



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

PEDRO IVO ALBUQUERQUE DE ARAUJO E SILVA

***BESS COMO SOLUÇÃO PARA RESTRIÇÕES DE OPERAÇÃO POR
CURTAILMENT PARA CENTRAIS GERADORAS FOTOVOLTAICAS NO SERTÃO
DE PERNAMBUCO***

Recife

2025

PEDRO IVO ALBUQUERQUE DE ARAUJO E SILVA

***BESS COMO SOLUÇÃO PARA RESTRIÇÕES DE OPERAÇÃO POR
CURTAILMENT PARA CENTRAIS GERADORAS FOTOVOLTAICAS NO SERTÃO
DE PERNAMBUCO***

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Departamento de Engenharia
Elétrica da Universidade Federal de
Pernambuco, como requisito parcial para
obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Orientador(a): Prof. DSc. Ronaldo Ribeiro Barbosa Aquino

Coorientador: MSc. Antonio Gustavo Evangelista Muniz Santos

Recife

2025

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

Silva, Pedro Ivo Albuquerque de Araujo e.

BESS como solução para restrições de operação por curtailment para centrais geradoras fotovoltaicas no sertão de Pernambuco / Pedro Ivo Albuquerque de Araujo e Silva. - Recife, 2025.

72

Orientador(a): Ronaldo Ribeiro Barbosa Aquino

Coorientador(a): Antonio Gustavo Evangelista Muniz Santos

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Elétrica - Bacharelado, 2025.

1. Curtailment. 2. sistema fotovoltaico. 3. sistema de armazenamento por bateria 4. geração. 5. mercado livre de energia. 6. transmissão de energia. I. Aquino, Ronaldo Ribeiro Barbosa . (Orientação). II. Santos, Antonio Gustavo Evangelista Muniz . (Coorientação). IV. Título.

620 CDD (22.ed.)

PEDRO IVO ALBUQUERQUE DE ARAUJO E SILVA

**BESS COMO SOLUÇÃO PARA RESTRIÇÕES DE OPERAÇÃO POR
CURTAILMENT PARA CENTRAIS GERADORAS FOTOVOLTAICAS NO SERTÃO
DE PERNAMBUCO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Departamento de Engenharia
Elétrica da Universidade Federal de
Pernambuco, como requisito parcial para
obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Aprovado em:10/04/2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Ronaldo Ribeiro Barbosa Aquino (Orientador)

Universidade Federal de Pernambuco

Eng. M.Sc. Antonio Gustavo Evangelista Muniz Santo (Coorientador)

Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Márcio Rodrigo Santos de Carvalho (Examinador Interno)

Universidade Federal de Pernambuco

Eng. M.Sc. Néstor Iván Medina Giraldo (Examinador externo)

Universidade Federal de Pernambuco

“A mão de Deus abençoa
Tudo quanto o homem faz,
Sabendo que ele é capaz
De ter atitude boa.
Até os erros, perdoa,
Lhe conduzindo para trilha.
Por isso meu mundo brilha,
Eu sei do lugar que venho.
Toda vitória que tenho
Dedico a minha família.”

Marquinhos da Serrinha

Aos meus pais, João Bosco e Irivanize.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela vida e pelas oportunidades que Ele colocou em meu caminho. Agradeço aos meus amados pais, João Bosco e Irivanize, que tanto fizeram e fazem por mim e por minha irmã. Sem eles essa e muitas outras realizações não seriam possíveis. Agradeço a minha irmã, Vitória Luísa, por todo apoio, incentivo e parceria durante os anos. Agradeço a minha amiga, Maria Isabel, pelo apoio. Agradeço a minha amiga e companheira de vida, Marla Juliana, que sempre me incentivou e tornou tudo mais simples e mais fácil desde a sua chegada.

Agradeço ao professor Dr. Ronaldo Ribeiro pelo aceite da orientação deste trabalho, por todo suporte e disponibilidade. Agradeço ao Mestre Antonio Gustavo pela coorientação e suporte técnico durante toda a elaboração deste trabalho. Os senhores têm minha gratidão e minha admiração.

Agradeço aos colegas de curso e amigos que o Recife me deu pela parceria, como Guilherme, Thiago, Alexandre e Pedro e em especial, ao amigo Eduardo Paulo.

Agradeço aos familiares e amigos buiquenses por acreditarem.

RESUMO

Curtailement é o termo utilizado para denominar a limitação ou redução da produção de energia em centrais geradoras fotovoltaicas e eólicas, podendo ser por razões de indisponibilidade, confiabilidade elétrica em instalações externas às centrais geradoras ou por razões de impossibilidade de alocação da energia gerada em carga. Esse fenômeno impacta diretamente a remuneração financeira do gerador pois pode causar o descumprimento contratual com o consumidor final da energia gerada em parte das ocorrências, seja no ambiente de contratação livre de energia – ACL ou no ambiente de contratação regulada - ACR. Este trabalho trata de avaliar a viabilidade financeira da implementação de um Sistema de Armazenamento de Energia por Baterias (*Battery Energy Storage System*) – *BESS* como solução para mitigar as frustrações de geração dessas centrais, estudando o caso particular do Complexo Solar São Pedro e Paulo, localizado na microrregião do Sertão do Pajeú em Pernambuco, utilizando os dados de geração e restrição divulgados pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS e analisando as frustrações em diferentes cenários de venda de energia como no Leilão de Energia Nova A-4 2018 e utilizando os valores médios nos registros da Câmara de Comercialização de Energia - CCEE como base para contratos no Mercado Livre. A principal premissa para utilização do *BESS* é de armazenamento da energia que seria frustrada durante os períodos de restrição de operação e a consequente injeção na rede elétrica do montante armazenado em momentos em que não há restrição.

Palavras-chave: *Curtailement*, sistema fotovoltaico; sistema de armazenamento por bateria; geração; mercado livre de energia, transmissão de energia.

ABSTRACT

Curtailment is the term used to denote the limitation or reduction of energy production in photovoltaic and wind power plants, which may occur due to unavailability, electrical reliability issues in external installations, or the inability to allocate the generated energy to a load. This phenomenon directly impacts the financial remuneration of the generator, as it leads to contractual non-compliance with the final consumer of the generated energy in some instances, whether in the free energy contracting environment (ACL) or the regulated contracting environment (ACR). This study aims to assess the financial feasibility of implementing a Battery Energy Storage System (BESS) as a solution to mitigate generation curtailments in these power plants. The research focuses on the specific case of the São Pedro e Paulo Solar Complex, located in the micro-region of Sertão do Pajeú in Pernambuco. It utilizes generation and restriction data published by the National Electric System Operator (ONS) and analyzes curtailments in different energy sales scenarios, such as the A-4 2018 New Energy Auction, as well as using average values from the records of the Chamber of Electric Energy Commercialization (CCEE) as a basis for contracts in the Free Market. The primary premise for using BESS is to store the energy that would be curtailed during operational restriction periods and inject the stored amount into the electrical grid at times when there are no restrictions.

Keywords: Curtailment, photovoltaic system; battery storage system; generation; free energy market, transmission.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Margem para instalação de centrais geradoras em 2029	Erro!
Indicador não definido.6	
Figura 2 – Atuação do <i>BESS</i> durante o <i>Curtailement</i>	18
Figura 3 – Tipos de ligações de semicondutores	21
Figura 4 – Funcionamento de uma célula fotovoltaica	21
Figura 5 – Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica	22
Figura 6 – Circuito equivalente de um inversor de frequência	23
Figura 7 – Resposta padrão da comutação de transistores	23
Figura 8 – Resposta de comutação controlada de transistores	24
Figura 9 – Curva de potência de uma célula fotovoltaica	24
Figura 10– MPPT com variação de irradiância e temperatura	25
Figura 11 – Composição química de uma bateria de lítio	28
Figura 12 – Gráfico do tempo de vida de uma bateria	28
Figura 13 – Gráfico de capacidade de descarga de uma bateria	29
Figura 14 – Componentes de um <i>BESS</i>	30
Figura 15 – Os quatro quadrantes de operação de um <i>BESS</i>	31
Figura 16 – Circuito equivalente de um <i>BESS</i>	31
Figura 17 – Localização das usinas SPP I e SPP V	32
Figura 18 – Localização das usinas SPP VI e SPP VIII	33
Figura 19 – Rede básica de distribuição de Pernambuco	33
Figura 20 – Rede básica de transmissão de Pernambuco	34

Figura 21 – Circuito da rede elétrica no ponto de conexão do Complexo	35
Figura 22 – Correção do preço do megawatt-hora do leilão A-4 2018	41
Figura 23 – Comportamento do PLD entre dezembro de 2021 e 2024	43
Figura 24 – Comportamento do PLD entre junho e dezembro de 2024	43
Figura 25 – PLD no primeiro dia útil de cada mês subsequente do período estudado	44
Figura 26 – Curva de consumo a uma modulação de contratação <i>flat</i>	48
Figura 27 – Curva de geração de um sistema fotovoltaico com e sem <i>tracker</i>	50
Figura 28 – Curva de consumo diário de uma indústria.....	51
Figura 29 – Curva de consumo diário de uma siderúrgica	51
Figura 30 – Curva de consumo diário de um shopping	51
Figura 31 – Comportamento de um dia característico de cada mês do período estudado	53
Figura 32 – Comportamento de um dia característico de do período estudado	54
Figura 33 – Comportamento das frustrações em um dia característico de cada mês do período estudado	54
Figura 34 – Comportamento das frustrações em um dia característico do período estudado	55
Figura 35 – Projeção do preço do quilowatt-hora do <i>BESS</i> até 2032.....	56
Figura 36 – PLD médio horário entre junho de 2024 e fevereiro de 2025	61
Figura 37 – Sensibilidade financeira da viabilidade do <i>BESS</i>	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais equipamentos do Complexo Solar.....	35
Tabela 2 – Exemplo de dados já filtrados dos Dados Abertos do ONS.	37
Tabela 3 – O tempo e os tipos de restrições sofridas pelo Complexo.	38
Tabela 4 – Volume energia frustrada.....	38
Tabela 5 – Comparação da receita com e sem frustrações de geração.....	46
Tabela 56 – Parâmetros do BESS.	55
Tabela 57 – Volume de armazenamento do BESS entre 2025 e 2023	58
Tabela 8 Erro! Fonte de referência não encontrada. – Custo de O&M do <i>B</i> <i>ESS</i> entre 2025 e 2030.	58
Erro! Fonte de referência não encontrada. Tabela 9 – Correção do preço do m egawatt-hora dos contratos do Complexo até 2030.....	59
Tabela 11 – Volume de energia armazenada no BESS entre 2025 e 2039....	62
Tabela 11 – Custo de O&M do <i>BESS</i> entre 2025 e 2039	62
Tabela 12 – Correção do preço do megawatt-hora dos contratos do Complexo até 2039.	64

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACL	Ambiente de Contratação Livre
ACR	Ambiente de Contratação Regulada
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BESS	<i>Battery Energy Storage System</i>
Capex	<i>Capital Expenditure</i>
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
kW	Quilowatt
kWp	Quilowatt pico
MCP	Mercado de Curto Prazo
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
MWh	<i>Megawatt-hora</i>
O&M	Operação e Manutenção
Opex	<i>Operational Expenditure</i>
PLD	Preço de Liquidação das Diferenças
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
UFV	Usina Fotovoltaica
ROI	Retorno pelo Investimento
SE	Subestação
SIN	Sistema Interligado Nacional
SPP	Complexo Solar São Pedro e Paulo

LISTA DE SÍMBOLOS

E_F	Energia frustrada
E_R	Energia de referência
E_{inj}	Energia injetada
E_{cont}	Energia contratada
E_{ger}	Energia gerada
PLD_{MCP}	PLD no Mercado de Curto Prazo
P_{MWh}	Preço do megawatt-hora
P_{MWh}^F	Preço do megawatt-hora frustrado
R_{total}	Remuneração total

SUMÁRIO

1INTRODUÇÃO	15
1.1 OBJETIVOS.....	18
1.1.1 Geral	18
1.1.2 Específicos.....	18
1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	19
2FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO	20
2.2 CÉLULA FOTOVOLTAICA	20
2.3 INVERSOR DE FREQUÊNCIA.....	23
2.4 TRACKER.....	25
2.5 TIPOS DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.....	26
2.6 CONTROLADOR DE CARGA	26
2.7 BATERIA	27
3GERADOR E CONTRATAÇÕES.....	32
3.1 COMPLEXO SOLAR SÃO PEDRO E PAULO	32
3.2 REGULAMENTAÇÃO DO <i>CURTAILMENT</i>	35
3.3 FRUSTRAÇÕES DE SPP.....	36
3.4 CONTRATAÇÕES DE SPP	40
3.4.1 Contrato Leilão de Energia Nova A-4 2018.....	40
3.4.2 Contratos no Ambiente de Contratação Livre.....	42
4POSSIBILIDADES DE UTILIZAÇÃO DO <i>BESS</i>.....	47
4.1 MODULAÇÃO DE CONTRATOS NO ACL	47
5GERAÇÃO, FRUSTRAÇÕES E CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO....	53
6ANÁLISE FINANCEIRA.....	56
6.1 CENÁRIO 1.....	57
6.2 CENÁRIO 2.....	60
7CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE	66
REFERÊNCIAS	67

1 INTRODUÇÃO

O Nordeste brasileiro é protagonista no crescimento da capacidade instalada de geração de energia elétrica no país, sobretudo a geração eólica e fotovoltaica. E, devido às fontes renováveis, o Nordeste gera mais energia do que consome, apresentando um balanço energético positivo [1]. Esse aumento de geração de energia traz consigo um desafio de operação no sistema elétrico, pois como a geração horária das fontes renováveis é variável, em algumas regiões, quando a geração é muito superior à carga local, as limitações da rede de transmissão impedem o escoamento de todo o volume de energia gerada e o Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS determina a redução ou limitação da geração naquela região [2]. Essa operação se mostra necessária durante ainda alguns anos, devido a uma maior velocidade de planejamento e construção de centrais geradoras eólicas e fotovoltaicas frente ao planejamento e construção de linhas de transmissão que aumentem a capacidade de escoamento dessa energia excedente gerada. Além das restrições motivadas pela indisponibilidade de alocação de geração de energia, ou razões energéticas, há também as restrições de operação devido à indisponibilidade de instalações externas às Centrais Geradoras, razões de indisponibilidade, e restrições motivadas por razões de confiabilidade elétrica dos equipamentos das instalações externas às Centrais Geradoras [3] .

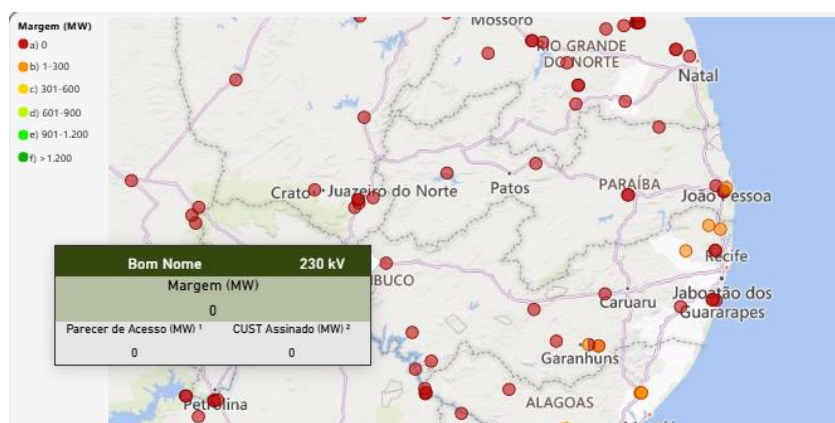
No ano de 2024, como um dos resultados do Leilão de Transmissão nº002/2018, foi concluída a implantação de 480 km de extensão de linhas de transmissão no Nordeste, interligando os estados do Ceará e do Rio Grande do Norte, contemplando as subestações Pacatuba, Jaguaruana II, Russas II, no Ceará, e Mossoró IV e Açu III, no Rio Grande do Norte, que juntas somam uma capacidade de transformação de 3.100 MVA [4] . As linhas implantadas são distribuídas em 230 kV e 500 kV e tiveram como objetivo a elevação das margens para contratação de fontes renováveis do Ceará e Rio Grande do Norte [5] .

No dia 28 de março de 2024, na Bolsa de Valores de São Paulo, foi realizado o Leilão de Transmissão nº 001/2024, promovido pelo Ministério de Minas e Energia - MME e a Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, onde foram arrematados os 15 lotes, com um investimento estimado de R\$18,2 bilhões (dezoito bilhões e duzentos milhões de reais), com prazo de implantação para dezembro de 2029. A

portaria SNTEP/MME Nº 2.840, de 16 de setembro de 2024 prevê a construção de duas linhas de transmissão entre a SE Bom Nome II (230 kV) e as SE Campo Formoso II e SE Zebu III, construção de duas linhas de transmissão entre a SE Bom Nome I e SE Bom Nome II (230 kV), o seccionamento da linha de transmissão de 500 kV Luiz Gonzaga e Milagres II na SE Bom Nome II e uma expansão na capacidade instalada de transformação da SE Bom Nome II [6] . O Leilão totalizou 6.464km de linhas de transmissão e 9.200 MVA em capacidade instalada de transformação para subestações em seus três lotes [6] .

Todas as linhas de transmissão que serão construídas para transporte de energia gerada pelas fontes renováveis no Nordeste para o Sudeste contribuirão para o escoamento da geração solar fotovoltaica dos geradores presentes na microrregião do Pajeú. E ainda assim especificamente o cenário energético no Sertão do Estado de Pernambuco, de acordo com os dados divulgado pelo ONS, apresenta uma previsão de que, até o ano de 2029, mesmo prevendo a existência dessas novas linhas de transmissão interligando os subsistemas, não haverá margem para instalação de centrais geradoras conectadas a rede básica em nível de tensão de 230 kV [7], como mostrado na Figura 1.

