho futuro seria a estratégia de viabilidade para a suavização de potência, como falado durante todo o trabalho, de que essa aplicação seja atrelada a outra que remunere e viabilize a solução para diferentes tipos de implantação. Ainda a respeito à viabilidade, outra proposta de estudo seria o técnico-financeiro para dimensionar um BESS para qualquer tipo de empreendimento, seja Geração, Transmissão ou Distribuição, explorando a aplicação para outras funcionalidades (como serviço ancilar).

Com respeito ao uso da bateria, propõe-se um estudo sobre o modo de utilização, avaliando o impacto na vida útil da bateria a partir de métodos e estratégias de gerenciamento da operação do BESS.

5.2 Publicações

Em decorrência deste trabalho, houve a participação da publicação do artigo:

- 1) Título: *Impact Analysis of a Battery Energy Storage System Connected in Parallel to a Wind Farm*

Autores: Nicolau K. L. Dantas, Amanda C. M. Souza, Andrea S. M. Vasconcelos, Washington de A. S. Junior, Guilherme Rissi, Celso Dall’Orto, Alexandre M. A. Maciel, José F. C. Castro, Yang Liu e Pedro Rosas

Editora: MDPI

Publicado em: *Advances in Renewable Energy and Energy Storage*, 23 de junho de 2022

DOI: <https://doi.org/10.3390/en15134586>

REFERÊNCIAS

1. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Nacional de Energia - PNE 2050**. EPE. Brasília, p. 243. 2020.
2. OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. Dados da Geração Eólica, 2022. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/boletim-geracao-eolica.aspx>>. Acesso em: 02 Novembro 2022.
3. ABEEÓLICA. **InfoVento**. ABEEólica. [S.l.], p. 2. 2022.
4. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Sistemas de Armazenamento em Baterias - Aplicações e Questões Relevantes para o Planejamento**. EPE. Brasília. 2019.
5. BLOOMBERGNEF. Sobre a empresa: BloombergNEF. **BloombergNEF**, 2019. Disponível em: <<https://about.bnef.com/blog/energy-storage-investments-boom-battery-costs-halve-next-decade/>>. Acesso em: Setembro 2022.
6. IRENA. **Utility-Scale Batteries - Innovation Landscape Brief**. IRENA. Abu Dhabi, p. 24. 2019.
7. ROCKY MOUNTAIN INSTITUTE - RMI. **Need for Advanced Chemistry Cell Energy Storage in India**. RMI Índia. [S.l.], p. 63. 2022.
8. KHALID, M.; SAVKIN, A. V. Minimization and control of battery energy storage for wind power smoothing: Aggregated, distributed and semi-distributed storage. **Renewable Energy**, 2013. 105-112.
9. GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL. **Global Wind Report 2022**. GWEC. [S.l.], p. 158. 2022.
10. ABEEÓLICA. Sobre a empresa: ABEEólica. **ABEEólica**, 2022. Disponível em: <<https://abeeolica.org.br/>>. Acesso em: Setembro 2022.
11. ABEEÓLICA. **Boletim Anual**. ABEEólica. [S.l.], p. 20. 2020.
12. OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Plano da Operação Energética (2019 - 2023)**. ONS. [S.l.], p. 36. 2019.
13. OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Plano da Operação Energética**. ONS. [S.l.], 2022.
14. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Sobre a empresa ANEEL. **ANEEL - GOV**, 2022. Disponível em: <<https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2022/brasil-termina-2021-com-maior-acrescimento-em-potencia-instalada-desde-2016>>. Acesso em: Agosto 2022.
15. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. POWER BI da ANEEL. **ANEEL**, 2022. Disponível em: <<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrljoiNjc4OGYyYjQtYWZC00YjllLWJlYmEt>>

YzdkNTQ1MTc1NjM2IiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBlMSIsImMiOjR9>. Acesso em: Agosto 2022.

