



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA**  
Centro de Energias Alternativas e Renováveis  
Programa de Pós-graduação em Energias Renováveis



**LIANE MARQUES DE OLIVEIRA**

**Sistema de Gestão de Energia Otimizado para  
Maximização do Lucro de uma Usina  
Fotovoltaica com Baterias Aplicado ao  
Mercado de Curto Prazo**

JOÃO PESSOA  
2024

PPGER/MESTRADO ACADÊMICO/ N° 111

LIANE MARQUES DE OLIVEIRA

# **Sistema de Gestão de Energia Otimizado para Maximização do Lucro de uma Usina Fotovoltaica com Baterias Aplicado ao Mercado de Curto Prazo**

Dissertação apresentada à Universidade Federal da Paraíba, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis do Centro de Energias Alternativas e Renováveis, área de concentração em Energias Renováveis, para obtenção do título de Mestre.

Orientador:

Prof. Dr. Italo Roger Ferreira Moreno Pinheiro da Silva.

ESTE TRABALHO CORRESPONDE À VERSÃO  
FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELO(A)  
ALUNO(A) LIANE MARQUES DE OLIVEIRA,  
E ORIENTADA PELO(A) PROF. DR ITALO ROGER  
FERREIRA MORENO PINHEIRO DA SILVA.

**JOÃO PESSOA**  
**2024**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA**  
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIAS RENOVÁVEIS



## ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

ATA nº III da Sessão de Defesa Dissertação do Mestrado Acadêmico do Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis do Centro de Energias Alternativas e Renováveis, Universidade Federal da Paraíba.

Ao vigésimo sétimo dia do mês de fevereiro de dois mil e vinte e quatro foi instalada a Banca de Defesa de Dissertação do Mestrado Acadêmico do Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis do Centro de Energias Alternativas de forma PRESENCIAL, às 10h00, no Auditório do Centro de Energias Alternativas e Renováveis a que se submeteu a defesa pública de **LIANE MARQUES DE OLIVEIRA**, matrícula **20221004199**, com o título “**SISTEMA DE GESTÃO DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA DE UMA USINA FOTOVOLTAICA NO MERCADO DE CURTO PRAZO**”. A Comissão Examinadora esteve constituída pelos professores: ÍTALO ROGER MORENO PINHEIRO DA SILVA (UFPB), LUIZ MOREIRA COELHO JUNIOR (UFPB), VICTOR FELIPE MOURA BEZERRA MELO (UFPB). Concluídos os trabalhos de apresentação e arguição, o(a) candidato(a) foi APROVADA pela Comissão Examinadora. e, para constar, foi lavrada a presente ata, assinada pelos membros da Comissão.

Observações: A discente deverá atender as correções sugeridas pela banca.

Membros da Banca Examinadora:

*Ítalo Rogério Moreno Pinheiro da Silva*  
Prof.ª. Dr.(a) ÍTALO ROGER MORENO PINHEIRO DA SILVA  
Orientador(a)

*Luiz Moreira Coelho Junior*  
Prof. Dr. LUIZ MOREIRA COELHO  
JUNIOR  
Examinador(a) Interno(a)

*Victor Felipe Moura Bezerra Melo*  
Prof. Dr. VICTOR FELIPE MOURA BEZERRA  
MELO  
Examinador(a) Externo(a)

**Catálogo na publicação**  
**Seção de Catalogação e Classificação**

O48s Oliveira, Liane Marques de.

Sistema de gestão de energia otimizado para maximização do lucro de uma usina fotovoltaica com baterias aplicado ao mercado de curto prazo / Liane Marques de Oliveira. - João Pessoa, 2024.

88 f. : il.

Orientação: Italo Roger Ferreira Moreno Pinheiro da Silva.

Coorientação: Flavio da Silva Vitorino Gomes.

Dissertação (Mestrado) - UFPB/CEAR.

1. Energia solar. 2. Precificação de energia. 3. Ultrapassagem da potência - Penalidade. 4. Otimização de receita. 5. Armazenamento de energia. 6. Maximização do lucro. I. Silva, Italo Roger Ferreira Moreno Pinheiro da. II. Gomes, Flavio da Silva Vitorino. III. Título.

**LIANE MARQUES DE OLIVEIRA**

# **Sistema de Gestão de Energia Otimizado para Maximização do Lucro de uma Usina Fotovoltaica com Baterias Aplicado ao Mercado de Energia de Curto Prazo**

Orientador: Italo Roger Ferreira Moreno Pinheiro da Silva

Coorientador: Flavio da Silva Vitorino Gomes

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:

**Prof. Dr. Italo Roger Ferreira Moreno Pinheiro da Silva, Presidente**  
**Departamento de Engenharia de Energias Renováveis/UFPB**

**Prof. Dr. Flavio da Silva Vitorino Gomes**  
**Departamento de Engenharia de Energias Renováveis/UFPB**

**Prof. Dr. Victor Felipe Moura Bezerra Melo**  
**Departamento de Engenharia Elétrica/ UFPB**

**Prof. Dr. Luiz Moreira Coelho Junior**  
**Departamento de Engenharia de Energias Renováveis/UFPB**

João Pessoa, 27 de fevereiro de 2024.

## Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001

Os autores agradecem ao PPGER/CEAR/UFPB, à unidade EMBRAPPII/CEAR/UFPB, e à Huawei Technologies através do projeto de P&D número 1504.11.1021 pelo apoio e financiamento desta publicação.

Gostaria de agradecer, também, este trabalho e a conclusão desse curso as seguintes pessoas:

Primeiramente a Deus por ter me proporcionado forças para passar por todas as adversidades que ocorreram durante esses dois anos.

À minha família, minha mãe Suelda, minha avó Rosa e minha prima Mara por todo o apoio, compreensão e conselhos em todas as etapas desse curso.

A toda família Embrapii, por todo o carinho, ensinamento e compreensão, especialmente, nossa “mãe” Sidneia, Micael, Lucas Haas, Júlia, Prof. Flávio, Prof. Camila e Gustavo.

Ao meu namorado, Herley, por me ouvir sempre e por me aconselhar e ter paciência comigo.

Ao meu orientador Italo R. F. M. P da Silva por todos os ensinamentos passados e compreensão. Aos membros da banca por aceitarem esse convite e repassar considerações valiosas para o trabalho.

Aos meus amigos e colegas que me escutaram durante esse tempo e que sempre me deram forças e apoio para continuar.

E por fim, a todos que de alguma forma contribuíram para elaboração deste trabalho.



## Resumo

As usinas de geração fotovoltaica (UFV), devido à natureza intermitente de sua potência de saída, podem se beneficiar da integração de sistemas de armazenamento de energia por baterias (em inglês, *battery energy storage systems*, BESS). Neste contexto, este trabalho propõe um sistema de gerenciamento de energia otimizado (em inglês, *energy management system*, EMS) para uma operação conjunta de BESS em usinas fotovoltaicas centralizadas (UFV/BESS) visando a maximização do lucro. A otimização da operação do BESS foi realizada a partir do algoritmo genético, e para a formulação do problema foram definidas as seguintes entradas da função custo: o sistema de tarifação de energia; os custos associados à degradação e perda total das baterias; a multa relativa à ultrapassagem da potência máxima contratada. O EMS proposto define a referência para um BESS a ser integrado a uma usina fotovoltaica localizada em Coremas, Brasil. Os resultados foram obtidos a partir de uma arquitetura de simulação semelhante à UFV e demonstraram ganhos financeiros positivos, em comparação com a operação da UFV sem BESS. Na simulação de um ano inteiro de operação, foi possível obter um ganho adicional de receita diária de até 11% e o retorno de investimento obtido foi de 10 anos e 3 meses.

**Palavras-Chave:** Preço de energia, degradação da bateria, penalidade, otimização de receita, aplicação de utilidade, sistema de armazenamento de energia.



## Abstract

Photovoltaic (PV) generation plants, due to the intermittent nature of their output power, can benefit from the integration of battery energy storage systems (BESSs). In this context, this work proposes an optimized energy management system (EMS) for a joint operation of BESS in utility-scale PV plants (PV/BESS) aiming to profit maximization. The optimization of the BESS operation was achieved from the genetic algorithm, and for the problem formulation, the following cost functions were defined in the objective function: the energy pricing system; the costs associated with degradation and total loss of the batteries; the penalty related to exceeding the maximum power contracted. The proposed EMS defines the reference for a BESS to be integrated into a PV plant located in Coremas, Brazil. The results were obtained from a simulation architecture similar to the PV plant and demonstrated positive financial gains, compared to the operation of the PV plant without BESS. In the simulation of a whole year of operation, it was possible to achieve an additional daily revenue gain of up to 11% and the return on investment obtained was 10 years and 3 months.

**Key Word:** Energy pricing, battery degradation, penalty, revenue optimization, utility application, energy storage system.