Figura 1 – Margem para instalação de centrais geradoras em 2029.



Fonte: retirado de [7].

Uma das dificuldades para o escoamento da geração de centrais fotovoltaicas localizadas no Sertão do Pajeú, em Pernambuco, em momentos em que a geração é maior que o consumo no ponto de conexão, se dá devido a essa central ser conectada

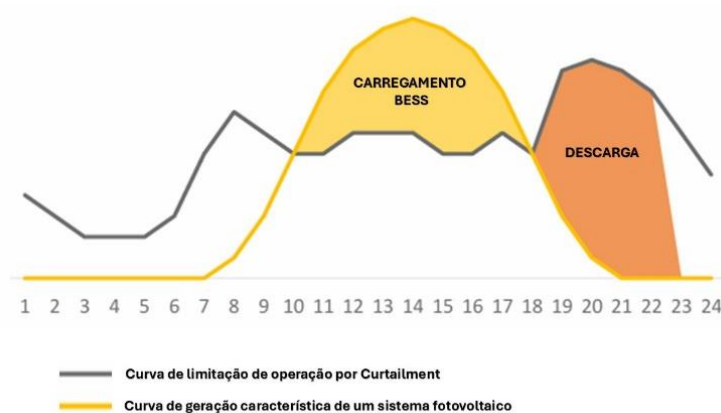
diretamente em linhas de transmissão que partem das hidrelétricas instaladas ao longo da bacia do Rio São Francisco, que são a principal fonte de abastecimento de energia elétrica no Nordeste [8], sem linhas de transmissão existentes para escoar especificamente a geração dessas centrais fotovoltaicas do interior do estado.

Estudando o potencial para instalação de sistemas fotovoltaicos residenciais no Nordeste, Araújo e Ferreira (2018), observaram que o estado de Pernambuco apresenta capacidade de geração de energia fotovoltaica mais alto que os demais estados durante quase todo o ano, além de se manter estável. Porém, a capacidade de produção energética está limitada à capacidade de escoamento de geração nessa região do sistema elétrico, ocasionando parte das restrições de operação.

Essas restrições de operação são nomeadas de *Curtailment* ou de *Constrained-off*. Este último permite ressarcimento financeiro das frustrações de geração. Ambas são percebidas e possuem implicações econômicas para os geradores. Esses efeitos comerciais são apurados pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica - CCEE, quanto à contabilização da energia no Mercado de Curto Prazo - MCP, que é onde ocorre a apuração das diferenças entre a energia contratada e verificada no ambiente de livre contratação de energia ou no atendimento aos contratos segundo a modalidade de contratação [2].

Uma alternativa para diminuir as perdas de geração das centrais fotovoltaicas instaladas no interior de Pernambuco e em outras partes do sistema elétrico, é o armazenamento do volume de energia superior ao valor limitado de injeção durante o período de restrição e a injeção desse volume armazenada de volta à rede no período em que não houver restrição de geração, conforme apresentado na Figura 2.

Figura 2 – Atuação do BESS durante o *Curtailment*.



Fonte: Adaptado de [10]

1.1 Objetivos

1.1.1 Geral

Estudar a implementação de um sistema de armazenamento de energia por baterias (*BESS*) conectado ao conjunto de usinas fotovoltaicas nomeado Complexo Solar São Pedro e Paulo, localizado no município de Flores-PE, visando diminuir as perdas de geração por restrição de operação decorrente de comando do Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS.

1.1.2 Específicos

- Apresentar as principais características de um sistema de armazenamento de energia por baterias;
- Analisar as frustrações financeiras de um gerador fotovoltaico devido às frustrações de geração por restrição de operação em diferentes modalidades de contratação de venda de energia;
- Dimensionar um sistema de armazenamento de energia por baterias para o Complexo Solar São Pedro e Paulo; e

- Analisar o impacto financeiro na receita do gerador a partir da implantação do *BESS*.

1.2 Organização do Trabalho

Este trabalho está estruturado da seguinte forma:

O capítulo 1 detalha o objetivo e a motivação da realização deste estudo, que é a avaliação da implementação de um sistema de armazenamento por baterias para um gerador fotovoltaico para diminuir as frustrações de geração deste.

O capítulo 2 descreve os principais componentes que integram o sistema fotovoltaico associado ao sistema existente e a solução proposta.

O capítulo 3 apresenta o Complexo estudado e descreve as formas de contratação de venda da energia gerada pelo conjunto de usinas.

O capítulo 4 analisa as possibilidades de utilização do *BESS* para os contratos do Complexo.

O capítulo 5 calcula e valora as frustrações e estabelece o critério para dimensionamento do *BESS*.

O capítulo 6 calcula e compara os custos associados da implementação da solução proposta com as frustrações valoradas.

Por fim, o capítulo 7 trata das conclusões deste trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Princípio de funcionamento

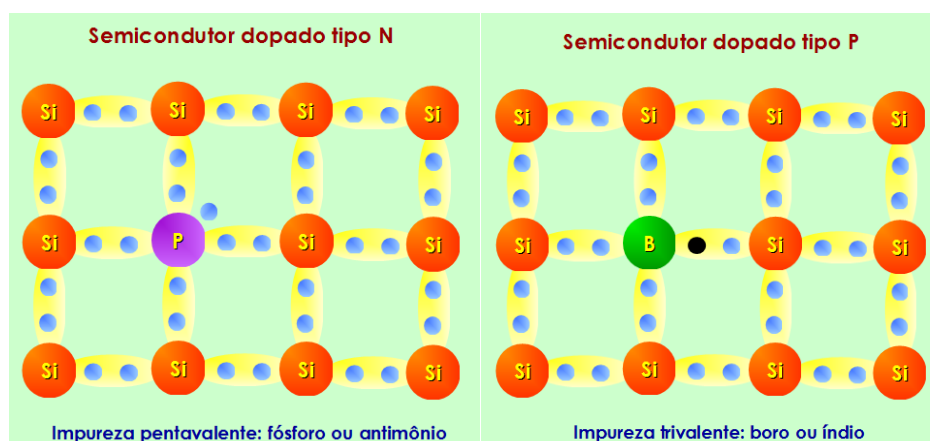
O princípio de funcionamento da energia solar fotovoltaica é o Efeito Fotovoltaico, descoberto em 1938 pelo físico francês Edmond Becquerel. Este efeito consiste na criação de uma corrente elétrica decorrente da exposição de uma célula fotovoltaica, que é um dispositivo de material semicondutor, à radiação solar [11] .

2.2 Célula fotovoltaica

A célula fotovoltaica, componente dos painéis fotovoltaicos, é constituída de materiais semicondutores, que se caracterizam como materiais condutores ou isolantes a depender da condição de operação. O material mais comum da fabricação dos painéis é o silício (Si). O silício tem 4 elétrons na camada de valência, que é a camada externa e sendo o último nível eletrônico do átomo [11] . Na condição de puro, o átomo de silício compartilha um elétron com outro átomo de silício, mas para que o semicondutor se caracterize como condutor, é necessário ser submetido ao processo denominado dopagem, que é a junção de seus átomos com átomos de um segundo elemento que tenha 5 elétrons em sua camada de valência, para que assim, sobre um elétron livre deste elemento após as ligações de seus 4 elétrons aos 4 elementos do silício. O fósforo (P) é um exemplo desse segundo elemento. Os materiais semicondutores podem ser classificados como do tipo N ou do tipo P. Materiais semicondutores do tipo N são condicionados a se comportarem como materiais isolantes devido à inserção de impurezas, passando a ter excesso de elétrons livres que transitam pela rede do material.

No segundo caso, no tipo P, é inserido no material átomos com deficiência de um elétron e tem-se a falta de um elétron na rede que faria o par eletrônico com este elétron, ocasionando numa chamada “lacuna”, que se comporta como carga positiva que transita pelo material quando submetido a uma tensão elétrica [12] .

Figura 3 – Tipos de ligações de semicondutores,



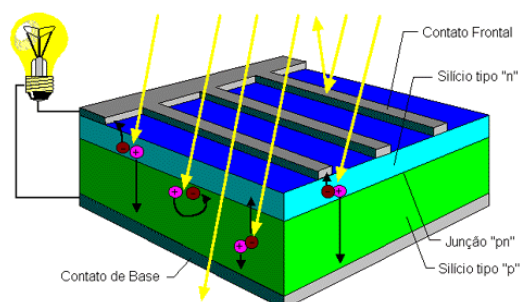
(a) - Ligações tipo N

(b) - Ligações tipo P

Fonte: retirado de [13].

Os painéis fotovoltaicos são construídos a partir de junções de materiais semicondutores tipo P e materiais semicondutores tipo N, formando a chamada junção PN. Nessa situação, os elétrons livres das células do tipo N preenchem as lacunas existentes nas células do tipo P, gerando um campo elétrico que impossibilita a passagem de elétrons das células do tipo N para as células do tipo P. Em torno dessa junção, forma-se a região de depleção, que se caracteriza pela ausência de portadores de carga [14]. Durante a aplicação de uma tensão elétrica nos terminais da junção, a tensão pode ser forte o suficiente para romper a barreira e permitir a passagem de corrente elétrica [15]. Durante a exposição da célula fotovoltaica à radiação solar os fótons da radiação colidem com os elétrons, que são empurrados para a região de depleção, gerando pares de elétrons e lacunas, e um campo elétrico, e, conseqüentemente, uma corrente contínua.

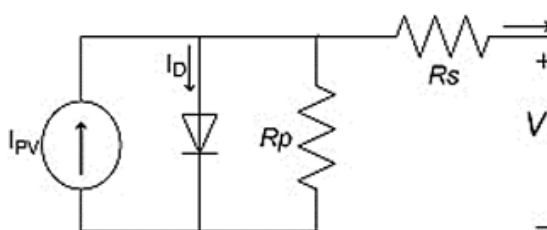
Figura 4 – Funcionamento de uma célula fotovoltaica.



Fonte: retirado de [16].

Na prática, a célula fotovoltaica é um dispositivo semicondutor que, eletricamente, pode ser descrita como o circuito da Figura 5, sendo uma fonte de corrente conectada em antiparalelo com um diodo – dispositivo que só permite passagem de corrente em um sentido – em paralelo com uma resistência e em série com outra resistência, as quais representam as perdas de corrente na operação do dispositivo.

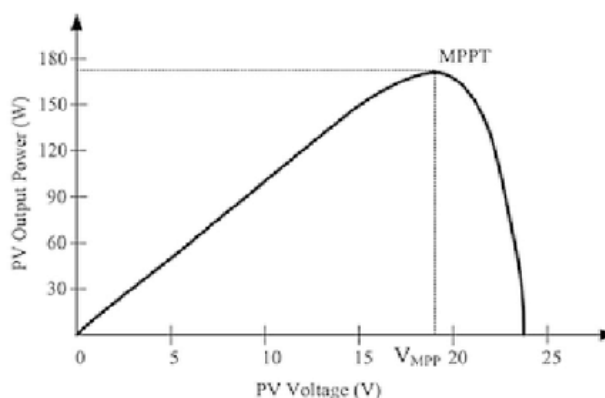
Figura 5 - Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica.



Fonte: retirado de [17]

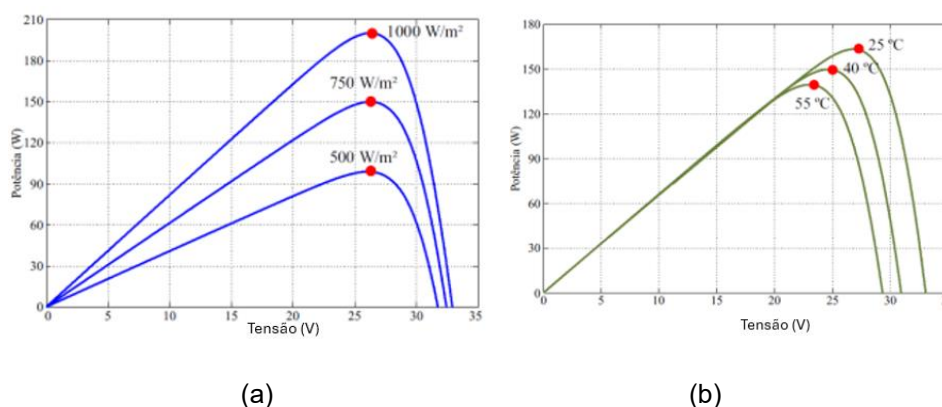
A geração de energia a partir de um painel fotovoltaico é completamente dependente da irradiância da luz solar e da temperatura ambiente. A diminuição da intensidade da irradiância solar devido ao sombreamento e oscilação de temperatura durante o dia são fatores que desfavorecem a geração de um painel. Porém, a implementação da tecnologia MPPT, monitoramento do ponto de máxima potência, contribui para manter a geração mais próxima do que deveria ser. A Figura 10 mostra, com a curva de potência da célula fotovoltaica, o ponto de máxima potência da célula fotovoltaica. As Figuras 11(a) e 11(b) representam, respectivamente, a curva de potência de uma mesma célula fotovoltaica com as variações de irradiância e temperatura.

Figura 9 - Curva de potência de uma célula fotovoltaica.



Fonte: retirado de [21] .

Figura 10: MPPT com variação de irradiância (a) e temperatura (b).



Fonte: Adaptado de [22]

No rastreamento do MPPT, uma das técnicas mais utilizadas é a chamada Perturbe and Observe - P&O, que opera incrementando ou decrementando, periodicamente, a tensão de saída do módulo e compara a potência obtida naquele ciclo com a do ciclo anterior. Se de um ciclo para outro houver o aumento de potência, o ponto de operação (I , V) é deslocado naquela direção, caso contrário, é deslocado para o sentido oposto daquela direção [22] .

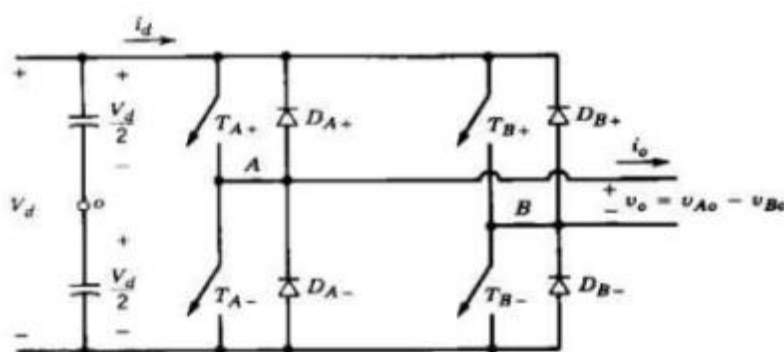
2.3 Inversor de frequência

Assim como outras fontes de energia elétrica, a célula fotovoltaica gera corrente contínua, mas as redes convencionais de transmissão e distribuição no Brasil são

desenvolvidas para o transporte de corrente alternada. Assim, é necessário que essa corrente contínua gerada seja convertida em corrente alternada para que chegue até a carga. O equipamento responsável por realizar essa conversão é denominado inversor de frequência.

O princípio de funcionamento básico do inversor de frequência é o mesmo funcionamento do chamado conversor CC-CA, que é um equipamento cujo circuito principal consiste em um conjunto de quatro transistores conectados em ponte à carga, como mostrado na Figura 6. Os transistores operam como chaves que permitem ou não a passagem de corrente em um único sentido dependendo do seu estado de condução. Os transistores são acionados aos pares de forma alternada e isso inverte a tensão de saída do circuito [18]. A frequência padrão da corrente alternada no sistema elétrico brasileiro é de 60Hz, ou seja, 60 ciclos por segundo. E a rede de transmissão é trifásica, com três fases de tensão e corrente defasadas entre si.

Figura 6 – Circuito equivalente de um inversor de frequência.

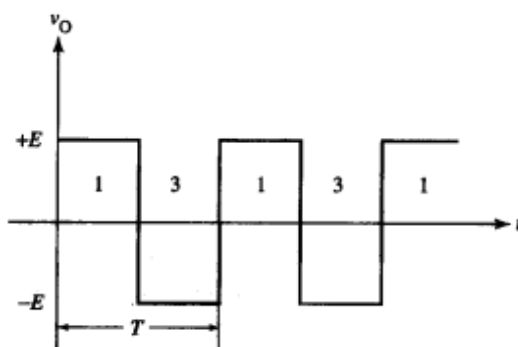


Fonte: retirado de [18]

O formato de onda obtido a partir da comutação dos transistores é quadrado, conforme se pode observar na Figura 7. Como o formato de onda de tensão e corrente da rede do sistema elétrico é senoidal, dessa forma, ao invés de acionar os pares de transistores simultaneamente, utiliza-se o chamado PWM (*Pulse Width Modulation*), que consiste no defasamento forçado entre as comutações dos transistores. Dessa maneira, a tensão de saída do circuito é resultado do cancelamento das duas tensões

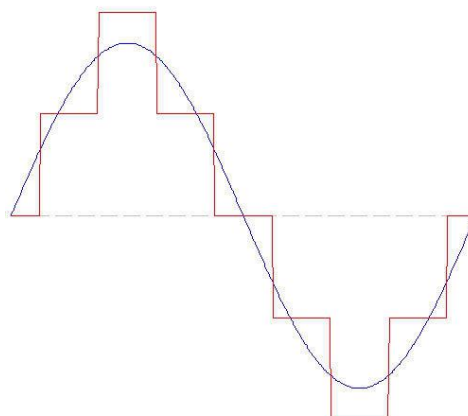
em intervalos de cada ciclo [19]. A Figura 8 representa a forma de onda construída a partir da variação da largura dos pulsos, do PWM.