16. ROSAS, P. A. C. **Dynamic Influences of Wind Power on The Power System**. Technical University of Denmark. Denmark, p. 154. 1998.
17. ACKERMANN, T. In: ACKERMANN, T. **Wind Power in Power Systems**. 2^a. ed. [S.l.]: Wiley, 2012. p. 1019.
18. BURTON, T. et al. In: TONY BURTON, N. J. D. S. E. B. **Wind Energy Handbook**. 2^a. ed. [S.l.]: [s.n.], 2011. p. 742.
19. MIR HADI ATHARI, Z. W. Impacts of Wind Power Uncertainty on Grid Vulnerability to Cascading Overload Failures, 2016. 10.
20. RODRIGUES, P. R. In: RODRIGUES, P. R. **Energias Renováveis - Energia Eólica**. [S.l.]: [s.n.], 2011. p. 51.
21. NEOENERGIA. **NEOENERGIA**. Disponível em: <<https://www.neoenergia.com/pt-br/te-interessa/meio-ambiente/Paginas/como-funciona-um-aerogerador.aspx#:~:text=No%20funcionamento%20de%20um%20aerogerador,mec%C3%A2nica%20recebida%20em%20energia%20el%C3%A9trica.>>. Acesso em: Setembro 2022.
22. DANTAS, N. K. L. et al. Impact Analysis of a Battery Energy Storage System Connected in Parallel to a Wind Farm. **Energies**, 23 Junho 2022. 16.
23. RAMPINELLI, G. A.; JUNIOR, C. G. D. R. Análise da Geração Eólica na Matriz Brasileira de Energia Elétrica, Criciúma, 2013. 30.
24. CHEN, H. et al. Progress in electrical energy storage system: A critical review. **Progress in Natural Science**, Março 2009.
25. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Decenal de Energia**. EPE. Brasília, p. 393. 2020.
26. LONE LIGHT HOUSE. Sobre a Empresa: Lone Light House. **Lone Light House**, 2022. Disponível em: <<https://www.lonelighthouse.es/energia-inteligente/>>. Acesso em: Outubro 2022.
27. HU, X. et al. Technological developments in batteries. **IEEE Power & Energy Magazine**, 2017. 20-31.
28. WAKIHARA, M. Recent development in lithium ion batteries. **Materials science and engineering**, 2001. 109-134.
29. ZAGHIB, K. et al. Safe and fast-charging Li-Ion battery with long shelf life for power applications. **Journal of Power Source**, 2011. 3949-3954.
30. SABIHUDDIN, S.; KIPRAKIS, A. E.; MUELLER, M. A Numerical and graphical review of energy storage technologies. **Energies**, 2015. 172-216.
31. DÍAZ-GONZÁLEZ, F. et al. A review of energy storage technologies for wind power applications. **Renewable and sustainable energy reviews**, 2012. 2154-2171.

32. BAZARGAN, D. A Study of Battery Energy Storage Dynamics in Power Systems, 2014.
33. PINHEIRO, A. L. et al. A Review and Comparison of Smoothing Methods for Solar Photovoltaic Power Fluctuation Using Battery Energy Storage Systems. **IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference - Latin America**, 2021.
34. KHOO, M.; WONG, V. A Double Moving Average Control Chart. **Communications in Statistics - Simulation and Computation**, vol. 37, no. 8, 2008. 1696-1708.
35. HUNTER, J. The Exponentially Weighted. **Journal of Quality Technology**, vol. 18, no. 4, Outubro 1986.
36. JUSTUSSON, B. Median Filtering: Statistical Properties. **Topics in Applied Physics**, 2008. 161-196.
37. MARTINS, J. et al. Comparative Study of Ramp-Rate Control Algorithms for PV with Energy Storage Systems. **Energies**, vol. 12, no. 7, 2019. 1342.
38. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Flexibilidade e Capacidade: Conceitos para a incorporação de atributos ao planejamento**. EPE. Rio de Janeiro, p. 23. 2018.
39. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Sistema de Informações Geográfica do Setor Energético Brasileiro. **EPE**, 2022. Disponível em: <<https://gisepeprd2.epe.gov.br/WebMapEPE/>>. Acesso em: Outubro 2022.
40. SILVA, P. L. T. D. **Sistema de Armazenamento de Energia Utilizando Bateria com Aplicação Para Suavização de Potência**. Universidade Federal de Pernambuco. Recife, p. 102. 2018.
41. JIANG, Q.; HONG, H. W. Based Capacity Configuration and Coordinated Control of Hybrid Energy Storage System for Smoothing Out Wind Power Fluctuations, 2012. 9.
42. JANNATI, M. et al. A survey on energy storage resources configurations in order to propose an optimum configuration for smoothing fluctuations of future large wind power plants, 2014.
43. LAMBERT, T.; GILMAN, P.; LILIENTHAL, P. **Micropower system modeling with HOMER: Integration of Alternative Sources of Energy**. [S.l.]: John Wiley & Sons, Inc, 2006.
44. HOMER. **HOMER Pro**, 2020. Disponível em: <<https://www.homerenergy.com/products/pro/docs/latest/index.html>>. Acesso em: 2022.
45. NASA. Global horizontal radiation, monthly average values over 22 year period (July 1983- June 2005). **NASA**, 2015. Disponível em: <<https://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>>. Acesso em: 2022.
46. MANWELL, J. F.; MCGOWAN, J. G. Lead acid battery storage model for hybrid energy systems. **Sol. Energy**, vol. 50, 1993. 333-341.

47. COSTA, T. S. **Estudo e simulação de sistemas fotovoltaicos híbridos para aplicação autônoma e conectada à rede**. Unicamp. Campinas, p. 132. 2019.
48. FREITAS, D. J. B. et al. **Validação do Modelo KiBaM para Predição do Tempo de Vida de Baterias Utilizadas em Dispositivos Móveis**. Gramado, p. 7. 2016.