## SUMÁRIO

<b>AGRADECIMENTOS.....</b>	<b>XIX</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>XXI</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>XXII</b>
<b>LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....</b>	<b>XXVI</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>XXVIII</b>
<b>LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS.....</b>	<b>XXIX</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
1.1 JUSTIFICATIVA.....	20
1.2 OBJETIVO GERAL .....	20
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	20
1.4 DELIMITAÇÃO DO TRABALHO .....	21
1.5 CONTRIBUIÇÕES .....	21
1.6 ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO .....	23
<b>2. REVISÃO DA LITERATURA .....</b>	<b>24</b>
<b>2.1. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>24</b>
2.1.1 <i>Método do algoritmo genético (AG)</i> .....	25
2.1.1.1 Operadores genéticos .....	26
2.1.2 <i>Terminologias e definições relacionadas a baterias</i> .....	26
2.1.3 <i>Mercado de energia brasileiro</i> .....	28
2.1.3.1 Ambientes de contratação .....	28
2.1.3.2 Tipos de contratos .....	28
2.1.3.3 Tratamentos de contrato .....	29
2.1.3.4 Tipos de Energia.....	29
2.1.3.5 Preço da liquidação das diferenças.....	31
2.1.3.6 Balanço energético .....	32
2.2 <i>Revisão bibliométrica</i> .....	32
2.2.1 <i>Metodologia da revisão bibliométrica</i> .....	33
2.2.1.1 Seleção e filtragem do banco de dados .....	34

2.2.1.2.	Análise bibliométrica do portfólio bibliográfico.....	35
2.2.1.3.	Revisão bibliográfica do portfólio bibliográfico.....	35
2.2.2.	RESULTADOS.....	36
2.2.2.1.	Seleção do portfólio bibliográfico final.....	36
2.2.2.2.	Análise bibliométrica .....	39
<b>2.3.</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>45</b>
<b>3.</b>	<b>METODOLOGIA DA PESQUISA.....</b>	<b>50</b>
<b>3.1.</b>	<b>MODELO DE PRECIFICAÇÃO DE ENERGIA .....</b>	<b>50</b>
<b>3.2.</b>	<b>MODELO DE DEGRADAÇÃO DA BATERIA .....</b>	<b>52</b>
<b>3.3.</b>	<b>MODELO DE PENALIDADE .....</b>	<b>55</b>
<b>3.4.</b>	<b>DADOS DE ENTRADA E SOLUCIONADOR DO EMS PROPOSTO .....</b>	<b>56</b>
3.4.1	<i>Dados de entrada .....</i>	57
3.4.2	<i>Solucionador da otimização.....</i>	58
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>61</b>
4.1.	ANÁLISE DO SISTEMA FV/BESS OTIMIZADO.....	61
4.2.	ANÁLISE DO ROI.....	71
4.3.	COMPARAÇÃO DO SISTEMA DE OTIMIZAÇÃO .....	75
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>78</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>79</b>



## Lista de Ilustrações

<b>Figura 1:</b> Funcionamento do time shifting. ....	15
<b>Figura 2:</b> Funcionamento do peak-shaving. ....	16
<b>Figura 3:</b> Preço médio da bateria LFP de 2013-2022. ....	17
<b>Figura 4:</b> Produção de patentes anuais em relação ao ESS. ....	17
<b>Figura 5:</b> Capacidade instalada mundial de armazenamento em baterias (GW). ....	18
<b>Figura 6:</b> Complexo Solar de Coremas localizada no Estado da Paraíba, Brasil. ....	22
<b>Figura 7:</b> Solução ótima em termos financeiros e energéticos por meio de EMS otimizado de UFV/BESS. ....	22
<b>Figura 8:</b> Modulação, Sazonalização e Modulação flat, Sazonalização flat. ....	29
<b>Figura 9:</b> Tipo de energia e desconto TUSD/TUST para UFVs. ....	31
<b>Figura 10:</b> Exposição positiva e negativa ao MCP. ....	32
<b>Figura 11:</b> Fluxograma geral para seleção do PBF. ....	37
<b>Figura 12:</b> Quantitativo de artigos por ano para o banco de artigos total. ....	40
<b>Figura 13:</b> Quantitativo de artigos por ano do PBF. ....	40
<b>Figura 14:</b> Quantitativo de artigos por periódico do PBF. ....	41
<b>Figura 15:</b> Agrupamento dos principais periódicos pela lei de Bradford. ....	41
<b>Figura 16:</b> Gráfico de ocorrência de palavras-chaves no PBF. ....	42
<b>Figura 17:</b> Número de estudos por países. ....	43
<b>Figura 18:</b> Autores do portfólio bibliográfico x quantidade de artigos produzidos. ....	43
<b>Figura 19:</b> Gráfico de relevância dos periódicos na comunidade acadêmica. ....	44
<b>Figura 20:</b> Número de citações dos artigos do portfólio bibliográfico. ´ ....	45
<b>Figura 21:</b> Estrutura geral do mercado energético de curto prazo. ....	51
<b>Figura 22:</b> Ultrapassagem de limite de potência injetada. ....	56
<b>Figura 23:</b> Geração de energia fotovoltaica ( <i>Ppv</i> ) 12-set-2021 e limite de potência contratada <i>Plim</i> . ....	57
<b>Figura 24:</b> Perfil PLD com pequenas variações de valor (01-Jan-2021). ....	58
<b>Figura 25:</b> Diagrama do EMS proposto que é executado todos os dias, destacando os dados de entrada necessários, a configuração do AG e as principais equações usadas na otimização. ....	60
<b>Figura 26:</b> Fluxograma operacional do AG. ....	61

<b>Figura 27:</b> Arquitetura da planta Coremas-IV FV/BESS.....	62
<b>Figura 28:</b> Perfil PLD com grandes variações de valor (12-Set-2021).....	65
<b>Figura 29:</b> Operação da planta FV/BESS para o perfil de geração fotovoltaica do dia 12-Set-2021: potência da rede ( $P_g$ ) , potência BESS ( $P_b$ ), considerando $P_b < 0$ para carregamento e vice-versa, limite de potência contratada ( $P_{lim}$ ) e potência desperdiçada ( $P_{waste}$ ) no cenário de pequenas variações de PLD como mostrado na Figura 25.....	66
<b>Figura 30:</b> Operação da planta FV/BESS para o perfil de geração fotovoltaica do dia 12-Set-2021: potência da rede ( $P_g$ ) , potência BESS ( $P_b$ ), considerando $P_b < 0$ para carregamento e vice-versa, limite de potência contratada ( $P_{lim}$ ) e potência desperdiçada ( $P_{waste}$ ) no cenário de grandes variações de PLD como mostrado na Figura 29. ....	67
<b>Figura 31:</b> Operação ideal da planta FV/BESS para o perfil de geração fotovoltaica do dia 12-Set-2021: visão ampliada da potência do BESS ( $P_b$ ), considerando $P_b < 0$ para carregamento e vice-versa, no cenário de pequenas variações de PLD como mostrado na Figura 25.....	68
<b>Figura 32:</b> Operação ideal da planta FV/BESS para o perfil de geração fotovoltaica do dia 12-Set-2021: visão ampliada da potência do BESS ( $P_b$ ), considerando $P_b < 0$ para carregamento e vice-versa, no cenário de grandes variações de PLD como mostrado na Figura 29. ....	69
<b>Figura 33:</b> ROI para diferentes tamanhos de bateria.....	73
<b>Figura 34:</b> Ganho financeiro da operação otimizada em relação ao sistema original.....	73
<b>Figura 35:</b> Ganho financeiro da operação otimizada em relação à operação de corte de pico. .....	74
<b>Figura 36:</b> Operação da planta FV/BESS para o perfil de geração fotovoltaica do dia 12-Set-2021: potência da rede ( $P_g$ ) , potência BESS ( $P_b$ ), considerando $P_b < 0$ para carregamento e vice-versa, potência fotovoltaica ( $P_v$ ) e potência desperdiçada ( $P_{waste}$ ) no cenário de grandes variações de PLD como mostrado na Figura 29. ....	76
<b>Figura 37:</b> Operação ideal da planta FV/BESS para o perfil de geração fotovoltaica do dia 12-Set-2021: visão ampliada da potência do BESS ( $P_b$ ), considerando $P_b < 0$ para carregamento e vice-versa, no cenário de grandes variações de PLD como mostrado na Figura 29. ....	77

## Lista de Tabelas

<b>Tabela 1:</b> Resumo dos artigos do PBF. ....	38
<b>Tabela 2:</b> Configuração dos parâmetros do AG. ....	59
<b>Tabela 3:</b> Equipamentos da planta FV .....	62
<b>Tabela 4:</b> Parâmetros de entrada para o EMS proposto. ....	62
<b>Tabela 5:</b> Eficiência de saída do BESS. ....	63
<b>Tabela 6:</b> Eficiência de entrada do BESS.....	64
<b>Tabela 8:</b> O ganho financeiro do sistema de produção fotovoltaico durante duas semanas sem BESS e com o funcionamento ótimo do BESS.....	70
<b>Tabela 9:</b> Preços do BESS.....	72
<b>Tabela 10:</b> Análise de variáveis para a viabilidade do sistema FV/BESS com operação peak-shaving, otimizada e sem o BESS para o ano de 2021. ....	74
<b>Tabela 11:</b> Parâmetros para o AG do DEAP. ....	76

## Lista de Siglas e Símbolos

ACR.....	Ambiente de Contratação Regulado
ANEEL. ....	Agência Nacional de Energia Elétrica
ARC. ....	Análise de Redução de Custos do Sistema
BESS. ....	Sistema de Armazenamento de Energia por Baterias
CCEAR. ....	Contratos de Comercialização de Energia no Ambiente Regulado
CCEE.....	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
CDB. ....	Custo de Degradação da Bateria
CIE. ....	Controle Ideal do Sistema de Energia
CMO. ....	Custo Marginal de Operação
DI. ....	Dimensionamento Ideal do Sistema
DMCP. ....	Deslocamento e Minimização de Carga de Pico
DoD. ....	Profundidade de Descarga
EMS. ....	Sistema de Gerenciamento de Energia
EOL. ....	Fim de Vida da Bateria
ESS. ....	Sistema de Armazenamento de Energia
FER. ....	Fontes de Energias Renováveis
<i>FO</i> . ....	Função Objetivo
FV. ....	Energia Fotovoltaica
MC. ....	Método Clássico
MCP. ....	Mercado de Energia de Curto Prazo
MDPQE. ....	Mitigação de Diferentes Problemas de Qualidade de Energia
MHs.....	Métodos Heurísticos
MVU. ....	Melhoria da Vida Útil da Bateria
ONS. ....	Operador Nacional de Sistema Elétrico
PBF. ....	Portfólio Bibliográfico Final
PCHs. ....	Pequenas Centrais Hidrelétricas
PDE 2029. ....	Plano Decenal de Energia de 2029
PLD. ....	Preço de Liquidação das Diferenças
$P_{waste}$ . ....	Potência Residual