Figura 7 - Resposta padrão da comutação de transistores.



Fonte: retirado de [18] .

Figura 8 - Resposta de comutação controlada de transistores.



Fonte: retirado de [20] .

2.4 Tracker

Durante o dia, a radiação solar muda de direção e como os painéis fixos permanecem estáticos, a capacidade de captação dessa radiação e de geração de energia solar fotovoltaica acabam sendo limitadas. O *Tracker* é um equipamento que

pode ou não ser utilizado no sistema fotovoltaico com a função de maximizar a capacidade de captação de radiação solar no sistema, pois é um dispositivo que orienta a face conversora do módulo fotovoltaico para melhor captação da radiação solar. Estes podem ser de eixo único ou de eixo duplo, onde os de eixo único movimentam os painéis somente com um eixo, normalmente, acompanhando o movimento leste/oeste do sol durante o dia, enquanto os *trackers* de eixo duplo podem acompanhar o movimento do sol de forma mais precisa, sendo tanto o movimento de leste a oeste, como o movimento de norte a sul [24] .

2.5 Tipos de sistemas fotovoltaicos

O sistema fotovoltaico pode ser classificado como sendo *on-grid*, *off-grid* ou *zero grid*. O primeiro é um sistema conectado na rede elétrica de distribuição, que permite injetar a energia gerada excedente nos momentos em que a geração é maior que o consumo da carga junta ao gerador e consumir energia da rede nos momentos em que o consumo for maior que a geração e que não houver geração. O segundo, *off-grid*, é um sistema isolado, ou autônomo, que não é conectado à rede e tem autonomia de energia para abastecer a carga. Dois componentes que fazem parte do sistema fotovoltaico *off-grid* são as baterias e o controlador de carga [23]. O sistema *zero grid* é um sistema com armazenamento de energia que é capaz de operar conectado ou não à rede. Na realidade, o *zero grid* é uma estratégia de controle de injeção de energia, não sendo propriamente um sistema elétrico. As baterias armazenam o volume de energia gerado excedente ao consumo ao invés de injetar na rede ou diminuir a geração e fornecem energia à carga quando o consumo for superior à geração [57] . Toda a energia gerada é consumida instantaneamente ou direcionada as baterias.

2.6 Controlador de carga

O controlador de carga é um equipamento que conecta o circuito de geração ao circuito de armazenamento. Ele garante que o sistema de armazenamento opere em condições convenientes aos limites de operação, garantindo que não haja

sobrecargas superiores aos níveis estabelecidos pelo fabricante ou descargas abaixo destes [25] . Os dois principais tipos de controladores de carga são os controladores “liga e desliga” e os controladores PWM. Os controladores “liga e desliga” são construídos com duas chaves que podem desconectar o gerador da bateria e conectar à carga. Quando a bateria está sob carregamento e atinge um nível de carga satisfatório, o controlador desconecta o gerador da bateria e o conecta diretamente à carga. Eles podem ser construídos com as chaves conectadas em série ou em paralelo.

2.7 Bateria

A bateria é o componente chave do sistema fotovoltaico autônomo, ela é responsável por armazenar a energia excedente de um gerador e de fornecer energia à carga, direcionando a energia armazenada a ela quando necessário. A bateria é um equipamento formado por células químicas conectadas entre si em série ou em paralelo, que sofrem reações de oxidorredução e produzem corrente elétrica, podendo armazenar energia em forma de energia química e, posteriormente, liberar corrente elétrica. As baterias têm um ânodo e um cátodo, que ficam em contato com um eletrólito. As principais combinações de elementos que constituem uma bateria são chumbo e ácido, níquel e cádmio, hidreto metálico e óxido de níquel, e íons de lítio, onde esta é a mais comum para o tipo de sistema estudado.

Na bateria de íons de lítio há um ânodo formado pela associação de lítio e de grafite (carbono) e um cátodo de óxido de lítio e cobalto. Durante a oxidação, o grafite libera íons de lítio e elétrons que ficaram livres após essa combinação, como mostra a Equação (2.7.1). No cátodo, os íons de lítio reagem com elétrons e os íons se incorporam ao óxido como mostrado na Equação (2.7.1). Ao receber energia por uma fonte externa, as equações apresentadas ocorrem de forma inversa [26] A Figura 11 representa essa reação de, através do eletrólito, o óxido de lítio metal ser convertido em lítio metal, íon de lítio e carbono.



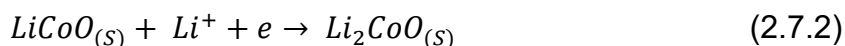
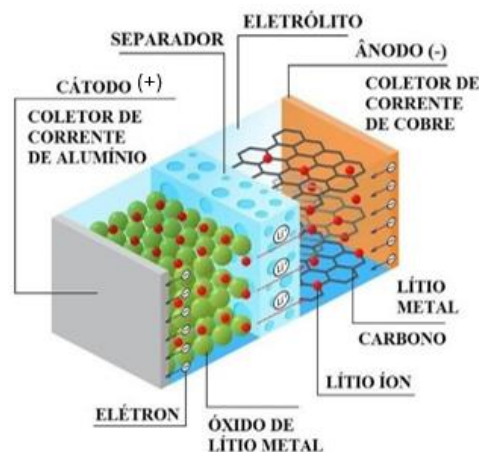


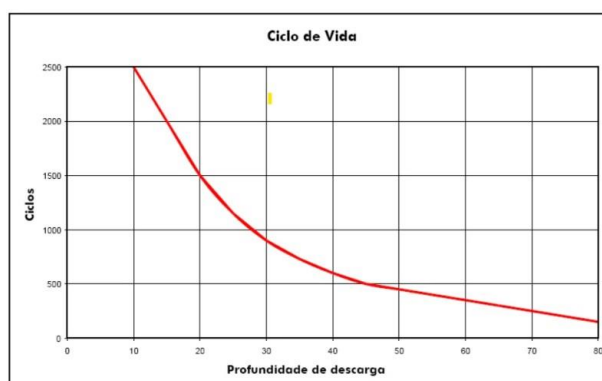
Figura 11 - Composição química de uma bateria de lítio.



Fonte: Adaptado de [27]

Os principais parâmetros da bateria para o seu dimensionamento são a profundidade de descarga, a capacidade, o tempo de vida útil, a eficiência energética e a autodescarga [28]. A profundidade de descarga indica a porcentagem da capacidade nominal da bateria para armazenamento, ou seja, a porcentagem de energia fornecida pela bateria numa determinada descarga, sendo 0% quando não há descarga e 100% quando é descarregada até o nível de tensão limite. O indicador de profundidade de descarga é o DOD e é fornecido pelo fabricante. A Figura 12 mostra o comportamento do tempo de vida útil, em ciclos, pela profundidade de descarga da bateria.

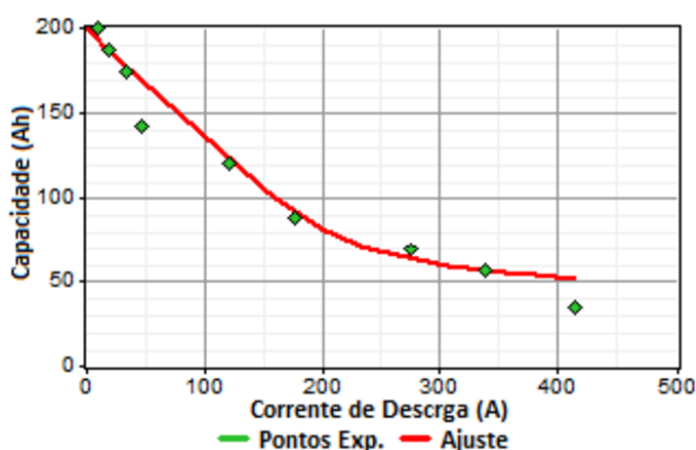
Figura 12 - Gráfico do tempo de vida de uma bateria.



Fonte: retirado de [29]

A capacidade da bateria é a quantidade de energia que a bateria pode armazenar e, posteriormente, fornecer até descarregar totalmente [30] . Essa capacidade é definida pelo produto da corrente de descarga constante com o tempo de descarga da bateria, dessa forma a capacidade tem unidade de corrente e tempo, normalmente em Ampère-hora (Ah). As baterias não possuem comportamento de carga e descarga linear. Assim, uma bateria C_{50} de 50Ah é capaz de descarregar durante 50 horas uma corrente equivalente a 1 A. De forma semelhante, esta mesma bateria pode descarregar uma corrente de 5 A e chegar num nível de tensão limite em 50 horas, assim tem a capacidade de 250 Ah. A Figura 13 mostra a relação da capacidade de descarga da bateria com a intensidade da corrente de descarga.

Figura 13 - Gráfico de capacidade de descarga de uma bateria.



Fonte: retirado de [31]

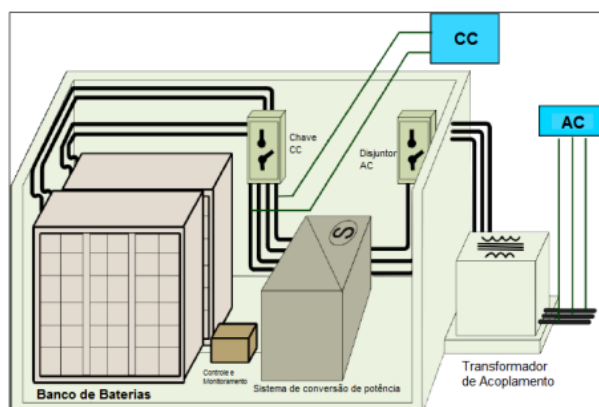
O tempo de vida útil de uma bateria é o parâmetro que define quantos ciclos ou descargas a bateria é capaz de oferecer durante todo tempo de utilização. A vida útil de uma bateria é definida como sendo o ponto em que a partir dele, completamente carregada, a bateria dispõe apenas de 80% de sua capacidade inicial. Após o tempo de vida útil, a bateria pode continuar em operação, porém com capacidade reduzida e com risco de falhas significativo [28] .

A eficiência da bateria é a relação entre a energia liberada e armazenada num ciclo completo [32] Esse parâmetro é definido após análise de vários ciclos de carga e descarga. Os valores de eficiência diminuem devido a perdas de transferência de energia.

A autodescarga da bateria é um processo natural, onde parte da energia armazenada é descarregada mesmo quando a bateria não está sendo utilizada, uma perda gradual de carga da bateria. A auto-descarga é impactada pela temperatura e seu armazenamento a temperaturas superiores a 30 °C aumenta expressivamente a taxa de auto-descarga [33] .

O *BESS* é o conjunto dos equipamentos para armazenar e injetar energia. Nele há o equipamento de armazenamento, que é a bateria; o circuito de conversão de corrente, que é o inversor de frequência; o equipamento de transformação de tensão, que é o transformador e as proteções de corrente contínua e corrente alternada [34] . A Figura 14 representa o conjunto dos equipamentos básicos de um *BESS*.

Figura 14 - Componentes de um *BESS*.

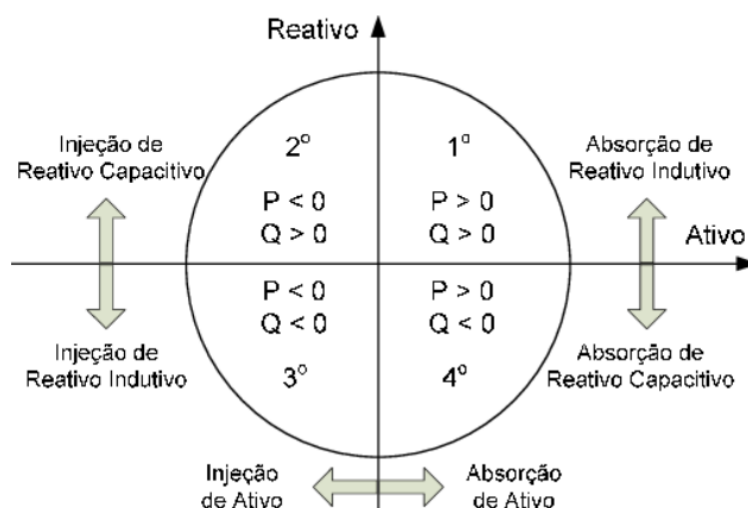


Fonte: retirado de [34]

Como ora a bateria do sistema de armazenamento se comporta como carga, no processo de carregamento, ora como fonte, no processo de descarga e ora está em estado de ociosidade, sem troca significativa de potência e o inversor do sistema se comportar como indutor ou capacitor devido à possibilidade de defasar a corrente de injeção com relação a tensão da rede, o sistema de armazenamento pode operar nos quatro quadrantes de potência [35] ResearchGate. [34] . A Figura 15 descreve as condições de operação em cada quadrante, onde o 1º representa as condições de carregamento da bateria e o inversor com corrente defasada com relação à tensão da rede; o 2º representa a bateria em condição de descarga e o inversor com corrente defasada com relação à tensão da rede; o 3º representa a bateria em condição de

descarga e com o inversor com a corrente adiantada com relação à tensão da rede; e o 4º representa a bateria em condição de carregamento e o inversor com corrente adiantada com relação à tensão da rede.

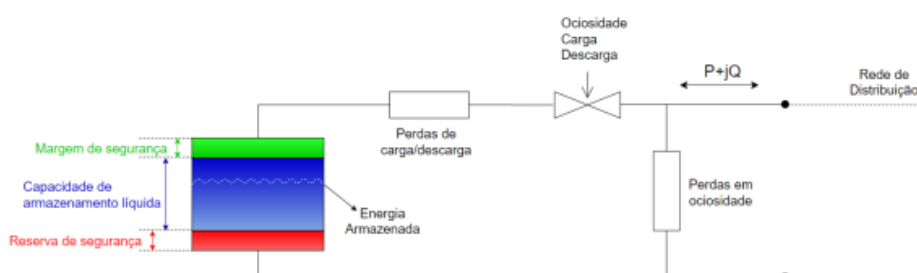
Figura 15 - Os quatro quadrantes de operação de um BESS.



Fonte: retirado de [35] ResearchGate.

O modelo básico de um BESS pode ser representado pela Figura 16, onde o elemento de armazenamento é a bateria, as perdas de carga e de descarga representam a eficiência do equipamento, as perdas por auto-descarga estão representadas pelas perdas em ociosidade e a válvula de controle tem a finalidade de representar o quadrante de potência sob o qual o conversor de corrente está atuando [34].

Figura 16 - Circuito equivalente de um BESS.



Fonte: retirado de [34]

3 GERADOR E CONTRATAÇÕES

3.1 Complexo Solar São Pedro e Paulo

O conjunto fotovoltaico SPP está localizado na zona rural do município de Flores, integrante da microrregião do Sertão do Pajeú, no interior do estado de Pernambuco, a 387 km da capital Recife. O conjunto é dividido em quatro usinas, sendo elas, São Pedro e Paulo I (SPP I), São Pedro e Paulo V (SPP V), São Pedro e Paulo VI (SPP VI) e São Pedro e Paulo VIII (SPP VIII), que juntas somam 270 hectares de área, onde SPP I e SPP VIII estão localizadas no Sítio Veneza, ao sudoeste da cidade de Flores, como mostra a Figura 17, e SPP V e SPP VI estão localizadas na Fazenda Florença, ao sudeste da cidade, como visto na Figura 17 e 18, respectivamente.

O Município, assim como os demais da microrregião, possui um expressivo potencial para geração de energia solar fotovoltaica e, de acordo com os dados divulgados pelo Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia – LABREN, apresenta uma irradiância global horizontal média de 5.783,15 Wh/m².dia [37], uma capacidade de geração diária de 4,481 kWh/kWp de módulo fotovoltaico instalado, que dividindo por 24 horas, 0,1867 kWmedio/kWp, ou seja, um FC de 18,67%, segundo o *Global Solar Atlas* [40] e uma precipitação média anual de somente 669 mm/m², segundo a Agência Pernambucana de Águas e Clima - APAC [36]

Figura 17- Localização das usinas SPP I e SPP VIII.



Fonte: adaptado de Google Earth.

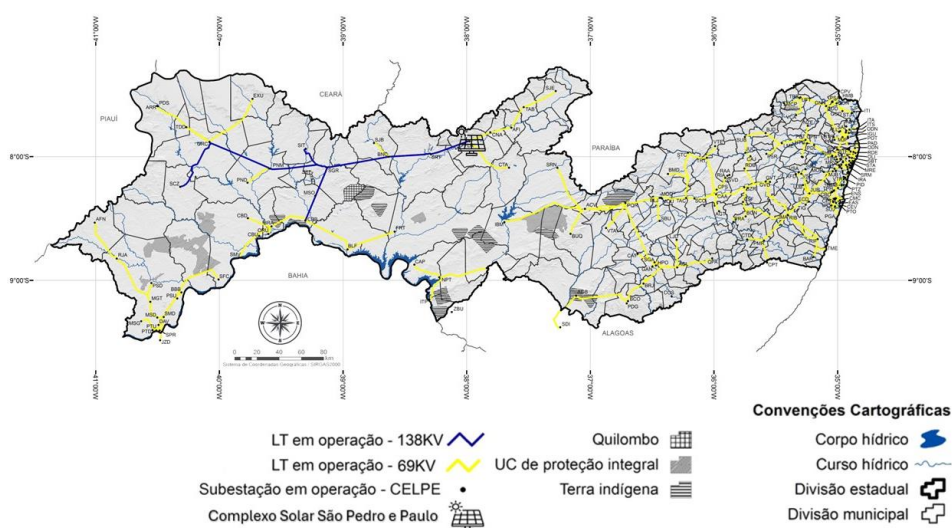
Figura 18 - Localização das usinas SPP V e SPP VI.



Fonte: adaptado de Google Earth.

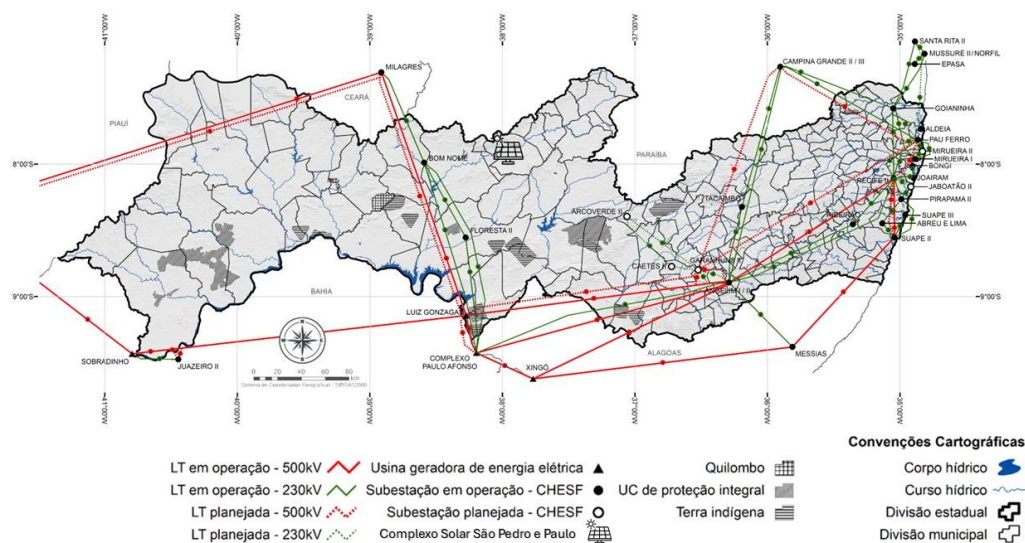
Na rede básica, o conjunto está conectado à subestação nomeada SE Flores da Neoenergia Pernambuco e rede básica de distribuição de nível de tensão de 138 kV, que interliga os municípios de Flores, Serra Talhada, Salgueiro, Cabrobó, Serrita, Parnamirim, Ouricuri e Santa Cruz da Baixa Verde, todos em Pernambuco, como pode ser observado na Figura 19 [38] e se conecta a SE Bom Nome 138 kV, no município de São José do Belmonte-PE, onde o nível de tensão é transformado para 230 kV através da SE Bom Nome 230 kV. Subestação esta, que é diretamente conectada ao Complexo Hidrelétrico de Paulo Afonso, na Bahia, pela linha de transmissão LT Paulo Afonso III/Bom Nome, como pode ser visualizado na Figura 20 [38] .

Figura 19 - Rede básica de distribuição em Pernambuco.



Fonte: adaptado de [38]

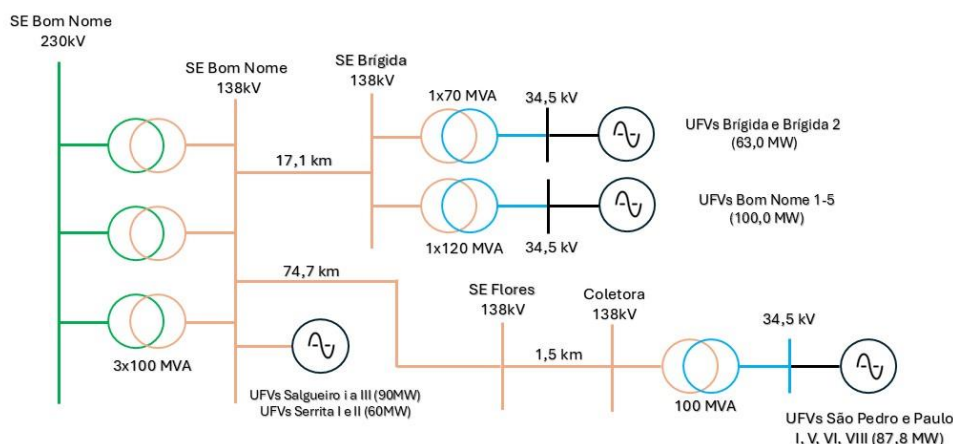
Figura 20 - Rede básica de transmissão em Pernambuco.



Fonte: adaptado de [38]

A subestação de Bom Nome 230 kV têm quatro conjuntos fotovoltaicos de geração centralizada conectados a ela. Onde os conjuntos UFVs Brígida, UFVs Bom Nome e UFVs São Pedro e Paulo são conectados a transformadores que elevam a tensão de 34,5 kV para 138 kV. Os conjuntos UFVs Brígida, UFVs Bom Nome são conectados na SE Brígida 138 kV, esta é conectada na SE Bom Nome 138 kV, e transformada em 230 kV na SE Bom Nome 138 kV. Já o conjunto UFV São Pedro e Paulo é conectada a um transformador elevador de 34,5 kV para 138kV para uma subestação coletora e com 1,5km de extensão de rede própria, conecta-se a SE Flores 138 kV, e esta conecta-se a SE Bom Nome 138 kV. Como mostrado na Figura 21.

Figura 21 - Circuito da rede elétrica no ponto de conexão do Complexo.



Fonte: Autor.

O Complexo Solar São Pedro e Paulo possui 101,35MWp de potência instalada em módulos, divididos em 34,4 MWp (SPP I), 33,4MWp (SPP V), 26,6MWp (SPP VI) e 6,9MWp (SPP VIII). A Tabela 1 descreve os principais equipamentos do Complexo.

Tabela 1 - Principais equipamentos do Complexo Solar.

Equipamentos		
Equipamento	Quantidade	Marca
Módulos	153.816	Canadian Solar CS7N-AG (655, 660, 665W)
Inversores	380	TBEA TS228KLT-HV
Trackers	1.508	STI Norland - STI-H250

Fonte: Autor.

3.2 Regulamentação do *Curtailment*

A Resolução Normativa ANEEL nº 1.073, de setembro de 2023, entrou em vigor no dia 2 de outubro de 2023, altera a Resolução Normativa nº 1.030, de 26 de julho de 2022, que estabelece os critérios, procedimentos para apuração e pagamento de restrição de e operação por *Constrained-off*. E o Art. 20-C determina que o ONS deve calcular a referência da frustração de geração de energia das restrições de operação por *Constrained-off*, classificadas como razão de indisponibilidade externa das

Centrais Geradora Fotovoltaicas, a partir da função de produtividade da Central Geradora Fotovoltaica, de acordo com os critérios estabelecidos pelo mesmo [3] .

O ONS divulga em seu site os dados de restrição de operação por Constrained-off de usinas fotovoltaicas do Tipo I, Tipo II-B e Tipo II-C, que são classificações de usinas que operam segundo o Módulo 7.2 dos Procedimentos de Rede do ONS [39] Os dados divulgados pelo ONS são tabelas mensais com as referências de identificação da central geradora fotovoltaica e a média semi-horária dos valores de geração real, geração limitada por restrição, valor de disponibilidade, valor de geração de referência, todos em MW, e, a razão da restrição e a origem.

3.3 Frustrações de SPP

Analizando os dados de restrição de operação do Complexo Fotovoltaico São Pedro e Paulo, que é identificado como Conjunto Bom Nome 138kV pelo ONS, subtraindo o valor da Geração Real da Referência de Geração e dividindo por dois, conforme descrito na Equação 3.3.1, se encontra a Frustração de Geração estimada naquele semi-horário. A divisão por dois se dá devido ao dado divulgado pelo ONS ser em potência a cada meia hora.

$$E_F = (E_R - E_{inj}) * \frac{1}{2} \quad (3.3.1)$$

Onde:

E_F - Frustração de geração estimada em MWh;

E_R - Referência do valor da capacidade de potência, durante aquele semi-horário, encontrada a partir da função de produtividade da Central Geradora Fotovoltaica em MW;

E_{inj} - O valor da capacidade de potência durante aquele semi-horário, que foi injetada na rede durante aquela meia hora em MW;

$\frac{1}{2}$ – O fator de transformação de MW para MWh.

A Tabela 2 é um exemplo da forma que foram dispostos os valores divulgados pelo ONS para análise. Onde, usando como exemplo o dia 15 de outubro de 2024, no período entre às 8h e 12h30min, houve uma restrição de operação por Razões de Confiabilidade – CNF e pode-se observar na coluna de Geração, um desligamento da Central Fotovoltaica entre às 9h e 10h30min, onde a geração está zerada. No sistema de divulgação dos valores de geração do ONS, o conjunto está identificado como UFV Bom Nome 138kV. A coluna Frustrações Calculadas é calculada pela Equação 3.3.1, onde na Equação é representada por E_F .

Tabela 2 – Exemplo de dados já filtrados dos Dados Abertos do ONS.

Dados divulgados pelo ONS filtrados							
Usina	Data	Horário	Geração (MW)	Limitação Geração (MW)	Referência Geração (MW)	Restrição	Frustrações Calculadas (MWh)
BOM NOME	15/10/2024	08:00:00	45,9240	46,0000	70,1970	CNF	12,1365
BOM NOME	15/10/2024	08:30:00	24,0810	46,0000	73,8390	CNF	24,8790
BOM NOME	15/10/2024	09:00:00	0,0000	46,5330	71,9810	CNF	35,9905
BOM NOME	15/10/2024	09:30:00	0,0000	55,6000	73,0290	CNF	36,5145
BOM NOME	15/10/2024	10:00:00	0,0000	62,0330	73,4340	CNF	36,7170
BOM NOME	15/10/2024	10:30:00	0,0000	68,9330	68,4020	CNF	34,2010
BOM NOME	15/10/2024	11:00:00	16,8890	75,4000	66,9090	CNF	25,0100
BOM NOME	15/10/2024	11:30:00	58,8270	80,2000	62,4000	CNF	1,7865
BOM NOME	15/10/2024	12:00:00	64,6400	81,0000	74,1000	CNF	4,7300
BOM NOME	15/10/2024	12:30:00	53,7380	70,4010	65,8590	CNF	6,0605

Fonte: Autor.

Disposto todos os dados durante o período de 1º de junho de 2024 e 30 de novembro de 2024, observa-se um total de 1.174 horas em que o Complexo Solar São Pedro e Paulo ficou sob restrição de operação por *Curtailment*, sendo dessas 1.174 horas, 293,5 horas devido razões a energéticas, 727,5 horas devido à confiabilidade da rede e 153 horas devido à indisponibilidade de instalações externas ao gerador, como mostrado na Tabela 3.

Tabela 3 – O tempo e os tipos de restrições sofridas pelo Complexo.

Restrições (horas)			
Mês	Razões Energéticas	Confiabilidade	Indisponibilidade
junho/24	61	33	1
julho/24	28	159	12
agosto/24	32,5	298	70
setembro/24	51	146	60,5
outubro/24	63	70,5	7
novembro/24	58	21	2,5

Fonte: Autor.

Os pagamentos diretos dos montantes financeiros referentes às restrições de operação por *Constrained-off* dos geradores ou conjunto de geradores fotovoltaicos são realizados por meio de Encargo de Serviço do Sistema – ESS pela CCEE na parcela de garantia física não contratada por Contrato de Comercialização de Energia no Ambiente Regulado – CCEAR e não contratada por Contrato de Energia Reserva – CER. Para as contratações por CCEAR, o pagamento é realizado às distribuidoras compradoras dos contratos e para as contratações por CER, o pagamento é realizado a Conta de Energia de Reserva – CONER. Esse pagamento só é devido nas situações em que a soma temporal acumulada anual superar 30 horas e 30 minutos. O montante energético para apuração dos ESS é dado pelo mínimo valor entre o volume de frustrações de geração e a diferença entre o volume de energia contratada e a energia gerada [3] .

Os valores das frustrações mensais estimadas de geração estão dispostos na Tabela 4, e somam, nos seis meses, um volume total de 14.126,51 MWh.

Tabela 4 – Volume energia frustrada.

Frustrações de Geração Mensal (MWh)							
Mês	jun/24	jul/24	ago/24	set/24	out/24	nov/24	Soma
Frustrações	999,34	1.868,15	2.965,69	4.134,35	2.629,04	1.529,93	14.126,51

Fonte: Autor.

Durante o período estudado, o volume de frustrações de geração devido às restrições por operação por razões de indisponibilidade foi de 6.151,25 MWh, sendo nas primeiras 30,5 horas um volume equivalente a 442,46 MWh e nas demais 122,5

horas um volume de 5.708,79 MWh. A soma dos valores de geração e frustração durante o período de seis meses será multiplicada por dois a fim de obter o montante equivalente a um ano de operação.

A partir dessas frustrações de geração, este trabalho estuda a viabilidade da instalação de um sistema de armazenamento de energia por baterias junto ao Complexo Solar São Pedro e Paulo, no interior do Sertão de Pernambuco.

Os geradores fotovoltaicos e eólicos com restrição de operação por *Curtailment* recebem notificações diretas do ONS, solicitando a limitação da geração do conjunto e então o operador limita a potência dos inversores de cada usina do conjunto na ordem e prioridade de geração que melhor convém ao cumprimento dos contratos de venda de energia, seja no ambiente livre – ACL ou regulado - ACR.

Nos dias em que há restrição ou limitação de geração, essas notificações podem acontecer várias vezes por hora ou passar horas sem que aconteçam, mas o ONS divulga em seus dados abertos uma média da limitação de potência a ser entregue a cada meia hora. Além da média de limitação, divulga a estimativa de potência que o gerador poderia gerar a cada meia hora a partir da função de produtividade da central geradora de acordo com critérios técnicos estabelecidos pelo próprio ONS. Ora o que foi gerado é inferior a estimativa do ONS e ora, é superior. Isso acontece devido à disponibilidade do conjunto, pois nem todos os módulos, *strings* e inversores estão sempre em perfeito funcionamento. Dessa forma, para calcular as frustrações, foi estabelecido o critério de que a geração frustrada seja o maior dos valores entre o injetado e o valor que o ONS estabelece como estimativa de geração sem a limitação por *Curtailment*.

O *Global Solar Atlas*, que utiliza a base de dados do SolarGis, atribui uma geração média anual de 1.636,7 kWh por kWp de módulo instalado por ano para a coordenada 7° 52' 35.91" S 37° 58' 54.94" W, que é aproximadamente o centro geométrico do terreno onde estão localizadas SPP I e SPP VIII. Para SPP V e SPP VI têm-se uma média anual de 1.648,2 kWh/kWp.ano, utilizando o ponto médio 7° 53' 4.98" S 37° 56' 0.36" W [40] Mas para os dois pontos, atribui-se um ganho de geração devido a utilização de *trackers* de eixo único. Em [41] estima-se um ganho de aproximadamente 30% de geração para sistemas fotovoltaicos com utilização de *trackers* de eixo único frente a painéis fixos para projetos fotovoltaicos no nordeste do

Brasil. Então, uma estimativa geral de geração anual das usinas SPP I (34,4 MWp), SPP VIII (6,9 MWp), SPP V (33,4 MWp) e SPP VI (26,6 MWp) é de 73.193,22 MWh, 14.681,20 MWh, 7.162,85 MWh e 56.994,76 MWh, respectivamente, somando uma geração semestral de 76.016,01 MWh. Observa-se que nesses meses, o Complexo teve um potencial de geração superior a expectativa, onde geraria sem frustrações nesse período 93.001,24 MWh.

3.4 Contratações de SPP

3.4.1 Contrato Leilão de Energia Nova A-4 2018

A Lei nº 10.848, de 15 de março de 2004, determina que as concessionárias de energia no Brasil só comprem energia para venda em distribuição através de leilões de energia [42] . No Leilão de Energia Nova A-4 001/2018 foram cadastrados 1.672 projetos de centrais geradoras, destes, 620 eram projetos de conjunto de usinas fotovoltaicas, dos quais 38 foram no estado de Pernambuco, totalizando 1.123 MW de oferta de capacidade instalada de centrais fotovoltaicas em Pernambuco. Em Pernambuco, 31 dos 38 projetos foram habilitados, que totalizaram 913 MW de oferta [43] .

A nota técnica emitida pela Empresa de Pesquisa Energética - EPE em abril de 2018, que analisa a participação dos geradores fotovoltaicos participantes dos leilões de energia no Brasil nomeada “Projetos Fotovoltaicos no Leilões de Energia, características dos empreendimentos participantes nos leilões de 2013 a 2018”, apresenta o preço de compra do MWh do Complexo Solar São Pedro e Paulo, arrematado por R\$ 117,63 (cento e dezessete reais e sessenta e três centavos), sendo reajustado anualmente pelo Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo – IPCA, e somente a unidade SPP I foi contratada para o fornecimento de energia através deste leilão. O contrato é na modalidade por disponibilidade de energia elétrica, com prazo de suprimento de vinte anos. O início do suprimento de energia dos projetos contratados em 1º de janeiro de 2022 [43] .

Como nos dados abertos do ONS, o Complexo SPP teve suas restrições de operação com valores consistentes a partir de junho de 2024, para valorar as perdas

da unidade SPP I, contratada pelo Leilão A-4 2018, o valor do megawatt-hora deve ser corrigido de abril de 2018, data de emissão dos documentos de consolidação dos geradores cadastrados no leilão e janeiro de 2024, que é o ano onde as perdas começaram a ser registradas.