ROI. ....	Retorno de Investimento
RTP. ....	Preço em Tempo Real
SIN. ....	Sistema Interligado Nacional
Smart PCS. ....	Conversores de Energia Inteligentes
SPT. ....	Tarifa de Energia Escalonada
STS. ....	Subestações Transformadoras Inteligentes
TIR. ....	Taxa Interna de Retorno
TOU. ....	tempo de uso
TUST. ....	Tarifa de Uso do Sistema de Transmissão
UFV. ....	Usinas de Geração Fotovoltaica
VPL. ....	Valor Presente Líquido
$\Delta t$ (hora). ....	Intervalo de Tempo
$C_b$ (US\$). ....	Preço da Bateria
(Ncycles) (ciclo). ....	Ciclos de Carga e Descarga
$Q$ (MWh). ....	Capacidade Total da Bateria
$C_{AG}$ (US\$). ....	Custo Relacionado ao Impacto do Calendar Aging na Bateria
$C_{BL}$ (US\$). ....	Custo Relacionado à Perda Total da Bateria
$C_{DB}$ (US\$). ....	CDB por Unidade Monetária
$C_{DoD}$ (US\$). ....	Custo Relacionado ao Impacto do DoD na Bateria
$C_{PEN}$ (US\$). ....	Custo da Penalidade
$C_{pursh}$ (US\$). ....	Custo Associado com a Compra de Energia Especial
$C_{sold}$ (US\$). ....	Custo Associado à Venda de Energia não Especial
$E_{cont}$ (MWh). ....	Quantidade de Energia Determinada no Contrato
$E_{mea}$ (MWh). ....	Energia Medida Atualmente
$G_{cont}$ (US\$/MWh). ....	Custo do MWh Definido no Contrato
$G_{PLD}$ (US\$/MWh). ....	Valor do PLD
$P_g$ (MW). ....	Potência Injetada na Rede
$P_i$ (MW). ....	Consumo Interno da Planta de Geração
REP (US\$). ....	Receita da Quantidade de Energia Gerada por Dia
$\delta dr$ (%). ....	Taxa de Desconto
$\delta pi$ (%). ....	Taxa de Aumento de Preço

$\eta_{in}$ (%)	.....	Eficiência Total de Entrada
$(M_{lifetime})$ (mês)	.....	Vida Útil da Bateria
$C_{PEN}$ (US\$)	.....	Custo da Penalidade
$P_{pv}$ (MW)	.....	Potência do Gerador FV
$P_b$ (MW)	.....	Potência da Bateria
$\eta_{out}$ (%)	.....	Eficiência de Saída da Bateria



## 1. INTRODUÇÃO

Com a elevada demanda de energia por todos os setores da sociedade, notou-se também uma busca por um desenvolvimento energético sustentável. Dessa maneira, as fontes de energias renováveis estão sendo cada vez mais adotadas como um meio de solução e substituição para o uso contínuo de combustíveis fósseis na geração de energia (Rana *et al.*, 2022).

As fontes de energias renováveis (FER) são tecnologias promissoras pois trazem diversos benefícios, e não é apenas a redução de emissão de gases de efeito estufa, pois também possibilitam uma maior independência energética, tornando-se essencial para proporcionar aos países uma menor exposição às incertezas geopolíticas, além de menores riscos à grande dependência da volatilidade dos preços dos combustíveis fósseis e menores custos energéticos. Dentre as FER, destaca-se a energia fotovoltaica (FV), considerada uma crescente energética uma vez que garante essa relação de custo-benefício que as fontes renováveis proporcionam (Rotella Junior *et al.*, 2021).

A energia fotovoltaica no Brasil ocupa a 13<sup>o</sup> posição de capacidade instalada no mundo de acordo com a (ABSOLAR, 2022). Ela é responsável por 23,9 GW de potência instalada operacional em 2023 no Brasil. Dentro disso, as usinas fotovoltaicas (UFVs) distribuídas possuem 16 GW dessa capacidade enquanto a UFVs centralizadas se destacam com 7,9 GW de potência produzida (ABSOLAR, 2022).

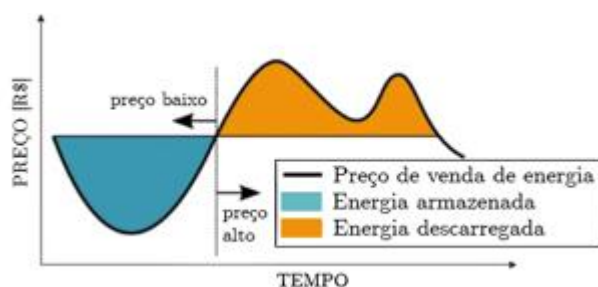
No entanto, um problema relacionado a produção UFV é a intermitência. Isso ocorre, pois, ela depende do comportamento natural do tempo e da localização da planta FV, isto é, a fonte solar só está disponível durante o dia. Dessa forma, esse problema é a principal barreira para sua ampla e exclusiva utilização (Conte *et al.*, 2020). Já em relação a UFVs de grande porte, um limite de potência ativa injetada na rede elétrica é estabelecido por contrato. Este limite está ligado à geração de potência FV de ponta, com isso, o excedente de energia gerada e recursos financeiros são perdidos.

Nesse contexto, o aumento de UFVs centralizadas e distribuídas na rede de energia elétrica altera consideravelmente o cenário de operações das redes de transmissão e distribuição. Somando a isso, especialmente em UFVs de grande escala, uma boa parte da energia gerada que é excedente ao valor de demanda por contrato é perdida (Mejía-Giraldo *et*

*al.*, 2019). Contudo, tais problemas operacionais podem ser melhorados com a utilização do sistema de armazenamento de energia (ESS, em inglês, energy storage system), que garante um fluxo de energia contínuo e ininterrupto agregando à rede elétrica uma energia mais estável e confiável (Rotella Junior *et al.*, 2021).

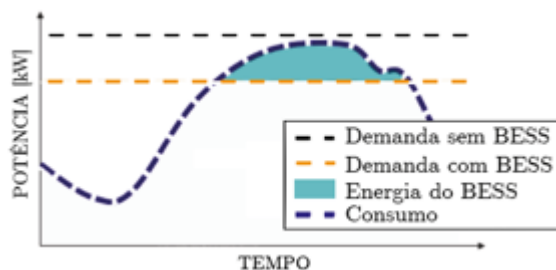
De acordo com Plano Decenal de Energia de 2029 (PDE 2029), há uma tendência de integração do sistema de armazenamento de energia por baterias (BESS, em inglês, battery energy storage system) como suporte à UFV, devido à produção intermitente de eletricidade. O PDE 2029 mostrou a necessidade de fornecer não só energia, mas também potência, e a integração de sistemas de armazenamento de energia pode suprir essa demanda. A utilização de bateria em UFVs de grande porte (UFV/BESS) pode agregar diversos benefícios (Das *et al.*, 2018; Rocha; Salvadori; Gehrke, 2018; Tian *et al.*, 2017) tais como:

- Otimizar o funcionamento da operação do sistema de gerenciamento de energia (EMS, em inglês, energy management system) com base na quantidade de energia contratada entre o gerador (UFV) e o solicitante (consumidores de energia) para armazenar a energia excedente quando a energia gerada for ultrapassada;
- Maximizar o lucro na arbitragem da venda de energia (*time shifting*), ou seja, armazenar energia quando o preço da venda da energia é baixo e descarregar quando o preço da venda da energia for alto como ilustrado na Figura 1;
- Melhoria das características técnicas, financeiras e ambientais do sistema de transmissão, por exemplo, por meio da prestação de serviços auxiliares, acumulação de receitas, redução de picos de energia (*peak shaving*) (garante que o consumidor diminua seus custos com a demanda contratada) como o ilustrado na Figura 2 e redução das emissões de gases de efeito estufa.



**Figura 1:** Funcionamento do *time shifting*.

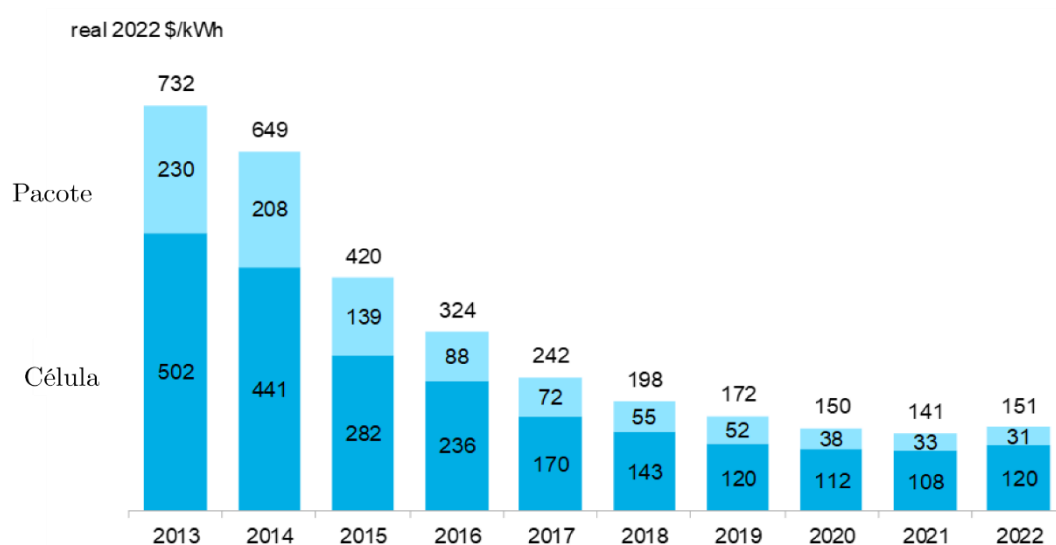
Fonte: (Haas, 2023)