Como mostrado na Figura 22, o preço do megawatt-hora vendido por SPPI em 2024 foi de R\$ 157,47 (cento e cinquenta e sete reais e quarenta e sete centavos). Ao se considerar a condição de que todas as frustrações de geração foram direcionadas à unidade SPP I e o volume de frustrações sendo 14.126,51 MWh, conforme calculado no Capítulo 1, tem-se, aproximadamente, R\$ 2.224.501,53 (dois milhões, duzentos e vinte e quatro mil, quinhentos e um reais e cinquenta e três centavos) de frustração financeira entre os meses de junho e novembro de 2024. Porém, 5.708,79 MWh são frustrações que superaram as 30,5 horas previstas na Resolução Normativa Aneel nº 1.073, que em contrato de leilão de energia nova têm valor ressarcido pela CCEE para as concessionárias de energia compradoras do leilão. Dessa forma, a frustração financeira é de R\$ 1.325.538,36 (um milhão, trezentos e vinte e cinco mil, quinhentos e trinta e oito reais e trinta e seis centavos), já subtraindo os R\$ 898.963,16 (oitocentos mil, novecentos e sessenta e três reais e dezesseis centavos) do ressarcimento financeiro.

Figura 22 - Correção do preço do megawatt-hora do leilão A-4 2018.

Resultado da Correção pelo IPCA (IBGE)	
Dados básicos da correção pelo IPCA (IBGE)	
Dados informados	
Data inicial	10/2018
Data final	01/2024
Valor nominal	R\$ 117,63 (REAL)
Dados calculados	
Índice de correção no período	1,33869730
Valor percentual correspondente	33,869730 %
Valor corrigido na data final	R\$ 157,47 (REAL)

Fonte: Calculadora do cidadão.

3.4.2 Contratos no Ambiente de Contratação Livre

As outras três unidades SPP V, SPP VI e SPP VIII são usinas que não foram contratadas em Leilão de Energia Nova, mas são habilitadas a vender energia no ambiente de livre comercialização. A comercialização de energia no ambiente livre é firmada por contratos de compra e venda por submercados, que são Norte, Nordeste, Sul e Sudeste/Centro Oeste [44] . Num cenário mensal, o consumidor final firma um contrato de compra de um volume mensal de energia e o gerador se compromete em injetar aquele volume de energia referente àquele mês na rede elétrica.

Então, quando o consumidor final ultrapassa o consumo de energia contratada, deve comprar o volume da diferença entre o consumido e o contratado no Mercado de Curto Prazo. Dessa forma, fica exposto ao Preço de Liquidação das Diferenças – PLD, que é o valor médio do megawatt-hora, considerando o cumprimento dos contratos de compra e venda de energia no ambiente de livre contratação [45] . Tem como base o Custo Marginal de Operação - CMO, que é o preço base do megawatt-hora gerado, levando em consideração as fontes de energia utilizadas, as condições climáticas e níveis dos reservatórios de água das hidrelétricas e é calculado com modelos matemáticos como *Dessem*, *Decomp* e *Newave* [46] . Dessa forma, o PLD é calculado com dois conjuntos de variáveis: o cumprimento dos contratos de compra e venda de energia e o custo de operação do sistema elétrico por megawatt-hora, aplicando os impostos e encargos das operações.

Da mesma forma que o consumidor final, o gerador que tem contrato de venda de energia no ACL está exposto ao PLD caso não cumpra com o contrato, não injetando o volume de energia contratado. Dessa maneira para cumprir com o contrato com o consumidor, o gerador deve comprar a diferença do volume vendido em contrato e injetado no MCP.

O preço do PLD no MCP varia de forma horária, podendo ser superior ou inferior ao preço do megawatt-hora do contrato. Porém, mesmo na situação em que o megawatt-hora comprado no MCP seja inferior ao preço vendido no contrato, para um gerador que teve restrição de operação, ter que comprar energia para cumprir com o contrato é desvantajoso por haver custos de implantação, de operação e manutenção da usina. Assim o retorno financeiro desse tipo de operação deixa de ser o preço do

megawatt-hora vendido, para ser somente a diferença entre os preços do contratado e comprado no MCP.

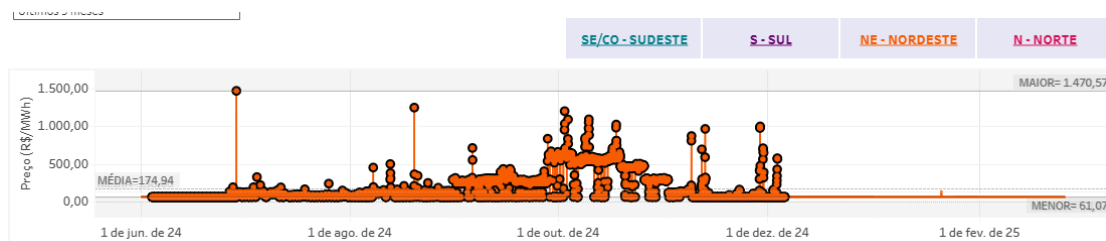
A Figura 23 mostra o histórico do preço médio horário do megawatt-hora no ACL para o submercado Nordeste entre janeiro de 2018 e janeiro de 2025, que abrange o período de início de operação e o período estudado de restrições. O preço médio do megawatt-hora nesse período foi de R\$ 82,06 (oitenta e dois reais e seis centavos). Enquanto a Figura 24 mostra o preço médio do megawatt-hora no período estudado, que foi de R\$ 174,94 (cento e setenta e quatro reais e noventa e quatro centavos), que foi considerado para o estudo. E a Figura 25 mostra os preços do megawatt-hora médio do primeiro dia útil de cada mês subsequente aos meses estudados. Valores que podem ser usados como base para o preço do PLD no MCP, que acontece no início de cada mês.

Figura 23 - Comportamento do PLD entre dezembro de 2021 e 2024.



Fonte: retirado de [47]

Figura 24 - Comportamento do PLD entre junho e dezembro de 2024.



Fonte: retirado de [47]

Figura 25 - PLD no primeiro dia útil de cada mês subsequente do período estudado.

Submercado:	NE - NORDESTE	Submercado:	NE - NORDESTE
Data:	segunda-feira, 1 de julho de 2024	Data:	quinta-feira, 1 de agosto de 2024
Preço Médio (R\$/MWh):	106,45	Preço Médio (R\$/MWh):	70,19
Var % Dia Anterior:	8,50%	Var % Dia Anterior:	1,69%
Var % Mesmo Dia da Semana Anterior:	74,31%	Var % Mesmo Dia da Semana Anterior:	-12,61%

Submercado:	NE - NORDESTE	Submercado:	NE - NORDESTE
Data:	segunda-feira, 2 de setembro de 2024	Data:	terça-feira, 1 de outubro de 2024
Preço Médio (R\$/MWh):	221,66	Preço Médio (R\$/MWh):	460,04
Var % Dia Anterior:	28,69%	Var % Dia Anterior:	34,58%
Var % Mesmo Dia da Semana Anterior:	112,01%	Var % Mesmo Dia da Semana Anterior:	94,42%

Submercado:	NE - NORDESTE	Submercado:	NE - NORDESTE
Data:	sexta-feira, 1 de novembro de 2024	Data:	segunda-feira, 2 de dezembro de 2024
Preço Médio (R\$/MWh):	282,60	Preço Médio (R\$/MWh):	88,95
Var % Dia Anterior:	-2,32%	Var % Dia Anterior:	45,66%
Var % Mesmo Dia da Semana Anterior:	-38,67%	Var % Mesmo Dia da Semana Anterior:	44,67%

Fonte: retirado de [47]

Ao considerar o cenário oposto do primeiro, onde as frustrações de geração eram todas direcionadas a unidade SPP I, nesse caso todas as frustrações de geração sendo direcionadas para as unidades SPP V, SPP VI e SPP VIII, contratadas no ACL pela curva de geração, utilizando o preço médio do PLD desde janeiro de 2022, que foi quando o Complexo entrou em operação, até janeiro de 2025, como preço base para os contratos de venda de energia durante esse período como sendo R\$ 174,94 (cento e setenta e quatro reais e noventa e quatro centavos) por MWh injetado é possível calcular as frustrações dos contratos das unidades.

A Equação 3.4.1 representa a remuneração do conjunto de geradores na condição em que o gerador cumpriu com o contrato, conseguiu injetar o volume contratado e vendeu o excedente de geração no preço médio do PLD no MCP naquele mês e na condição de não haver cumprido com o contrato de venda e ter que comprar o megawatt-hora ao mesmo preço do médio do PLD no MCP daquele mês.

$$R_{total} = E_{cont} * 174,94 + ((E_{ger} - E_F) - E_{cont}) * PLD_{MCP} \quad (3.4.1)$$

Onde:

R_{total} é o equivalente à remuneração total do conjunto em R\$/mês;

E_{cont} é o volume de energia vendido em contrato ao consumidor final no ACL, em MWh/mês;

E_{ger} é o volume de energia estimado de geração para aquele mês em MWh/mês;

E_F é o volume de geração de energia frustrada para aquele mês em MWh/mês;

PLD_{MCP} é o PLD no período de curto prazo no mês de referência.

Para os dois casos, o gerador vai ter remuneração equivalente ao volume de energia do contrato multiplicado pelo valor do MWh contratado, que se utilizou R\$ 174,94 (cento e setenta e quatro reais e noventa e quatro centavos). A diferença é que para o primeiro caso, em que o contrato é cumprido, se soma o valor do volume excedente de geração multiplicado pelo preço do PLD no início do mês subsequente, e para o segundo caso, onde o contrato não é cumprido, é subtraído o volume de geração do volume do contrato multiplicado pelo mesmo PLD.

No mês em que houver frustrações, estas são subtraídas do volume gerado. A Tabela 5 mostra os valores de remuneração mensal do conjunto SPP V, SPP VI e SPP VIII para os meses estudados na condição de que 100% da geração esteja contratada, ou seja, não há excedente. Onde a remuneração total sem frustrações no período estudado seria de R\$ 16.269.636,93 (dezesesseis milhões, duzentos e sessenta e nove mil, seiscentos e trinta e seis reais e noventa e três centavos) e com as frustrações passou a ser R\$ 12.593.734,32 (doze milhões, quinhentos e noventa e três mil, setecentos e trinta e quatro reais e trinta e dois centavos), apresentando R\$ 3.675.902,60 (três milhões, seiscentos e setenta e cinco mil, novecentos e dois reais e sessenta centavos) de frustração financeira. Ao subtrair o valor do montante equivalente ao ressarcimento por frustração devido restrição de operação por indisponibilidade externa, que é calculado em R\$ 998.695,72 (novecentos e noventa e oito mil, seiscentos e noventa e cinco reais e setenta e dois centavos), têm-se R\$ 2.677.206,88 (dois milhões, seiscentos e setenta e sete mil, duzentos e seis reais e oitenta e oito centavos).

Tabela 5 - Comparação da receita com e sem frustrações de geração.

Mês	PLD - Curto Prazo (R\$/MWh)	Frustrações (MWh)	Remuneração com frustrações (R\$)	Remuneração sem frustrações (R\$)
jun/24	R\$ 106,45	999,34	R\$ 1.650.350,24	R\$ 1.756.729,99
jul/24	R\$ 70,19	1868,15	R\$ 2.045.017,94	R\$ 2.176.143,39
ago/24	R\$ 221,66	2965,7	R\$ 2.090.473,74	R\$ 2.747.850,81
set/24	R\$ 460,04	4134,35	R\$ 1.010.207,32	R\$ 2.912.173,70
out/24	R\$ 282,60	2629,04	R\$ 2.601.375,27	R\$ 3.344.341,98
nov/24	R\$ 88,95	1529,93	R\$ 3.196.309,80	R\$ 3.332.397,07
		Total	R\$ 12.593.734,32	R\$ 16.269.636,93

Fonte: Autor.

Como já mencionado, sempre é desvantajoso comprar energia no MCP devido às frustrações para um gerador contratado. Como exemplo, o mês de julho apresentou um PLD inferior ao valor do megawatt-hora contratado e ainda assim, a remuneração foi inferior à que seria a remuneração sem frustrações. Como não é possível saber qual será porcentagem de horas futuras de restrição por indisponibilidade, para fins de dimensionamento de sistema, considera-se os valores de frustrações sem abater o valor de ressarcimento.

Então, direcionando as frustrações de geração para a usina contratada em leilão de energia, que valoradas apresentaram R\$ 2.224.501,53 (dois milhões, duzentos e vinte e quatro mil, quinhentos e um reais e cinquenta e três centavos) de frustração financeira, seria menos desvantajoso do que direcionar as frustrações para as usinas contratadas no ACL na modalidade de venda de volume de energia injetada, que valoradas seriam de R\$ 3.675.902,60 (três milhões, seiscentos e setenta e cinco mil, novecentos e dois reais e sessenta centavos). Porém, nas duas situações, a solução proposta somente mitigaria essas frustrações, pois o preço de venda do megawatt-hora depois de armazenado no *BESS* é o mesmo que o preço de contrato, uma vez que não há diferenciação do preço do megawatt-hora injetado na rede por horário, não trazendo ganhos adicionais.

4 POSSIBILIDADES DE UTILIZAÇÃO DO BESS

Um cenário mais arrojado para possibilitar haver ganhos financeiros para a operação seria em que a geração das três usinas contratadas ou uma parte dela fosse descontratada e estivesse exposto ao PLD para que nos momentos de maior geração em que houvesse restrição de operação, a energia que seria frustrada fosse armazenada e no horário ponta, que é o horário de maior consumo de energia, no qual, normalmente, o PLD está mais caro, essa energia fosse injetada na rede, mas comercializada com valor superior. Porém, esta é uma operação de maior exposição ao PLD e, conseqüentemente, de maior risco.

4.1 Modulação de contratos no ACL

Os contratos firmados entre o vendedor e o comprador no ACL são contratos de natureza privada e confidencial, mas existe a liberdade para cada contrato ter suas especificações quanto a modalidade de contratação, podendo ser por curva de geração, que foi o caso apresentado, ser por energia injetada flat ou por flexibilidade [48] . Há as chamadas modulações de contratos de energia, que consistem na análise da melhor forma de comprar energia no ACL a depender do perfil do consumidor.

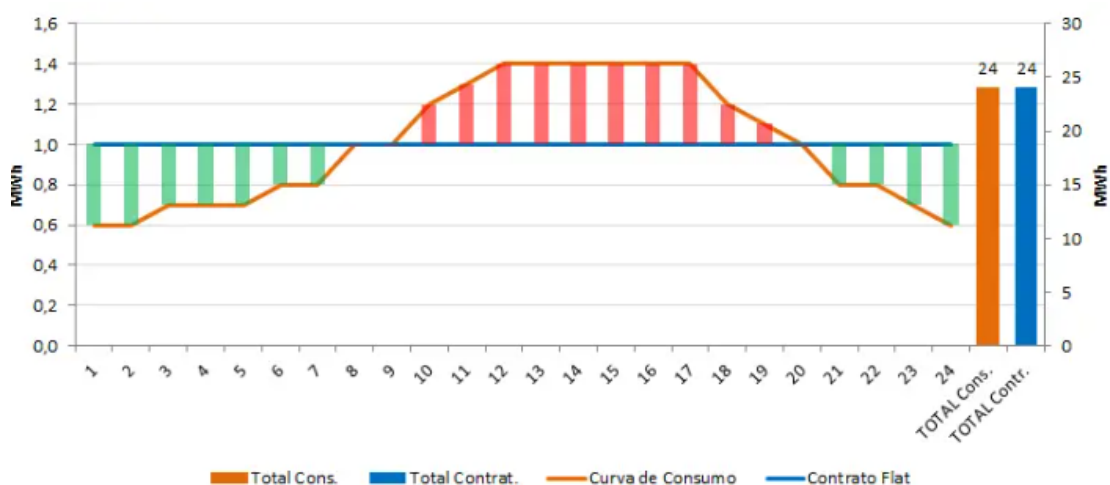
As modulações mais comuns são a modulação *flat*, que é quando o vendedor garante o registro do volume horário de energia naquele valor fixo; a modulação de flexibilidade por porcentagem, onde o vendedor garante o registro de um volume horário dentro do limite estabelecido pela porcentagem e a modulação por perfil de carga, que o vendedor garante o registro horário da energia igual ao registro de consumo do comprador [48] .

A depender da modulação dos contratos, o preço do megawatt-hora pode variar na contratação, pois ora o consumidor assume mais risco de estar exposto ao PLD e ora, o gerador. Para as situações em que o gerador assume em contrato uma modulação em que lhe deixe mais exposto ao PLD, é comum que o preço do megawatt-hora seja superior às situações em que o consumidor esteja mais exposto que o gerador. Das modulações apresentadas, a modulação por curva de carga é a

que o consumidor está menos exposto ao preço do PLD, pois o gerador garante o fornecimento horário de energia equivalente ao consumo do comprador. Dessa forma, os contratos de modulação por perfil de carga acabam estabelecendo um preço de megawatt-hora superior aos de outras modalidades [48] .

A Figura 26 mostra o comportamento diário de um consumidor que possui um contrato de modulação flat. Por mais que o volume total consumido no dia seja igual ao volume total contratado, há momentos em que o consumo é maior e momentos em que o consumo é menor, gerando exposição ao PLD para o consumidor naquele horário. Para situações em que a geração garante suprir todo consumo do comprador, essa não exposição ao PLD, acaba elevando o preço do contrato.

Figura 26 - Curva de consumo a uma modulação de contratação flat.



Fonte: retirado de [49]

A implementação de um *BESS* nas condições atuais de contratação do Complexo Solar São Pedro e Paulo mitigaria as frustrações de geração, mas não traria ganhos adicionais, como já dito e demonstrado na Equação 3.4.1. Pois, independente das dimensões do sistema, para haver ganhos financeiros na implementação, o preço do megawatt-hora vendido depois de armazenado no *BESS* deve ser superior ao preço do megawatt-hora frustrado somado ao *CAPital EXpenditure - Capex*, que é o investimento referente à aquisição e implantação do equipamento dissolvido em um

período de tempo, e o custo de operação e manutenção – O&M do *BESS*. Uma receita adicional para a aplicação do *BESS* seria a prestação de serviços chamados Serviços Ancilares, pois as baterias podem ser utilizadas para oferecer um grau maior de segurança e confiabilidade do sistema.