**Figura 2:** Funcionamento do *peak-shaving*.

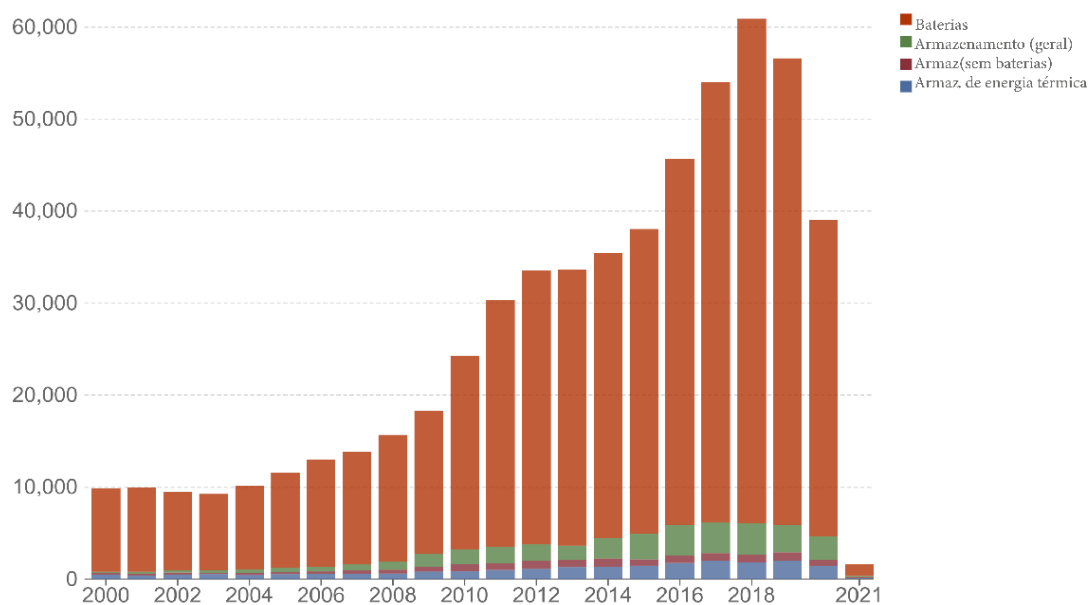
Fonte: (Haas, 2023)

Todavia, uma dificuldade encontrada em respeito ao BESS é os custos atrelados às baterias que ainda são bastante altos, mas que em cenários atuais vem decaindo, como é visto na Figura 3, através da qual se vê que a bateria do tipo íon-lítio-fosfato (LFP, em inglês, *lithium-ion-phosphate*) se sobressai com a redução do seu preço ao longo dos anos e também conforme (Rana *et al.*, 2022) é um das mais utilizadas para tecnologia BESS. Ademais, ainda segundo (Mohammadi; Saif, 2023), as baterias de lítio-íon na última década compõem a maioria do mercado de sistemas de armazenamento de energia. Um fator que contribui para o aumento do uso desse tipo de tecnologia é o crescimento dos estudos voltados para esse tipo de tecnologia. Esse fato é ilustrado na qual é ilustrada a quantidade de patentes que utilizam armazenamento por bateria. Já no que diz respeito ao crescimento mundial de capacidade instalada, na Figura 5 é mostrada sua elevação ao longo dos anos, o que faz com que o uso da bateria LFP seja cada vez mais difundido.



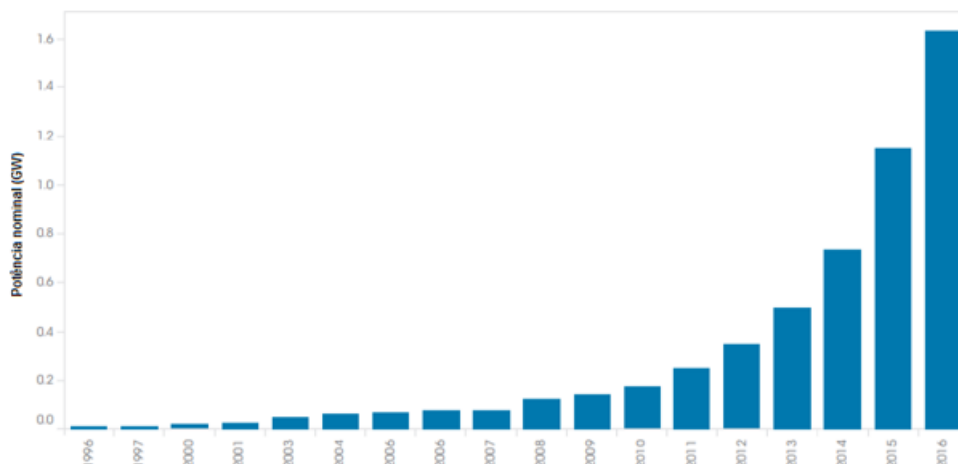
**Figura 3:** Preço médio da bateria LFP de 2013-2022.

Fonte: (BNEF, 2022)



**Figura 4:** Produção de patentes anuais em relação ao ESS.

Fonte: (IRENA, 2022)



**Figura 5:** Capacidade instalada mundial de armazenamento em baterias (GW).

Fonte: (PDE 2029, 2018)

Para otimizar o lucro de um sistema FV/BESS deve-se avaliar a precificação do mercado regional de energia e os arranjos contratuais nos quais a UFV opera. Assim, para o sistema brasileiro de tarifação de energia, devem ser consideradas as diretrizes de comercialização estabelecidas no ambiente de contratação regulado (ACR). Nesse ambiente, os contratos são firmados por meio de leilões entre distribuidoras e unidades geradoras, seja por meio de contrato de disponibilidade ou contrato de geração de energia. Neste último, as responsabilidades relativas às violações de limite no que diz respeito a energia gerada no mercado de energia de curto prazo (MCP), seja para mais ou para menos, bem como o valor determinado pelo contrato de venda, são do vendedor (gerador).

Adicionalmente, as usinas fotovoltaicas com potência de até 50 MW são definidas como fontes especiais incentivadas, que podem vender energia a consumidores especiais (aqueles que compram a energia incentivada) e, assim, se beneficiar de uma Tarifa de Uso do Sistema de Transmissão (TUST) reduzida. Caso a usina ultrapasse seu limite de potência contratada pelo menos quatro vezes no mês, o benefício da TUST é perdido, tornando-se uma fonte convencional especial para aquele mês.

Neste contexto, este trabalho propõe a elaboração de uma solução ótima em termos financeiros e energéticos a partir de um EMS otimizado de usinas FV/BESS. A programação da energia de curto prazo está incluída, resultando na otimização de 24 dados com uma hora de carga/descarga do BESS. O EMS compreende um modelo de otimização com parâmetros e



variáveis de entrada que satisfazem as restrições relacionadas à precificação de energia elétrica, precificação de energia contratada e o custo de degradação da bateria (CDB).

Vale ressaltar que o CDB influencia diretamente na vida útil das baterias, pois há um aumento significativo no custo do sistema devido ao envelhecimento delas, sendo assim necessário analisar e modelar essa restrição na função objetivo para a otimização do sistema. Além disso, o carregamento e descarregamento contínuo das baterias afetam seu ciclo de vida. Portanto, para otimizar sua utilização e minimizar os custos relacionados, os seguintes impactos no desempenho da bateria devem ser considerados na modelagem da bateria: custos para a profundidade de descarga (DoD), custos ligados ao *calendar aging* (custo relacionado ao não funcionamento da bateria) e o custo da queima da bateria (Zia; Elbouchikhi; Benbouzid, 2019).

## 1.1 Justificativa

O processo de otimizar o despacho de energia gerada por meio da atuação conjunta do EMS e o FV/BESS vem como instrumento para utilizar a energia que é armazenada com o intuito de manter a estabilidade da rede elétrica, evitando assim o frequente processo de intermitência na rede elétrica pela geração da usina FV, para contribuir para o crescimento do uso de fontes renováveis como as fotovoltaicas e eólicas atuando como geradoras de energia. Além disso, auxiliar as geradoras na maior obtenção de lucro com a aplicação de processos, a exemplo do *time shifting*.

## 1.2 Objetivo Geral

Estudar e implementar uma estratégia de otimização para um sistema de gerenciamento de energia gerada em um parque solar atuando em conjunto a um sistema de armazenamento de energia, a fim de garantir maximização de lucros.

## 1.3 Objetivos específicos

- Levantar e definir os requisitos para elaboração da função objetivo para otimizar o processo do EMS em sua atuação no FV/BESS;
- Estudar e definir a modelagem do BESS considerando a menor degradação do mesmo durante seu uso;
- Otimizar o despacho do uso do BESS a fim de achar o maior lucro diário, possibilitando a menor degradação das baterias;
- Comparar e comprovar resultados modelagem de otimização para a solução do EMS e para a solução sem o EMS otimizado e fazer uma comparação do algoritmo com ambientes de implementação diferentes;
- Analisar o lucro correspondente obtido e retorno de investimento feito com a obtenção do BESS e o uso do mesmo em conjunto com a usina fotovoltaica.

#### 1.4 Delimitação do Trabalho

A implementação da previsão de geração FV baseada em dados históricos não é desenvolvida neste trabalho. Foi usada a previsão elaborada no projeto de P&D da *Huawei BESS Optimal Dispatch*.

O estudo econômico deste trabalho foi realizado por meio do retorno de investimento, assumindo de partida que a usina FV sem o BESS já possui sua porcentagem de lucro. Desse modo, não foi utilizada outra abordagem econômica pois poderia mudar o rumo desta pesquisa, encontrando respostas que não seriam atreladas aos objetivos das seções 1.2 e 1.3. Além disso, um estudo de viabilidade feito de modo pontual não traria grande apelo científico.