A rápida atuação das baterias pode ser um fator utilizado para aplicações que envolvem controle de frequência da rede. Mesmo não sendo equipamentos rotativos, elas são capazes de fornecer a chamada inércia sintética ao sistema. Do mesmo modo, a atuação rápida das baterias na injeção de corrente na rede também é capaz de auxiliar na recuperação do equilíbrio do sistema com relação à carga e geração após perturbações na rede. Porém, no Brasil, esses serviços ancilares são realizados de forma mandatória, sem a existência de um mercado no qual os sistemas de armazenamento de energia por baterias possam fazer parte [52] . Dessa forma, considera-se o cenário atual, em que o *BESS* será utilizado para fins de mitigar as frustrações de geração e, sua implementação, trazer ganhos aos contratos já existentes.

$$P_{MWh} > P_{MWh}^F + C_{apex} + O_{pex} \quad (4.1.1)$$

$$ROI = P_{MWh} - P_{MWh}^F - (C_{apex} + O_{pex}) \quad (4.1.2)$$

Onde:

P_{MWh} é o preço do megawatt-hora vendido depois de armazenado no *BESS*, em reais;

P_{MWh}^F é o preço do megawatt-hora que não foi injetado quando gerado, em reais;

C_{apex} é o custo do investimento em bens capitais dissolvido em um período pré-estabelecido, em reais;

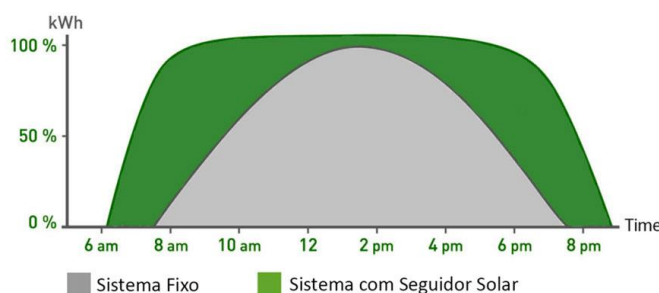
O_{pex} é o custo de mensal para manter o sistema de armazenamento em pleno funcionamento, em reais;

ROI é o retorno financeiro sobre o investimento por megawatt-hora em reais.

Nessa situação, há a diminuição nas frustrações de geração e menos frustrações financeiras. Já no caso em que o megawatt-hora vendido depois de armazenado no sistema tiver o preço superior ao preço do megawatt-hora do contrato atual, além de diminuir as frustrações, traria uma receita adicional ao sistema, restando saber se essa receita somada à mitigação das perdas seria suficiente para ter o retorno do investimento.

Uma possível forma de aumentar o preço do megawatt-hora vendido em contrato sem assumir os riscos da descontratação no ambiente livre seria alterar a modulação de contratação de uma parte do volume gerado para modulação por perfil de carga, onde normalmente o preço do megawatt-hora é mais alto. Para tal, deve-se encontrar um consumidor onde a curva de carga seja resultado da modelação da curva de geração de um sistema fotovoltaico por atuação do *BESS*, onde ele entrasse em operação durante as restrições de operação por *Curtailment*. A Figura 27 representa a curva diária de geração característica de um sistema fotovoltaico. Onde o dito seguidor solar é o que foi definido anteriormente como *tracker*.

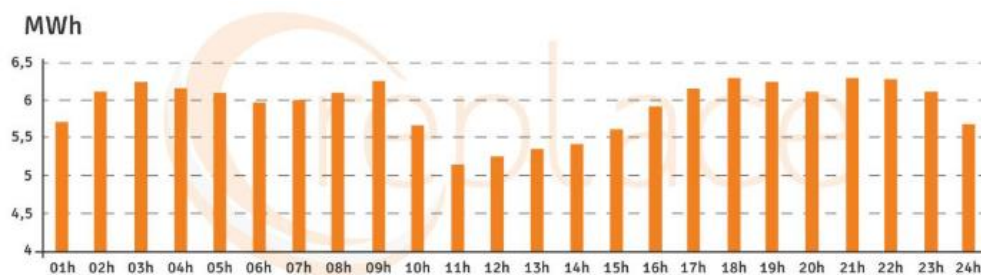
Figura 27 - Curva de geração de um sistema fotovoltaico com e sem tracker.



Fonte: retirado de [50]

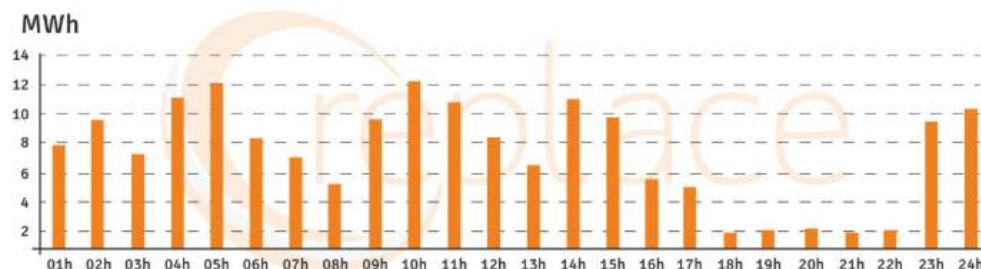
As Figuras 28, 29 e 30 representam gráficos das curvas de carga de três consumidores que podem comercializar energia no ambiente de livre contratação, sendo a indústria, a siderúrgica e o *shopping center*.

Figura 28 - Curva de consumo diário de uma indústria.



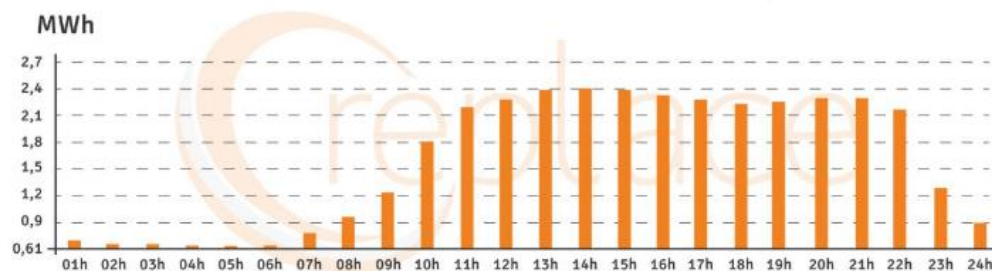
Fonte: retirado de [48]

Figura 29 - Curva de consumo diário de uma siderúrgica.



Fonte: retirado de [48]

Figura 30 - Curva de consumo diário de um shopping.



Fonte: retirado de [48]

Dos gráficos apresentados, o que tem uma curva de carga que pode ser resultado da modelação da curva de geração do sistema fotovoltaico é o shopping center. Onde, durante metade do dia as curvas se comportam de forma semelhante e na segunda metade do dia, a carga do shopping pode ser compensada pela injeção da energia armazenada no *BESS* durante os horários de geração excedente. Porém, nesse tipo de contratação não se poderia utilizar somente o volume de frustrações, pois há consumo de energia durante o período comum de restrição.

Para garantir um fornecimento de energia em volume adequado no período de maior consumo do shopping, o gerador teria que descontratar durante toda a curva de energia injetada o valor de máximo consumo do shopping, descontratando a energia gerada durante os horários em que não há consumo por parte do shopping, ficando exposto ao PLD. Portanto, não sendo viável a implementação de um *BESS* para atender uma modelação de contrato específica.

Assim, o sistema de armazenamento será dimensionado para duas situações: mitigar as frustrações de geração e analisar a viabilidade econômica da implementação do *BESS* em SPP I (contratada em leilão) ou das usinas contratadas no ACL e mitigar as frustrações de geração e apresentar a possibilidade de ganhos pela descontratação de 7,5% da geração, porcentagem das frustrações frente à referência de geração das usinas contratadas no ACL.

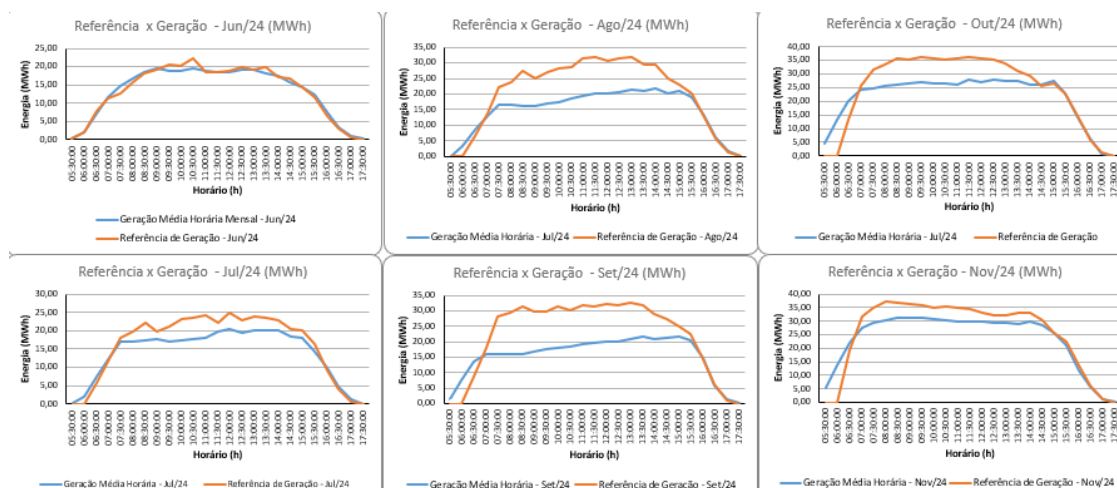
5 GERAÇÃO, FRUSTRAÇÕES E CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO

A Figura 31 representa as curvas de geração de referência e de geração efetiva de um dia característico do Complexo durante os meses estudados. Essas curvas foram traçadas a partir dos dados divulgados pelo ONS. Onde a diferença entre as curvas azuis e as curvas laranjas representam as frustrações médias diárias de um dia característico de cada mês do conjunto de usinas, que seria o volume de energia absorvido e armazenado pelo *BESS* e injetado nos horários que não têm restrição de operação.

Outro ponto importante é que não houve registros de grandes linhas de transmissão ou subestações importantes deixando de operar nas regiões Norte e Nordeste durante esse período, então as curvas apresentadas se diferenciam umas das outras mais pela sazonalidade e fatores climáticos do que propriamente por falhas ou defeitos no sistema.

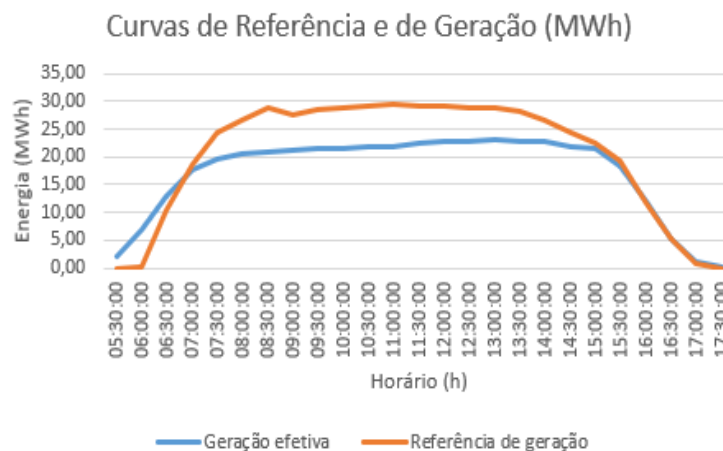
Dessa forma, para não haver superdimensionamento do equipamento e ele não seja utilizado ou operando em condições muito abaixo de sua capacidade, será dimensionado para um dia característico do período utilizando a média das frustrações de todos os dias estudados. A Figura 32 representa as curvas de geração e de referência de um dia característico do período.

Figura 31 - Comportamento de um dia característico de cada mês do período estudado.



Fonte: Autor.

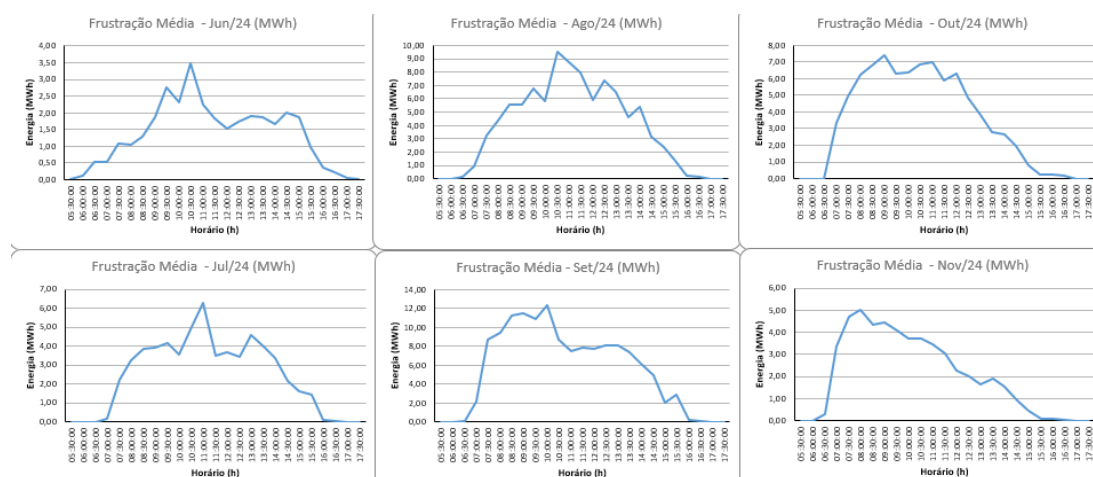
Figura 32 - Comportamento de um dia característico de do período estudado.



Fonte: Autor.

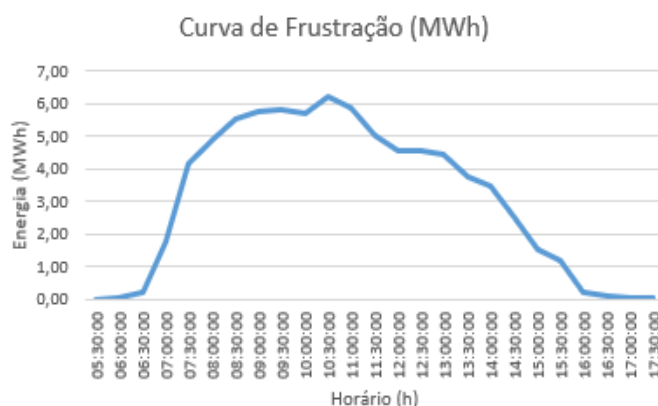
A Figura 33 representa o comportamento horário das frustrações durante um dia característico de cada mês estudado e a Figura 34 representa o dia característico de todo o período de meses estudados.

Figura 33 - Comportamento das frustrações em um dia característico de cada mês do período estudado.



Fonte: Autor.

Figura 34 - Comportamento das frustrações em um dia característico do período estudado.



Fonte: Autor.

O volume médio de frustrações é de 77,14 MWh armazenados entre as 6h30min e as 16h, ou seja, num período de 9 horas e 30 minutos. De acordo com [51] a forma de armazenamento para manter a saúde da bateria é descarregá-lo no máximo até 20% de sua capacidade de armazenamento. Assim, o volume para o qual o *BESS* será dimensionado para os cenários 1 e 2 será de 96,42 MWh, onde 77MWh representa 80% da capacidade. Porém, arredondando para valores comerciais, a capacidade de armazenamento do *BESS* será de 100MWh, onde será utilizado no máximo 80MWh por ciclo.

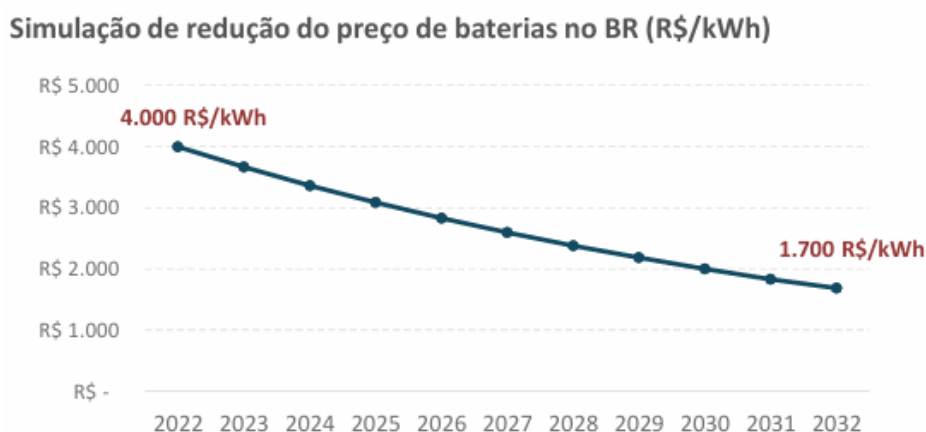
Tabela 6 – Parâmetros de equipamento do BESS.

Parâmetros do BESS	
Capacidade de armazenamento	100 MWh
Potência	100 MW
Capacidade	125 kAh
Vida útil	5.000 ciclos

6 ANÁLISE FINANCEIRA

Ainda não existem normas no Brasil de dimensionamento e regulamentação de baterias para fins de armazenamento dessa dimensão. Assim, o critério a ser usado será a capacidade da bateria. No caso, uma bateria de capacidade de armazenamento próximo de 80MWh por ciclo. A EPE divulgou em julho de 2023 os estudos do Plano Decenal de Expansão de Energia 2032 voltado à micro e minigeração distribuída e baterias e nele é apresentado um gráfico de simulação de preço de baterias entre os anos de 2022 e 2032 no Brasil, já com incidência de tributos [52] . Onde, no meio de 2025 há uma equivalência de R\$ 3.000,00 (três mil reais) por quilowatt-hora de capacidade de bateria, como mostrado na Figura 35.

Figura 35 - Projeção do preço do quilowatt-hora do *BESS* até 2032.



Fonte: retirado de [52]

Dessa forma, a estimativa de preço de uma bateria para atender a capacidade 100MWh seria de aproximadamente R\$ 300.000.000,00 (trezentos milhões de reais).

Para todos os casos estudados considera-se que os terrenos em que as usinas estão localizadas possuem espaço físico suficiente para a implantação do *BESS*, sem necessidade de compra ou arrendamento de uma área de terreno específica para instalar o sistema e, ainda assim, respeitando a Lei nº 12.651/2012, que regulamenta

a porcentagem de 20% de Reserva Legal para propriedades rurais em área de caatinga [53] .

Em agosto de 2024 a EPE divulgou os estudos para o Plano Decenal de Expansão de Energia 2034, onde nele apresenta um custo estimado de O&M de baterias no valor de 100 R\$/kW.ano [54] . O IPCA de 01/2023 a 01/2025 foi de 9,851150%, estando assim em 2025 com o preço de R\$ 109,85 (cento e nove reais e oitenta e cinco centavos).

6.1 Cenário 1

Para o primeiro caso estudado, onde as frustrações de geração estariam direcionadas a unidade SPP I ou SPP V, VI e VIII, as premissas são as seguintes:

- O MWh estando valorado em R\$ 157,47 (cento e cinquenta e sete reais e quarenta e sete centavos), corrigido anualmente por IPCA para a energia contratada em leilão (SPP I);
- O MWh estando valorado em R\$ 174,94 (cento e cinquenta e sete reais e quarenta e sete centavos), corrigido anualmente por IPCA para a energia contratada no ACL (SPP V, SPP VI e SPP VIII);
- O *Capex* do investimento não deve ultrapassar junho de 2030. Prazo limite para a entrega das obras do leilão de transmissão que envolve a SE Bom Nome. O fim das obras do leilão pode ou não zerar as frustrações dos geradores conectados àquela SE. De qualquer forma, com a possibilidade de não haver mais eventos de restrição de operação para o Complexo, o *Capex* será considerado até junho de 2030.
- Considera-se a implantação do *BESS* iniciada e finalizada em junho de 2025;
- Assim como [55] foi definida uma taxa de perda de capacidade de 1% ao ano, baseada em informações de fabricantes.

A Tabela 7 demonstra o volume de energia armazenada no *BESS* durante 5 anos.

Tabela 7 - Volume de armazenamento do *BESS* entre 2025 e 2030.

Volume armazenado durante os anos	
Ano	Energia (MWh)
2025/26	28.156,10
2026/27	27.874,54
2027/28	27.595,79
2028/29	27.319,84
2029/30	27.046,64
Total	137.992,90

Fonte: Autor.

Dividindo o montante de investimento pelo volume de energia que será armazenado durante os cinco anos, tem-se um *Capex* por megawatt-hora de R\$ 2.174,02 (dois mil, cento e setenta e quatro reais e dois centavos) por MWh armazenado, como mostrado na Equação 6.1.1:

$$\text{Preço } BESS \text{ por } MWh = \frac{300.000.000,00 \text{ (R\$)}}{137.992,90 \text{ (MWh)}} = 2.174,02 \text{ R\$/MWh} \quad (6.1.1)$$

Custo do serviço de O&M mensal de cada ano corrigido estimando o IPCA futuro com base no IPCA dos últimos anos [56] . O valor corrigido do O&M de cada ano está na Tabela 8, que apresenta o preço em reais por quilowatt-hora-ano do O&M do *BESS*. E a Equação 6.1.2 esclarece o preço de O&M do MWh armazenado no *BESS*.

Tabela 8 – Custo de O&M do *BESS* entre 2025 e 2030.

Custo de O&M do <i>BESS</i> durante os anos	
Ano	Preço (R\$/kW.ano)
2024	100,00
2025	104,53
2026	109,52
2027	121,19
2028	128,88
2029	135,40
2030	142,17

Fonte: Autor.

O preço médio do O&M do kW.ano entre junho de 2025 e junho de 2030 é R\$ 123,66 (cento e vinte e três reais e sessenta e seis centavos), que é a média ponderada entre os anos, onde para 2025 e 2030 o peso é 0,5, devido ao *BESS* atuar somente durante metade desses anos. Para os 100MWh de capacidade de *BESS*, o preço do O&M é de 1.030.583,30 R\$/mês (um milhão, trinta mil, quinhentos e oitenta e três reais e trinta centavos por mês), ou R\$ 61.834.998,00 (sessenta e um milhões, oitocentos e trinta e quatro mil, novecentos e noventa e oito reais) durante todo período de utilização.

Para encontrar o custo de operação e manutenção por megawatt-hora armazenado no *BESS*, dividiu-se o preço do O&M do *BESS* durante todo período pelo volume total a ser armazenado durante os cinco anos. Conforme a Equação 6.1.2:

$$\text{Preço do O\&M por MWh} = \frac{61.834.998,00 \text{ (R\$)}}{137.992,90 \text{ (MWh)}} = 448,10 \text{ R\$/MWh} \quad (6.1.2)$$

Corrigindo os preços do megawatt-hora vendido no leilão e vendido nos contratos do ACL também pelo IPCA, utilizando os índices mencionados, tem-se os valores da Tabela 9.

Tabela 9 - Correção do preço do megawatt-hora dos contratos do Complexo até 2030.

Preço do megawatt-hora corrigido por IPCA		
Ano	Preço megawatt-hora no leilão	Preço megawatt-hora no mercado livre
2025	R\$ 157,47	R\$ 174,94
2026	R\$ 164,99	R\$ 182,36
2027	R\$ 182,58	R\$ 201,79
2028	R\$ 194,16	R\$ 214,59
2029	R\$ 203,99	R\$ 225,45
2030	R\$ 214,18	R\$ 236,72

Fonte: Autor.

Os preços médios do megawatt-hora valorado no leilão e no ACL, na mesma condição de uma média ponderada onde 2025 e 2030 têm peso 0,5 são de R\$ 186,31

(cento e oitenta e seis reais e trinta e um centavos) e R\$ 205,91 (duzentos e cinco reais e noventa e um centavos), respectivamente.

Dessa forma, conforme Equação 4.1.1, para o *BESS* ser viável financeiramente, o megawatt-hora depois de armazenado deveria ter um valor superior a R\$ 2.622,12 (dois mil, seiscentos e vinte e dois reais e doze centavos), que é um valor 14,07 vezes maior que o preço do megawatt-hora vendido em leilão e 12,73 vezes maior que o preço do megawatt-hora vendido nos contratos do ACL, como mostrado na Equação 6.1.3. Para este primeiro caso, o preço do megawatt-hora não injetado quando gerado é nulo, pois não há possibilidade de ser comercializado devido à restrição de operação.

$$P_{MWh} > P_{MWh}^F + C_{apex} + O_{pex} \quad (4.1.1)$$

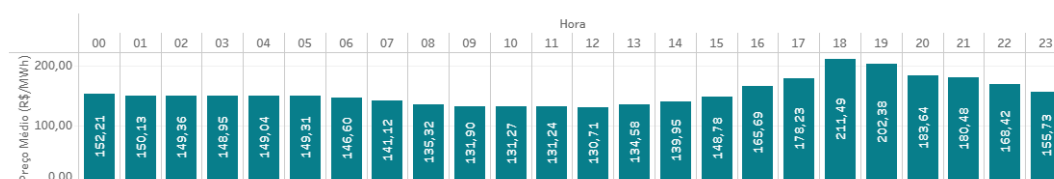
$$P_{MWh} > 0 + 2.174,02 + 448,10 = R\$ 2.622,12 \quad (6.1.3)$$

Porém, esse é o valor médio de todo o período e considerando que ele está corrigido e a relação de preço médio durante o período para o preço inicial é de 18%. Assim, para os contratos iniciais o preço do megawatt-hora a ser vendido seria de R\$ 2.222,14 (dois mil, duzentos e vinte e dois reais e catorze centavos).

6.2 Cenário 2

Para o segundo caso, em que as frustrações são direcionadas para as usinas contratadas no ACL, descontratadas em 7,5%, onde é possível vender essa porcentagem de energia quando o preço do PLD está mais alto, que é no horário de ponta.

Figura 36 - PLD médio horário entre junho de 2024 e fevereiro de 2025.



Fonte: retirado de [47]

A Figura 36 representa o preço do PLD entre junho de 2024 a fevereiro de 2025. Esse período será considerado para análise financeira do segundo caso, onde as premissas são as seguintes:

- Como parte da geração está descontratada, a implementação do *BESS* teria utilidade mesmo após o possível fim das restrições de geração. Dessa forma o *Capex* do *BESS* será dissolvido durante toda vida útil da bateria, que em [28] descreve para a bateria de lítio uma média de 5.000 ciclos;
- A energia frustrada é armazenada durante o período de restrição e injetada na rede durante o horário em que o PLD é mais caro;
- Após a entrega das obras do leilão de transmissão não haverá mais restrições de geração e o *BESS* terá somente a finalidade de armazenar a energia gerada nos horários em que o PLD está mais barato e injetar nos horários em que está mais caro;
- Os valores do PLD e O&M com base no período da Figura 36 e corrigido anualmente pelo IPCA
- Taxa de perda de capacidade também de 1% ao ano (a.a.);
- Considera-se a implantação do *BESS* iniciada e finalizada em junho de 2025.

Os 5.000 ciclos representam 13 anos e 255 dias de atuação do *BESS*. A Tabela 11 apresenta o volume de armazenamento de cada ano desse período, considerando a taxa de perda de capacidade a 1% a.a..

Tabela 10 - Volume de energia armazenada no *BESS* entre 2025 e 2039.

Volume armazenado no <i>BESS</i>	
Ano	Energia (MWh)
2025/26	28.156,10
2026/27	27.874,54
2027/28	27.595,79
2028/29	27.319,83
2029/30	27.046,63
2030/31	26.776,17
2031/32	26.508,40
2032/33	26.243,32
2033/34	25.980,89
2034/35	25.721,08
2035/36	25.463,87
2036/37	25.209,23
2037/38	24.957,14
2038/39	24.707,57
Total	369.560,60

Fonte: Autor.

O *Capex* por megawatt-hora é:

$$\text{Preço por } MWh = \frac{300.000.000,00 \text{ (R\$)}}{369.560,60 \text{ (MWh)}} = 811,77 \text{ R\$/MWh} \quad (6.2.1)$$

A Tabela 11 apresenta os preços de O&M em reais por megawatt-hora-mês de cada ano, considerando o IPCA dos últimos 13 anos.

Tabela 11 - Custo de O&M do *BESS* entre 2025 e 2039.

Custo do O&M do <i>BESS</i> durante os anos	
Ano	Preço (R\$/kW.ano)
2024	100,00
2025	106,79
2026	114,37
2027	122,09
2028	130,02
2029	140,06

Ano	Preço (R\$/kW.ano)
2030	156,98
2031	167,49
2032	172,92
2033	179,97
2034	188,12
2035	197,11
2036	218,11
2037	231,95
2038	243,69
2039	255,87

Fonte: Autor.

O valor médio do O&M por kWh.ano é de R\$ 172,37 (cento e setenta e dois reais e trinta e sete centavos) e o valor de O&M do *BESS* no período de utilização é R\$ 236.123.287,67 (um milhão, quatrocentos e trinta e seis mil, quatrocentos e setenta e cinco reais e setenta e cinco centavos por mês).

$$\text{Preço do O\&M por MWh} = \frac{236.133.000,00 \text{ (R\$)}}{369.560,60 \text{ (MWh)}} = 638,93 \text{ R\$/MWh} \quad (6.2.2)$$

A Tabela 12 representa os preços médios do PLD em horário de pico de consumo onde o PLD está mais caro (18h, 19h e 20h) e em horário de geração frustrada (6h as 16h) corrigidos pelo IPCA. A Figura 36 mostra que o preço médio do PLD entre 18h e 20h é de R\$ 199,17 (cento e noventa e nove reais e dezessete centavos) e entre às 6h e às 16h de R\$139,74 (cento e trinta e nove reais e setenta e quatro centavos), assumindo que o comportamento do PLD horário se manterá na relação, o preço de venda depois de armazenado é 1,425 vezes superior ao preço no período de restrição.

O período estudado agora foi dividido em dois. De junho de 2025 a junho de 2030, onde há *Curtailment* e o preço do megawatt-hora gerado e não injetado é nulo por não haver possibilidade de injeção por restrição. E de junho de 2030 a abril de 2039, que é o fim da vida útil estimada para o *BESS*, onde o preço do megawatt-hora gerado e não injetado é o valor calculado na Tabela 12, pois se considera que não haverá *Curtailment*. O preço do megawatt-hora médio gerado e não injetado durante todo o período é de R\$ 162,16 (cento e sessenta e dois reais e dezesseis centavos),

considerando a média ponderada com 2025 tendo peso 0,5 e 2039, peso 0,3, que é o equivalente até o mês de abril.

Tabela 12 - Correção do preço do megawatt-hora dos contratos do Complexo até 2039.

Ajuste do PLD		
Ano	PLD máximo	PLD geração
2025/26	R\$ 199,17	R\$ 139,74
2026/27	R\$ 212,61	R\$ 149,17
2027/28	R\$ 226,42	R\$ 158,86
2028/29	R\$ 243,91	R\$ 171,13
2029/30	R\$ 273,37	R\$ 191,80
2030/31	R\$ 291,67	R\$ 204,64
2031/32	R\$ 301,14	R\$ 211,28
2032/33	R\$ 313,41	R\$ 219,90
2033/34	R\$ 327,60	R\$ 229,85
2034/35	R\$ 343,25	R\$ 240,83
2035/36	R\$ 379,83	R\$ 266,49
2036/37	R\$ 403,93	R\$ 283,40
2037/38	R\$ 424,37	R\$ 297,74
2038/39	R\$ 445,58	R\$ 312,63

Fonte: Autor.

Conforme a Equação 6.2.3, para o *BESS* ser viável financeiramente, o megawatt-hora depois de armazenado deveria ter um valor superior a R\$ 1.612,89 (um mil, seiscentos e doze reais e oitenta e nove centavos), que é um valor 5,68 vezes maior que o preço do megawatt-hora vendido nos horários em que o PLD está mais caro, que é R\$ 283,91 (duzentos e oitenta e três reais e noventa e um centavos).

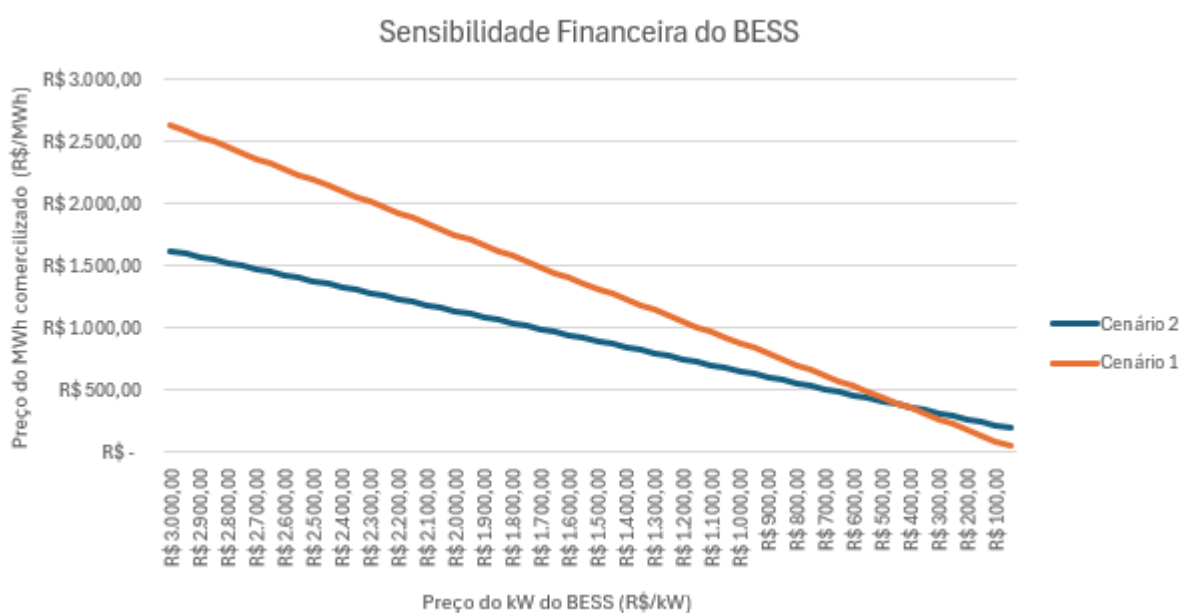
$$P_{MWh} > P_{MWh}^F + C_{apex} + O_{pex} \quad (4.1.1)$$

$$P_{MWh} > 162,16 + 811,77 + 638,96 = 1.612,89 \text{ R\$/MWh} \quad (6.2.3)$$

A relação de preço médio durante o período para o preço inicial é de 42%, assim, o valor do megawatt-hora a ser vendido depois de armazenado no *BESS* é, inicialmente, R\$ 1.135,12 (um mil, cento e trinta e cinco reais e doze centavos).

Ao fim dos 60 meses de atuação do *BESS* na primeira condição o custo total de O&M será de R\$ 61.834.998,00 (sessenta e um milhões, oitocentos e trinta e quatro mil, novecentos e noventa e oito reais), e, ao fim dos 164,38 meses de atuação na segunda condição, o custo será de R\$ 236.133.000,00 (duzentos e trinta e seis milhões, cento e trinta e três mil reais), representando 20,61% e 78,71% do valor de investimento de R\$ 300.000.000,00 (trezentos milhões de reais), respectivamente. Para uma análise de sensibilidade do preço do sistema será considerada a variação do preço do O&M decaindo na mesma proporção do megawatt-hora de capacidade do *BESS*. A Figura 37 mostra o comportamento do preço do megawatt-hora a ser comercializado a partir do preço do megawatt-hora do *BESS* em decaimento.