#### 1.5 Contribuições

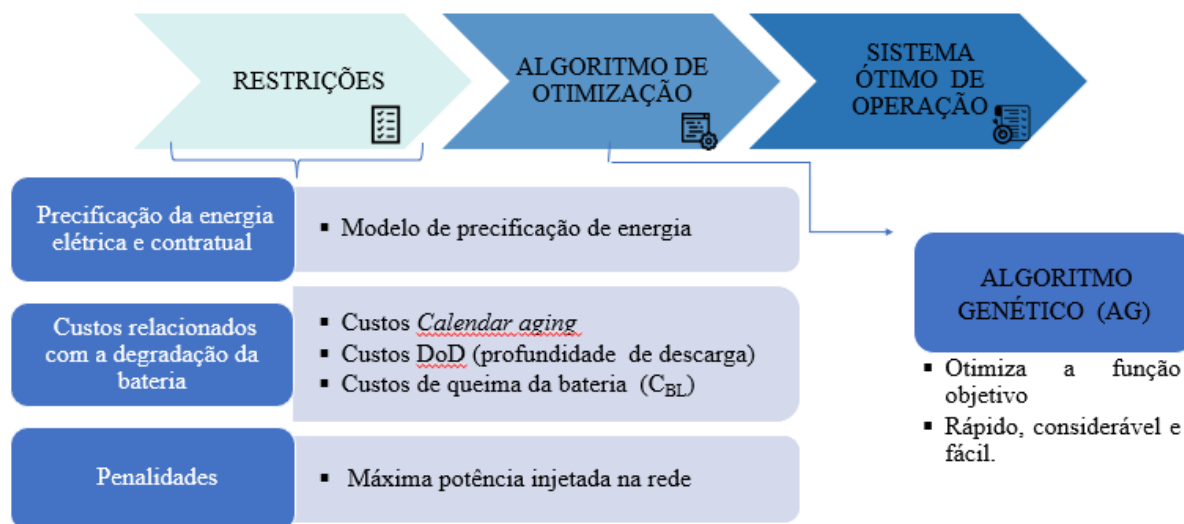
Este trabalho tem como objetivo tornar economicamente viável a aplicação do BESS no sistema elétrico, proporcionando oportunidades para sua regulação e inserção na gestão de geração de energia elétrica e no mercado elétrico. Assim, concentra-se na elaboração de uma função objetivo para maximização do lucro propósitos de uma planta FV/BESS por meio do gerenciamento ótimo de energia. O EMS proposto define o funcionamento de um BESS que será integrado em uma planta fotovoltaica centralizada de 31,2 MWp, localizada na cidade de Coremas, Brasil, que possui contrato de potência de 27 MW. Para validar o funcionamento do EMS, foram realizados testes em uma arquitetura de simulação à central fotovoltaica Coremas-IV, que constitui uma das centrais de geração do Complexo Solar Coremas ilustrado na Figura 6.

No EMS, um otimizador de curto prazo é executado para definir a referência de potência do BESS, retornando as próximas 24 horas com uma operação de intervalo de tempo de uma hora baseada na potência FV prevista. Assim, o otimizador de curto prazo recebe como entrada a potência FV prevista, o modelo de precificação de energia e o modelo CDB. Além disso, a função objetivo proposta considera um modelo de penalidade em caso de violação das restrições de potência ou do contrato de energia. Visando o aumento da receita de geração, o problema de otimização foi resolvido aplicando o algoritmo genético (AG) para maximizar a função objetivo. Todo o modelo é resumido na Figura 7.



**Figura 6:** Complexo Solar de Coremas localizada no Estado da Paraíba, Brasil.

Fonte: (WEG, 2020)



**Figura 7:** Solução ótima em termos financeiros e energéticos por meio de EMS otimizado de UFV/BESS.

Fonte: Autor.

Portanto, as principais contribuições deste trabalho incluem:

- 1 Modelagem do CDB e custos em casos de perda total da bateria;

- 2 Estudo de precificação de mercado para implementação do algoritmo de otimização baseado nas tarifas do sistema de transmissão brasileiro;
- 3 Operação ótima da planta FV/BESS em escala de utilidade pública, incluindo um modelo de penalidade quando a potência contratada é excedida para regulação brasileira.

## 1.6 Organização do Documento

A dissertação foi dividida em quatro capítulos além desta Introdução. O Capítulo 2 corresponde a revisão da literatura, apresentando a revisão bibliográfica, fundamentação teórica e revisão bibliométrica voltados principalmente às discussões sobre o contexto inserido, método de otimização, ao CDB e o mercado de energia brasileiro.

O capítulo 3 que se refere a metodologia do trabalho, que descreve as formulações matemáticas do problema bem como a utilização do AG como método de otimização aplicado ao EMS do sistema FV/BESS.

Os resultados e discussões são vistos no Capítulo 4, que mostrar os resultados obtidos e análises feitas a partir de simulações do modelo de otimização. Para essa análise foram utilizadas simulações de uma semana de funcionamento da usina e o retorno de investimento baseado para todo o ano de 2021. O Capítulo 5 finaliza com as conclusões obtidas e sugestões para trabalhos futuros.

## 2. REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1. Fundamentação teórica

Para o EMS atuar no BESS são necessárias múltiplas variáveis das quais a operação de carga e descarga do BESS irá depender. Esse tipo de projeção de como a potência irá atuar durante o período de 1 dia no futuro não é uma solução fácil de encontrar, sendo necessário definir cada entrada anteriormente mencionada na seção 1.

Nesse contexto, sendo este um problema complexo de resolver pois possui uma alta quantidade de variáveis, se torna praticamente impossível resolver em um tempo favorável através de métodos mais robustos.

É visto que em (Ando *et al.*, 2021), a solução para a interrupção de demanda de energia dos consumidores é realizada por meio do BESS, porém eles utilizam um método de programação linear, o que acaba ocasionando em resultados não tão satisfatórios para essa pesquisa, como o maior esforço computacional para obter uma resposta favorável.

Isso ocorre pois o método utilizado por (Ando *et al.*, 2021) é o método clássico (MC) de otimização de problemas, que possui certas desvantagens como na resolução de problemas complexos em que sua performance é reduzida.

É percebido que na recente literatura estão sendo desenvolvidas modelagens mais complexas do BESS, dando mais ênfase para modelagem de degradação da bateria. Com isso, o uso da bateria pode ser otimizado para se obter um maior lucro ao longo de toda a vida útil desse equipamento. Contudo, essas modelagens complexas do BESS estão mais voltadas para a manutenção da vida útil da bateria, sem focar na sua otimização para obtenção de lucro durante seu uso.

Assim, neste trabalho, buscou-se realizar uma modelagem mais complexa do funcionamento do BESS, buscando integrar otimização do modelo de degradação da bateria junto ao modelo de precificação da energia elétrica, para que se obtivesse um lucro considerável durante todo o tempo de uso da bateria. As equações foram modeladas em MATLAB. Em seguida, foi aplicado o método de otimização de projeção da potência para o BESS.

### 2.1.1 Método do algoritmo genético (AG)

O algoritmo genético foi apresentado pela primeira vez por Bagley e desenvolvido por Holland em 1965 (Chen; Xiao; Wen, 2021; S. Alves *et al.*, 2020), sendo um método de busca probabilístico baseado em processos biológicos de seleção natural e herança genética, que procura a otimização global de forma eficiente e de modo a controlar o processo de procura para conseguir a solução mais vantajosa. O conhecimento da evolução por Darwin colaborou para criação de operadores genéticos com possibilidade de reproduzirem a geração dos seres vivos matematicamente e conseqüentemente em ambiente computacional para uso em algoritmos de otimização. Tais mecanismos podem ser reprodução, mutação, seleção natural, cruzamento e elitismo.

Com isso, buscou-se por um método que trouxesse um tempo computacional reduzido e ao mesmo tempo garantisse melhores resultados. Assim, optou-se pelos métodos heurísticos (MHs), que trazem tais vantagens, por ter estratégias aprimoradas de encontrar o melhor resultado. Para os MHs, cada execução do algoritmo encontra diferentes soluções, sendo assim, indicado "rodar" o algoritmo várias vezes e comparar os seus resultados, a fim de observar a proximidade entre eles. Ademais, os MHs têm a vantagem, como o *script* de otimização heurístico, não ter a necessidade de saber o problema a ser resolvido, o que difere dos métodos considerados como clássicos, que necessitam de um ambiente específico para modelar um problema a ser otimizado, além de precisar do acesso as todas as equações e parâmetros de entrada do problema, de forma que o "solver" consiga desenhar todo o espaço busca, o que torna a modelagem mais difícil de ser feita.

Na literatura, as modelagens do BESS para otimização são simplificadas, descritas em poucos trabalhos, com a maioria voltada para a modelagem clássica. Em (Ando *et al.*, 2021) é utilizado programação linear para programação ótima do BESS para redução da carga que entra na rede elétrica com uma modelagem simples da bateria sem a inclusão de sua degradação durante sua vida útil. Em (Yao; Cai, 2021) também é utilizada programação linear para modelar uma estratégia de alocação ótima de armazenamento de energia, com uma modelagem simplificada do BESS sem inclusão de um modelo de degradação.

Portanto, neste trabalho, o foco foi a utilização do algoritmo genético, que é um MH, buscando otimizar o funcionamento do BESS, considerando manter sua vida útil através de uma performance otimizada.

Nesse sentido, para encontrar uma solução razoável para a função objetivo, foi utilizada a biblioteca *ga* do MATLAB que é responsável por encontrar o máximo da função usando o algoritmo genético (ga, 2023).

Para a obtenção de resultados melhores das saídas requeridas e ditas na seção INTRODUÇÃO, são utilizadas opções dentro dessa biblioteca que ajudam nesse processo do AG.

O cálculo do AG funciona como uma "imitação" do processo de evolução natural das espécies que se dá por meio de mecanismos como seleção e reprodução com mutação (S. Alves *et al.*, 2020). Então, no GA, todas as soluções encontradas são chamadas de espaço de busca para um problema. Assim, o GA examina subconjuntos de soluções chamadas de populações e cada solução é representada por um indivíduo (cromossomo). Cada um deste é codificado através de genes. Durante as iterações do algoritmo, designado por gerações, aplicam-se as opções ou operadores genéticos sobre a população. A primeira população é gerada aleatoriamente e o resultado dela no final das execuções são soluções melhores que as da população inicial.

#### **2.1.1.1. Operadores genéticos**

O operador de seleção natural promove que os indivíduos mais adaptados tenham maior possibilidade de sobreviver e continuar suas características pelas gerações futuras. Para a biblioteca (ga, 2023) a opção de seleção utilizada é a *SelectionFcn*, sendo uma função que seleciona os pais e filhos para a próxima geração.

O cruzamento garante o surgimento de indivíduos não idênticos aos anteriores. Na biblioteca (ga, 2023) a opção para o cruzamento dos indivíduos é o *CrossoverFcn*, responsável por criar dois indivíduos, ou pais, para formar um filho cruzado para a próxima geração .

A mutação funciona a partir de pequenas alterações aleatórias que acontecem nos indivíduos da população para criar filhos de mutação. Ela permite que o AG amplie seu espaço de busca por meio da diversidade genética. A opção dentro da biblioteca (ga, 2023) é o *MutationFcn*.

As opções para a reprodução controlam como o AG cria os filhos para a próxima geração. Nesse caso, é especificada a quantidade de indivíduos dentro de uma determinada população com garantia de sobrevivência para a próxima geração. Dentro do (ga, 2023) o *EliteCount* é a opção que especifica isso.

#### **2.1.2. Terminologias e definições relacionadas a baterias**



As terminologias usadas para descrever algumas características ou propriedades de uma bateria são as seguintes:

- Bateria

Bateria é um dispositivo eletroquímico, formado de várias células, que transformam energia química em energia elétrica e vice-versa. Ela armazena energia elétrica de forma independente, isto é, quando necessária, ela é utilizada (Santos; Macêdo, 2019).

- Estado de carga (SoC)

O estado de carga da bateria está relacionado com o percentual de energia acumulada (carga) que a bateria possui (Santos; Macêdo, 2019).

- Fim da vida (*End of life* - EOL)

O EOL de uma bateria é alcançado quando a bateria não pode fornecer energia conforme os seus requisitos mínimos predefinidos (Santos; Macêdo, 2019).

- Profundidade de descarga (DoD)

A Profundidade de Descarga (*Depth of Discharge* – DoD) é a porcentagem da capacidade da bateria que foi já descarregada (Santos; Macêdo, 2019).

- Capacidade da bateria

A capacidade nominal da bateria é o total de ampères-horas que podem ser retiradas de uma bateria quando ela está sendo totalmente descarregada do estado de carga igual a 100% até sua tensão de corte nominal mínima em uma determinada corrente de descarga. A capacidade é dada através do cálculo de multiplicação da corrente de descarga (ampères) pelo tempo de descarga (em horas) (Santos; Macêdo, 2019).

- Envelhecimento cíclico ou ciclo de vida

É o número de ciclos de carga/descarga que são utilizados antes que a bateria atinja o fim de vida (EOL) (Wu *et al.*, 2022).

- Envelhecimento do calendário (*Calendar aging*)

O *calendar aging* é considerado pois mesmo que nenhum consumidor esteja ligado à bateria (desligada), as reações químicas continuam a acontecer. O *calendar aging* é causado por impurezas. A taxa de *calendar aging* depende principalmente de fatores como temperatura, idade da bateria e umidade (Wu *et al.*, 2022).

### 2.1.3. Mercado de energia brasileiro

A Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) é a instituição responsável por administrar e manter o registro de todos os contratos que acontecerem entre os agentes comercializadores (consumidores e geradores). Para o mundo físico, o Sistema Interligado Nacional (SIN) permite a transmissão de energia entre as regiões, porém, esse intercâmbio de energia entre os submercados possui limitações nas linhas de transmissão por causa da capacidade física dessa. Logo, quando esse limite é atingido, é preciso fazer o uso de fontes de geração locais disponíveis para atender a demanda requerida (CCEE, 2018).

Dessa maneira, a CCEE necessita estar registrando a energia Verificada e Contratada de cada um dos agentes, para o correto processamento dos resultados e da contabilização das diferenças no Mercado de Curto Prazo (MCP). Diante disso, os contratos se caracterizam dentro da CCEE por ambientes de contratação, tipos de contratos e tratamento dos contratos.

#### **2.1.3.1. Ambientes de contratação**

A comercialização de energia ocorre em dois ambientes: no Ambiente de Contratação Regulada (ACR) e no Ambiente de Contratação Livre (ACL).

No ACR, a compra e venda de energia é feita de modo formal por meio de contratos com cláusulas pré-definidas. Além disso, os agentes compradores de energia se comportam de maneira diferente para os dois ambientes. Nesse contexto, para o ACR, as distribuidoras de energia compram energia segundo demanda através de leilões regulados (CCEE, 2018).

No ACL, a comercialização é formalizada por meio de contratos bilaterais, com cláusulas determinadas pelas partes envolvidas na negociação. Já em relação aos agentes compradores são os consumidores livres e podem ser consumidores especiais (CCEE, 2018).

#### **2.1.3.2. Tipos de contratos**

Neste trabalho, o foco é voltado para o ACR. Logo, é importante ressaltar que os contratos formalizados neste ambiente através de leilões são ditos como Contratos de Comercialização de Energia no Ambiente Regulado (CCEAR).

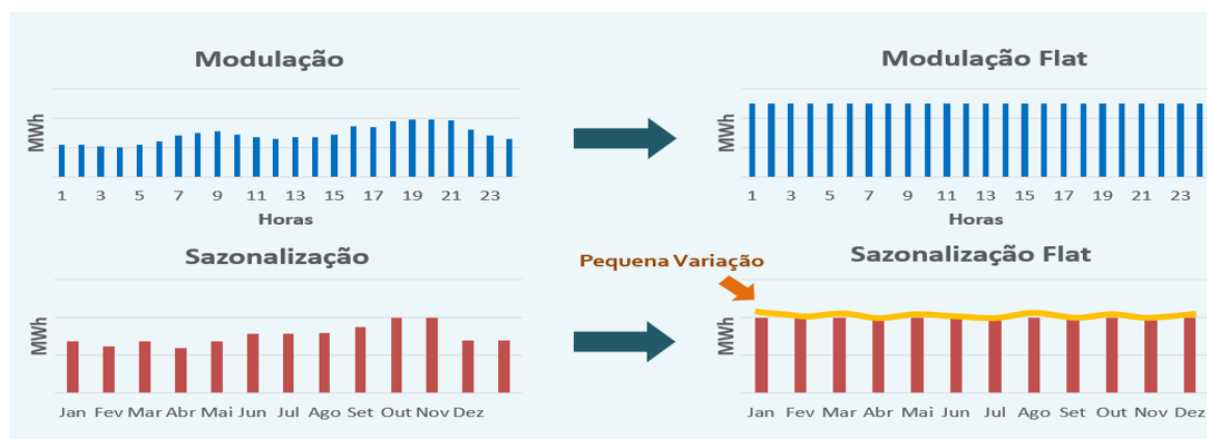
Os CCEAR são divididos em CCEAR por Quantidade ou CCEAR por Disponibilidade. Os primeiros são formalizados por contratos decorrentes da comercialização de energia entre os geradores, principalmente, hidráulicos e as distribuidoras e os riscos hidrológicos são assumidos pelas geradoras (isto é, em períodos de seca, a energia tende a ser mais cara) e é nesse cenário que este trabalho se encontra. Já os por Disponibilidade têm seus contratos

formalizados devido a comercialização de energia entre os geradores de empreendimentos térmicos e fontes alternativas e as distribuidoras, que por sua vez repassam a energia aos consumidores do SIN (CCEE, 2018). É uma modalidade de contrato que alguns riscos são assumidos pelos agentes compradores e eventuais exposições, positivas ou negativas, são assumidas pelos agentes de distribuição, garantindo repasse ao consumidor final.

### 2.1.3.3. Tratamentos de contrato

A contabilização na CCEE é feita por hora e submercado, para o mês em apuração. Desse modo, a CCEE necessita dos montantes contratados em dados mensais e horários conhecidos como Sazonalização e Modulação (CCEE, 2018).

A sazonalização é a distribuição dos volumes anuais de energia contratada, em volumes mensais, dados em MWh. Já a modulação é a distribuição dos volumes mensais de energia contratada, em valores horários. Também há a caracterização *flat* de ambos, no qual a modulação *flat* é dada como a distribuição uniforme dos montantes mensais sobre as horas deste determinado mês. A sazonalização *flat* é a distribuição uniforme dos montantes sobre as horas de um determinado ano. Um exemplo do funcionamento da modulação e sazonalização e seus respectivos caracterizações *flat* é dado na Figura 8.



**Figura 8:** Modulação, Sazonalização e Modulação *flat*, Sazonalização *flat*.

Fonte: (CCEE, 2018).

### 2.1.3.4. Tipos de Energia

Segundo a (CCEE, 2019) existem quatro tipos de energia que podem ser comercializadas:

- Energia incentivada especial

Energia com direito ao desconto na TUSD/TUST contratada pelos consumidores livres e especiais.

- Energia incentivada não especial

Energia com direito ao desconto na TUSD/TUST que pode ser contratada apenas pelos consumidores livres.

- Energia convencional especial

Energia sem direito ao desconto na TUSD/TUST contratada pelos consumidores livres e especiais.