Figura 37 – Sensibilidade financeira do investimento do *BESS*.



Fonte: Autor.

A partir da análise de sensibilidade, observa-se que para o preço do megawatt-hora comercializado no primeiro cenário, o preço médio do megawatt-hora de capacidade do *BESS* deve ser de R\$ 293,21 (duzentos e noventa e três reais e vinte e um centavos) para a unidade contratada no leilão de energia e de R\$ 265,30 (duzentos e sessenta e cinco reais e trinta centavos) para as unidades contratadas no ACL. Já no segundo cenário, o valor do megawatt-hora de capacidade do *BESS* deve ser R\$ 324,64 (trezentos e vinte e quatro reais e sessenta e quatro centavos).

7 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE

7.1 Conclusões

O *BESS* é um equipamento muito estudado nos últimos anos. O principal cenário de estudo de função de implementação é para o consumidor ou autoconsumidor, armazenando energia no horário fora ponta e fornecendo no horário de ponta, onde a energia é mais cara tanto no mercado cativo quanto no ambiente de livre contratação. Também é estudada a implementação do *BESS* para controle de frequência da rede ou para o auxílio na relação carga x geração do sistema.

A implementação do *BESS* para mitigar as frustrações de geração devido às restrições de operação por *Curtailement* ainda foi pouco estudada no Brasil e apesar de se apresentar como uma solução de armazenamento da energia frustrada, o custo de aquisição e operação de um equipamento dimensionado para atender o caso do Complexo Solar São Pedro e Paulo ainda é consideravelmente elevado para estimativas conservadoras quanto ao preço da energia nos próximos anos. Acontecerá em junho de 2025 o primeiro leilão de sistemas de armazenamento de energia elétrica, utilizando baterias, que promete alicerçar o mercado de armazenamento de energia no país e trazer uma diminuição no preço do *BESS*, podendo até trazer viabilidade financeira para uma operação como essa.

Quando o preço do megawatt-hora de capacidade do *BESS* atingir um valor que seja viável para atender geradores que sofrem com o *Curtailement*, certamente será uma das melhores alternativas para mitigar as frustrações de geração, principalmente em períodos em que o PLD horário varie bruscamente.

7.2 Proposta de continuidade

Outra forma de armazenamento de energia que poderia perfeitamente atender um caso como o estudado é a utilização do hidrogênio verde. A substituição do sistema de armazenamento por baterias pelo suprimento de energia armazenada em forma hidrogênio é uma proposta futura a ser estudada.

REFERÊNCIAS

- [1] BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Nordeste é visto como grande gerador e exportador de energia renovável**. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/nordeste-e-visto-como-grande-gerador-e-exportador-de-energia-renovavel>. Acesso em: 03 jan. 2025.
- [2] BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). **Relatório de Análise de Impacto Regulatório nº 002/2022-SRG/ANEEL**. Brasília, 30 jun. 2022. Versão nº 001 - Pré-Participação Pública.
- [3] BRASIL. **Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL)**. Resolução Normativa nº 1.073, de 12 de setembro de 2023. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/>. Acesso em: 03 jan. 2025.
- [4] BRASIL. Ministério de Minas e Energia (MME). **Região do Vale do São Francisco, na Bahia, ganhará nova transformação e novo pátio em subestação de energia existente**. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/regiao-do-vale-do-sao-francisco-na-bahia-ganhara-nova-transformacao-e-novo-patio-em-subestacao-de-energia-existente>. Acesso em: 04 jan. 2025.
- [5] BRASIL. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Informe Leilão de Transmissão 02/2018**. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-306/Informe%20Leil%C3%A3o%20de%20Transmiss%C3%A3o%2002-2018_final1.pdf. Acesso em: 13 jan. 2025.
- [6] BRASIL. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Leilão de Transmissão nº 001/2024**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/leiloes-de-energia/leiloes-de-transmissao/leilao-de-transmissao-n-001-2024>. Acesso em: 13 mar. 2025.
- [7] OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS). **ONS lança painel com pontos de conexão disponíveis na rede de transmissão até 2029**. Disponível em: <https://www.ons.org.br/paginas/noticias/details.aspx?i=10526>. Acesso em: 22 fev. 2025.
- [8] ARAÚJO, [José Rafael Benigno de Araújo]; FERREIRA, [Rafael da Costa Ferreira]. **Potencial Para Instalação De Sistemas Fotovoltaicos Residenciais Na Região Nordeste**. 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufersa.edu.br/server/api/core/bitstreams/0a671790-bb12-447b-8878-822e5f3dd8f4/content>. Acesso em: 20 jan. 2025.
- [9] CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (CCEE). **Contabilização e liquidação no Mercado de Curto Prazo**. Disponível em: <https://www.ccee.org.br/contabilizacao>. Acesso em: 04 jan. 2025.
- [10] BRASIL. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2032: Micro e Minigeração Distribuída e Baterias**. Brasília:

EPE, 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Decenal-de-Expansao-de-Energia-2032>. Acesso em: 10 mar. 2025.

[11] UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL (UFRGS). **Efeito fotovoltaico**. Disponível em: http://penta3.ufrgs.br/fisica/energia/Energia_solar/efeito_fotovoltaico.html. Acesso em: 20 jan. 2025.

[12] CETESB. **Informações de Radiação**. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/prozonesp/materiais-de-apoio/informacoes-de-radiacao/>. Acesso em: 20 jan. 2025.

[13] INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA (IFSC). **Aula 2 - Eletrônica Geral 1 - Técnico**. Disponível em: https://wiki.ifsc.edu.br/mediawiki/index.php/AULA_2_-_Eletr%C3%B4nica_Geral_1_-_T%C3%A9cnico. Acesso em: 23 jan. 2025.

[14] TODAS AS RESPOSTAS. **O que é camada de depleção e como ela é formada?**. Disponível em: <https://todasasrespostas.pt/o-que-e-camada-de-deplecao-e-como-ela-e-formada>. Acesso em: 22 fev. 2025.

[15] CHAPECALI. **O que é região de depleção?**. Disponível em: <https://chapecali.com.br/glossario/o-que-e-regiao-de-deplecao/>. Acesso em: 23 jan. 2025.

[16] CRESesb. **4. Energia Solar Fotovoltaica**. Disponível em: https://cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&cid=321. Acesso em: 23 jan. 2025.

[17] SHAQUE, K.; SALAM, Z. **An improved modeling method to determine the model parameters of photovoltaic (PV) modules using differential evolution (DE)**. Solar Energy, v. 85, n. 9, p. 2349–2359, set. 2011.

[18] MOHAN, Ned. **Power Electronics: Converters, Applications, and Design**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1995. p. 211.

[19] COSTA, César. **Apostila de Eletrônica de Potência**. Instituto Federal do Rio Grande do Norte (IFRN), [s.d.]. Disponível em: https://professorcesarcosta.com.br/upload/imagens_upload/Apostila-Eletronica-Potencia-IFRN.pdf. Acesso em: 30 jan. 2025.

[20] BARROS, Diego. **Tipos de Nobreak, formas de onda e suas aplicações**. DMESG, 28 nov. 2016. Disponível em: <https://www.dmesg.com.br/tipos-de-nobreak-formas-de-onda-e-suas-aplicacoes/>. Acesso em: 9 mar. 2025.

[21] **Characteristic curves of MPPT: a power–voltage curve and b current–voltage curve**. Disponível em: https://www.researchgate.net/figure/Characteristic-curves-of-MPPT-a-power-voltage-curve-and-b-current-voltage-curve_fig7_278728718. Acesso em: 30 jan. 2025.

[22] SPADUTO, Robson Ruiz; FREITAS, Luiz Carlos Gomes de. **Estudo De Técnicas De Mppt Em Sistemas Fotovoltaicos**. Eletrônica PET UFU, 2013. Disponível em: https://www.peteletricaufu.com.br/static/ceel/doc/artigos/artigos2013/ceel2013_060.pdf. Acesso em: 22 fev. 2025.

[23] WEG. **Sistema fotovoltaico on-grid e off-grid: saiba as diferenças e as vantagens de cada tipo**. Blog WEG Solar, 27 out. 2023. Disponível em: <https://www.weg.net/solar/blog/sistema-fotovoltaico-on-grid-e-off-grid-saiba-as-diferencas-e-as-vantagens-de-cada-tipo/>. Acesso em: 9 mar. 2025.

[24] REVLO. **Rastreamento solar: veja como funciona o tracker solar**. Disponível em: <https://revlo.com.br/rastreamento-solar-veja-como-funciona-o-tracker-solar/>. Acesso em: 30 jan. 2025.

[25] PORTAL SOLAR. **Controlador de Carga: O que é e Qual a Função? Portal Solar**. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/controlador-de-carga>. Acesso em: 9 mar. 2025.

[26] MANUAL DA QUÍMICA. **Baterias**. Disponível em: <https://www.manualdaquimica.com/fisico-quimica/baterias.htm>. Acesso em: 30 jan. 2025.

[27] STA ELETRÔNICA. **Como funciona uma bateria de lítio-íon**. STA Eletrônica. Disponível em: <https://www.sta-eletronica.com.br/artigos/baterias-recarregaveis/baterias-de-litio/como-funciona-uma-bateria-de-litio-ion>. Acesso em: 30 jan. 2025.

[28] ANDRÉ, Francisco Mendes Micaelo. **Dimensionamento de Sistemas Fotovoltaicos com Baterias Ligados à Rede**. 2022. 82 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores) – Universidade NOVA de Lisboa, Lisboa, 2022. Disponível em: https://run.unl.pt/bitstream/10362/141315/1/Andre_2022.pdf. Acesso em: 30 jan. 2025.

[29] 60HZ. **Características da bateria estacionária**. Disponível em: <https://60hz.com.br/caracteristicas-da-bateria-estacionaria/>. Acesso em: 06 fev. 2025.

[30] SOLAR BRASIL. **Você já ouviu falar em ciclo de vida e profundidade de descarga de uma bateria?**. Disponível em: <https://www.solarbrasil.com.br/blog/voce-ja-ouviu-falar-em-ciclo-de-vida-e-profundidade-de-descarga-de-uma-bateria/#:~:text=A%20profundidade%20de%20descarga%20%C3%A9,atinge%20cerca%20de%2010%2C5V>. Acesso em: 06 fev. 2025.

[31] **Curva de capacidade da bateria utilizada em função da corrente de descarga**. Disponível em: https://www.researchgate.net/figure/Figura-3-Curva-de-capacidade-da-bateria-utilizada-em-funcao-da-corrente-de-descarga-34_fig3_303820099. Acesso em: 06 fev. 2025.

[32] PORTAL SOLAR. **Tudo o que você precisa saber sobre a bateria de lítio**. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/tudo-o-que-voce-precisa-saber-sobre-a-bateria-de-litio>. Acesso em: 06 fev. 2025.

[33] WD POWER ENERGY. **Auto descarga em baterias: entendendo o fenômeno e suas implicações**. Disponível em: <https://www.wdpowerenergy.com.br/2024/02/17/auto-descarga-em-baterias-entendendo-o-fenomeno-e-suas-implicacoes/>. Acesso em: 06 fev. 2025.

[34] SOUZA, João Paulo Assunção de. **Análise de Sistemas de Armazenamento de Energia Com Baterias Em Uma Rede Real de Distribuição de Energia em Média Tensão**. 2020. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020.

[35] ResearchGate. **Convenção adotada para fluxos de potências em quatro quadrantes**. ResearchGate, set. 2016. Disponível em: https://www.researchgate.net/figure/Convencao-adotada-para-fluxos-de-potencias-em-quatro-quadrantes_fig1_311359705. Acesso em: 11 mar. 2025.

[36] AGÊNCIA PERNAMBUCANA DE ÁGUAS E CLIMA (APAC PE). **Climatologia por município**. Disponível em: <https://www.apac.pe.gov.br/193-climatologia/521-climatologia-por-municipio>. Acesso em: 30 jan. 2025.

[37] INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Laboratório de Energia Solar e Sistemas Fotovoltaicos – LABREN**. Disponível em: <https://labren.ccst.inpe.br/index.html>. Acesso em: 03 jan. 2025.

[38] PERNAMBUCO. Secretaria de Desenvolvimento Econômico. **Atlas Eólico e Solar de Pernambuco**. Recife: Governo do Estado de Pernambuco, 2017. Disponível em: <http://www.atlaseolicosolar.pe.gov.br/>. Acesso em: 03 jan. 2025.

[39] OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS). **Procedimentos de Rede Vigentes**. Disponível em: <https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-ons/procedimentos-de-rede/vigentes>. Acesso em: 20 jan. 2025.

[40] GLOBAL SOLAR ATLAS. **Mapa de radiação solar**. Disponível em: <https://globalsolaratlas.info/map?c=-7.86777,-37.97406,11&m=site&s=-7.86777,-37.97406>. Acesso em: 30 jan. 2025.

[41] NÓBREGA, Balduino Sonildo da; LIMA, Waleria Guerreiro; MELO, Raphael Henrique Falcão de; AGUIAR, Edvan Cruz; PEREIRA, Rute Cavalcante; OLIVEIRA, Isleimar de Sousa. **Comparação entre sistemas fotovoltaicos em modo fixo e com seguidor em uma instituição pública de ensino no Nordeste do Brasil**. Principia: Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB, João Pessoa, v. 46, p. 182-193, 2019. Disponível em: <https://periodicos.ifpb.edu.br/index.php/principia/article/view/2748/1127>. Acesso em: 20 fev. 2025.

[42] BRASIL. **Lei nº 10.848, de 15 de março de 2004. Dispõe sobre a comercialização de energia elétrica, sobre a criação da Câmara de Comercialização**

de Energia Elétrica – CCEE, e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 16 mar. 2004. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2004-2006/2004/Lei/L10.848.htm. Acesso em: 20 jan. 2025.

[43] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **EPE-DEE-NT-091_2018**. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-110/topico-418/EPE-DEE-NT-091_2018-r0.pdf. Acesso em: 01 fev. 2025.

[44] CCEE. **Preço da Liquidação das Diferenças (PLD)**. Disponível em: <https://www.ccee.org.br/dados-e-analises/dados-pld>. Acesso em: 22 fev. 2025.

[45] CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. **Contabilização**. Disponível em: <https://www.ccee.org.br/contabilizacao>. Acesso em: 22 fev. 2025.

[46] CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. **Conceitos de Preços**. Disponível em: <https://www.ccee.org.br/precos/conceitos-precos>. Acesso em: 22 fev. 2025.

[47] CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. **Painel de Preços**. Disponível em: <https://www.ccee.org.br/precos/painel-precos>. Acesso em: 10 mar. 2025.

[48] REPLACE CONSULTORIA. **Modulação de contratos de energia: entenda a importância para empresas**. Disponível em: <https://replaceconsultoria.com.br/blog/modulacao-de-contratos-de-energia-entenda-a-importancia-para-empresas/>. Acesso em: 22 fev. 2025.

[49] ECOM ENERGIA. **Preço horário e o seu contrato de energia**. Disponível em: <https://ecomenergia.com.br/blog/preco-horario-e-o-seu-contrato-de-energia/>. Acesso em: 22 fev. 2025.

[50] PORTAL SOLAR. **Seguidor solar (tracker): vantagens e desvantagens**. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/seguidor-solar-tracker-vantagens-e-desvantagens>. Acesso em: 22 fev. 2025.

[51] MERISTATION. **El 95% de los dueños no saben por qué su móvil no carga al 100%: las marcas lo ocultan para no asustarnos**. 2023. Disponível em: <https://as.com/meristation/betech/el-95-de-los-duenos-no-saben-por-que-su-movil-no-carga-al-100-las-marcas-lo-ocultan-para-no-asustarnos-n/>. Acesso em: 01 mar. 2025.

[52] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2032: Micro e Minigeração Distribuída e Baterias**. Brasília: EPE, 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Decenal-de-Expansao-de-Energia-2032>. Acesso em: 01 mar. 2025.

[53] BRASIL. **Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012**. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa, estabelece a obrigatoriedade da recuperação de áreas

degradadas e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 25 maio 2012.

[54] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Caderno de Custos de Geração e Transmissão – PDE 2034**. Brasília: EPE, 2024. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-804/topico-709/Caderno%20de%20Custos%20Gera%C3%A7%C3%A3o%20e%20Transmiss%C3%A3o_PDE2034_2024.09.06.pdf. Acesso em: 01 mar. 2025.

[55] INSTITUTO DE TECNOLOGIA PARA O DESENVOLVIMENTO. **Análise de viabilidade técnico-econômica de sistemas de armazenamento de energia elétrica em baterias no setor elétrico brasileiro**. 2022. Disponível em: https://www.bibliotecaiep.org.br/wp-content/uploads/2022/11/319_PT.pdf. Acesso em: 03 mar. 2025.

[56] CORÁ, Blog. **Como reajustar contrato de prestação de serviço? Aprenda**. 2023. Disponível em: <https://blog-test.cora.com.br/blog/como-reajustar-contrato-prestacao-servico/>. Acesso em: 01 mar. 2025.

[57] SOUZA, João Paulo de. **Grid-Zero - Como funciona - suas aplicações e homologação na distribuidora de energia elétrica**. *Ecori Energia Solar*, 13 ago. 2022. Disponível em: <https://www.ecorienergiasolar.com.br/artigo/grid-zero---como-funciona---suas-aplicacoes-e-homologacao-na-distribuidora-de-energia-eletrica>. Acesso em: 15 mar. 2025.