- Energia convencional não especial

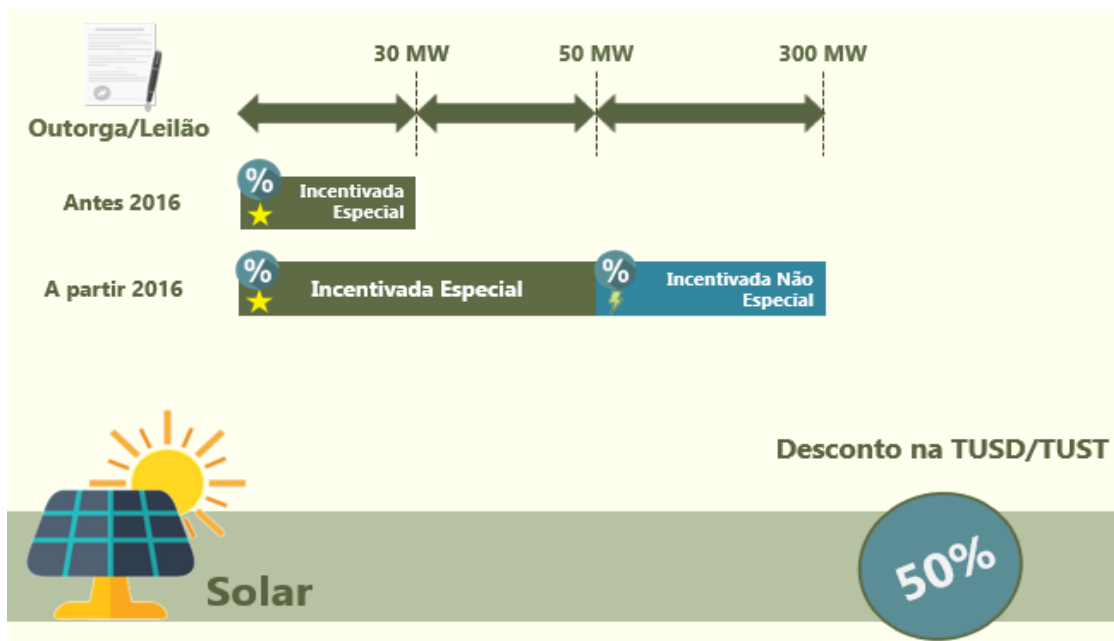
Energia sem direito ao desconto na TUSD/TUST que pode ser contratada apenas pelos consumidores livres.

O consumidor livre se relaciona com uma demanda mínima de 1,5 MW e pode escolher o fornecedor de energia elétrica através da livre negociação. Eles podem adquirir tanto energia convencional quanto incentivada. A energia convencional é a energia gerada em usinas de maior porte, com potência instalada superior a 30 MW (ou 50 MW para alguns casos) como as hidrelétricas e termelétricas (fontes de energia mais tradicionais) (CCEE, 2019).

Já o consumidor especial possui uma demanda entre 500 kW e 1,5 MW e pode obter energia incentivada, sendo ela advinda de pequenas centrais hidrelétricas (PCHs) ou de fontes renováveis como eólica, biomassa ou solar (CCEE, 2019).

Além dos tipos de energia, existem também diferentes níveis de desconto na TUSD/TUST que variam de 50%, 80 % ou 100%. Essas taxas são definidas através de atos regulatórios e pode variar de acordo com o tipo de fonte de energia utilizada. A potência injetada na rede é um fator importante para determinar o valor de desconto e definir o tipo de energia a ser comercializado. Ademais, outro fator característico é o tratamento para usinas com outorga ou participação em leilão anteriores a 2016, e outro para usinas a partir de 2016 (CCEE, 2019).

Nesse caso para as usinas de energia solar o desconto concedido é de 50%. Esse tipo de fonte de geração comercializa energia incentivada especial. Para as UFVs com outorga a partir de 2016, quando a potência injetada ultrapassa os 50 MW, o tipo de energia comercializada é incentivada não especial como explica a Figura 9.



**Figura 9:** Tipo de energia e desconto TUSD/TUST para UFVs.

Fonte: (CCEE, 2019)

### 2.1.3.5. Preço da liquidação das diferenças

O preço da liquidação das diferenças (PLD) serve para valorar as diferenças verificadas no MCP. Para se entender isso, é necessário ressaltar que a comercialização de energia acontece por meio de contratos. A CCEE fica responsável por visualizar o balanço energético entre os agentes. Assim, comparando a energia contratada com a energia medida, é possível observar o montante de energia que será liquidado no MCP (CCEE, 2021).

Todos os agentes são impactados pelo uso do PLD pois ele atua também no cálculo de encargos, a precificação das penalidades e os ressarcimentos previstos no ACR. Uma outra característica relacionada com o PLD é que o SIN é dividido em submercados (5 regiões do Brasil) e são estabelecidos preços para liquidar no MCP diferentes para cada região (CCEE, 2021).

O PLD é apurado com base no Custo Marginal de Operação (CMO), que por outro lado é obtido através dos modelos computacionais utilizados pelo ONS para realizar o planejamento da operação do sistema (CCEE, 2021).

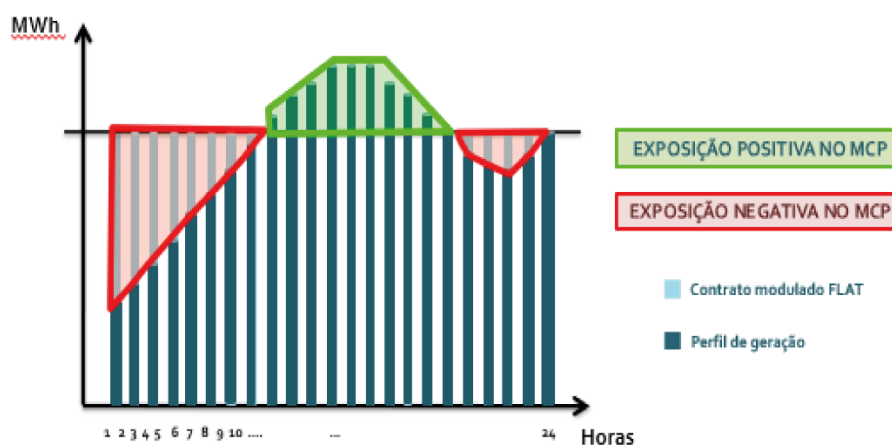
Nesse contexto, o CMO se define como o custo para produzir o próximo MWh. Esse custo serve como referência para determinação do valor do PLD. Há um CMO para cada submercado. Para obtê-lo, o ONS é responsável por realizar uma análise do melhor arranjo das usinas

disponíveis para que se tenha o menor preço de operação, uma vez que a demanda de energia elétrica seja totalmente suprida. Isto é feito a partir de uma previsão de carga do submercado, depois, as informações de capacidades das usinas são empilhadas em ordem crescente de custo, e paralelo a isto, é feita a comparação da previsão de carga que será atendida pela geração destas usinas (CCEE, 2021).

### 2.1.3.6. Balanço energético

O balanço energético é dado pela apuração da diferença entre os valores de energia verificada e energia contratada para cada perfil de agente, levando em conta cada submercado, e todas as horas do mês. A energia verificada é energia medida do perfil de agente, para aquela hora do mês, podendo ser geração ou consumo. Já a energia contratada representa o quanto foi contratado de energia, e observado a diferença entre os contratos de venda – contratos de compra (CCEE, 2020).

Somado a isso, é visto que o resultado de saída do Balanço energético é montante de energia. Podendo ter exposição positiva, negativa ou nula, e o valor final é dado em MWh. Essas exposições são valoradas ao PLD. O funcionamento das exposições é dado na Figura 10. Uma exposição positiva ocorre quando a geração de energia é maior do que a contratada, já uma exposição negativa ocorre quando a geração de energia não consegue atingir a energia necessária em contrato (CCEE, 2020).



**Figura 10:** Exposição positiva e negativa ao MCP.

Fonte: (CCEE, 2020)

## 2.2. Revisão bibliométrica

Segundo (Hannan *et al.*, 2021) o BESS é amplamente utilizado para fornecer diferentes serviços à rede elétrica em diferentes níveis de tensão. Assim, para os sistemas de distribuição,

o armazenamento é usado, principalmente, para suavizar a energia gerada intermitente. Já para os sistemas de transmissão, o principal serviço fornecido é a regulação de frequência. Desse modo, o sistema híbrido FV/BESS é altamente investigado na literatura para múltiplas finalidades, tendo destaque 6 campos de pesquisa principais: melhoria da vida útil da bateria (MVU), análise de redução de custos do sistema FV/BESS (ARC), dimensionamento ideal do sistema (DI), mitigação de diferentes problemas de qualidade de energia (MDPQE), controle ideal do sistema de energia (CIE) e deslocamento e minimização de carga de pico (DMCP).

Portanto, o intuito desta pesquisa é trabalhar em uma revisão bibliométrica focando na minimização de custos do sistema híbrido FV/BESS, que é uma das características da análise ARC, através de uma estratégia de gestão ótima de energia (EMS), que faz parte do campo CIE de estudo. Assim, o objetivo do presente trabalho foram: selecionar um portfólio bibliográfico sobre a otimização de um sistema de gerenciamento de energia de integração FV/BESS para o período de 2018 a 2023, usando as bases de dados *Scopus* e *Web of Science*. Por fim, realizou-se as análises bibliométricas e sistêmica do portfólio bibliográfico selecionado.

#### 2.2.1. Metodologia da revisão bibliométrica

Esta seção se propõe a explicar as etapas que aconteceram para obtenção do portfólio bibliográfico, como o intuito de realizar uma análise bibliométrica sobre o tema em questão. Essa revisão bibliográfica é realizada para fornecer resultados e conhecimentos do assunto, através de avaliação e resumos de quantidades de estudos sobre a pesquisa. Esse trabalho não é realizado de forma aleatória, tendo embasamento científico, de forma confiável e replicável. Posteriormente, é realizada uma análise sistemática que aborda questões relevantes para a pesquisa.

Nesse contexto, com intuito de selecionar um portfólio bibliográfico relevante e com embasamento científico sobre sistema de gerenciamento de energia por meio da otimização de um sistema FV/BESS, foram feitas buscas sistematizadas e filtragens de artigos conforme a metodologia *Proknow-C - Knowledge Development Process - Constructiv*.

O *ProKnow-C* foi uma metodologia criada pelo Laboratório de Metodologia Multicritério de Apoio à Decisão (LabMCDA), sendo composto de quatro etapas principais conforme indica: seleção de um portfólio bibliográfico, análise bibliométrica, análise sistêmica e a pergunta da pesquisa, no qual é possível identificar o estado da arte sobre o tema e também suas lacunas.

Para garantir um entendimento do processo construtivo, a metodologia é dividida em três etapas apresentadas nas subseções 2.2.1.1, 2.2.1.2 e 2.2.1.3.

### 2.2.1.1. Seleção e filtragem do banco de dados

A seleção do banco de dados dos artigos se iniciou através da escolha das palavras-chaves relacionadas com o tema da pesquisa. Para isso, foram escolhidas a *Web of Science* (propriedade da *Clarivate Analytics*) e a *Scopus* (propriedade da *Elsevier*) como base de dados uma vez que fornecem uma variedade de artigos e reconhecida aceitação no meio acadêmico. Atrelado a isso foram reproduzidas muitas tentativas investigativas, utilizando a lógica booleana "AND" entre os campos (i), (ii) e (iii). O sinal ("") foi usado para garantir a sequência exata do enunciado. Logo, foram usadas as seguintes *strings* de busca nessas duas bases citadas:

- (i) Título, palavras-chave e resumo: "photovoltaic";
- (ii) Título, palavra-chave e resumo: "battery energy storage system";
- (iii) Título, palavra-chave e resumo: "optimization".

Para o desenvolvimento do banco de artigos foram filtrados apenas documentos do tipo artigo publicado em periódico, escritos na língua inglesa e com intervalo de tempo das publicações estabelecidos de 2018 a 2023. Essas bases de dados foram consultadas em setembro de 2023. Ademais, foi adotada uma metodologia mais precisa para gerar uma totalidade consistente de artigos e aumentar a relevância das publicações, por conseguinte somente artigos de periódicos foram incluídos para extração de dados. Infere-se então que capítulos de livros, artigos de conferências e outras publicações foram excluídos da análise de dados. A Figura 11 representa a aplicação dos filtros necessários para obter o portfólio relevantes para otimização de um sistema FV/BESS.

Os resultados encontrados com as *strings* de busca foram exportados no formato *BibTex* para o software *RStudio* de ambiente de linguagem *R* que ficou responsável pela retirada das duplicadas das duas bases de dados vistos na Figura 11. Posteriormente, a base de dados de 499 artigos foi passada para o software *Biblioshiny* para ser feita a análise dos dados dos artigos e da base em geral. Isso inclui ano de publicação, principais periódicos, rede de palavras-chaves, número de citações, entre outros. A rede de palavras-chaves foi feita com o apoio do software *VOSViewer*, enquanto a análise de títulos, resumos e relevância científica dos artigos apresentados na Figura 11 foram feitos com o apoio da planilha eletrônica *Excel*. Tais filtros foram seguindo etapas sistematizadas e definidas na metodologia *ProKnown-C*, sendo os mesmos relacionados com o alinhamento de resumos, de títulos, dos tópicos dos textos integrais dos artigos e à disponibilidade dos arquivos na íntegra. Ao finalizar todas as etapas, foi possível



conseguir o portfólio bibliográfico final (PBF). Todas essas etapas podem ser vistas na Figura 11.

A fim de verificar a confiabilidade das palavras-chaves definidas para encontrar artigos que se encaixem no assunto requerido, selecionou-se três artigos do banco de dados total cujos títulos se adequavam com os seguintes critérios:

- parâmetros de inclusão - (i) a pesquisa aborda o FV/BESS como aspecto relevante da análise.
- Parâmetros de exclusão - (i) o artigo não tem o BESS como aspecto-chave da pesquisa, mesmo mencionando esse termo; (ii) o artigo não apresentou um modo de otimizar o sistema FV/BESS; (iii) o artigo estudou exclusivamente outros sistemas de ESS e não o BESS; (iv) BESS utilizado em conjunto com veículos elétricos (VE) sem estarem conectados à rede ou micro-redes. Portanto, verificou-se que o banco de dados dos artigos está alinhado ao objetivo desta pesquisa.

#### **2.2.1.2. Análise bibliométrica do portfólio bibliográfico**

De acordo com a metodologia *ProKnow-C*, o portfólio bibliográfico final é submetido à uma análise bibliométrica. Nesta parte são considerados os seguintes parâmetros:

- Autores;
- Periódicos;
- Palavras-chaves;
- Países de maior destaque do portfólio bibliográfico;
- Periódicos mais citados do portfólio bibliográfico;

#### **2.2.1.3. Revisão bibliográfica do portfólio bibliográfico**

Com intuito de verificar o estado da arte e as lacunas que se referem ao sistema otimizado da integração FV/BESS, foi desenvolvida uma análise sistêmica do conteúdo desses artigos, onde eles foram estudados seguindo os mesmos critérios, através de lentes previamente estabelecidas.

A partir disso, as seguintes lentes de investigação foram abordadas:

- Qual é o contexto em que a pesquisa está inserida em termos de geração de energia?
- Quais são as principais ferramentas e abordagens de otimização para obtenção de um sistema FV/BESS de menor custo ou que garanta um maior lucro?

- Foi utilizada modelo de degradação de bateria, a fim de levar em conta sua vida útil no processo de otimização?

## 2.2.2. Resultados

### 2.2.2.1. Seleção do portfólio bibliográfico final

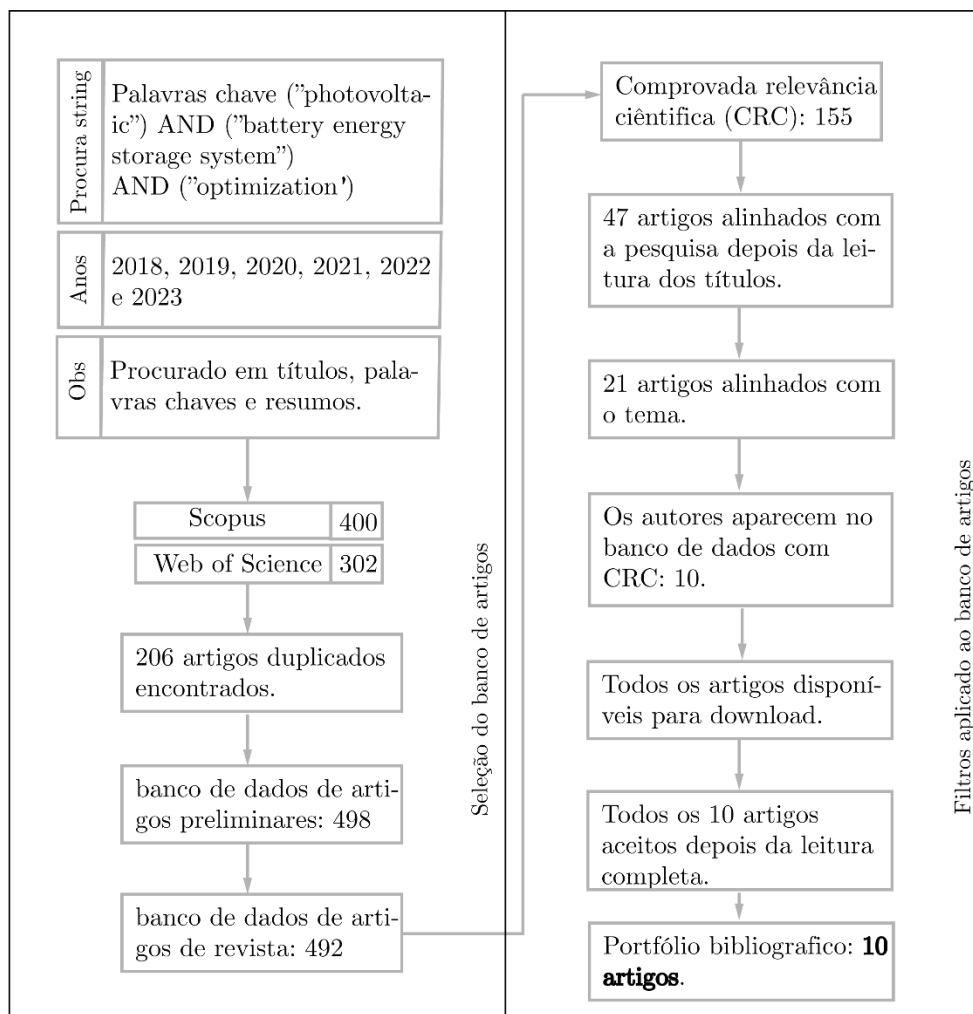
O fluxograma na Figura 11 mostra qualitativa e quantitativamente todas as etapas para chegar ao resultado do portfólio bibliográfico.

Primeiramente são formuladas as *strings* de busca para análise das duas bases de dados pautadas nessa pesquisa. Assim, juntando a base da *Scopus* com a *Web of Science*, foram obtidos, respectivamente, 400 e 302 artigos cada, totalizando em 702 artigos. Todavia, 206 desses artigos são identificados como duplicatas, resultando em um banco de 498 artigos, porém, retirando artigos que não eram de periódicos, obteve-se um total de 496 artigos.

Retomando à seleção do portfólio, foram aplicados filtros na base de dados total, começando pela avaliação de relevância científica, sendo assim, dos 496 artigos, 155 tiveram sua relevância imediatamente confirmada. Depois disso, esses artigos foram filtrados através da leitura dos títulos dos artigos, e observou-se que apenas 47 artigos se encaixavam ao tema da pesquisa.

Em seguida foram lidos os resumos dos artigos para verificar o alinhamento com o objeto da pesquisa, sendo descartados 27 dos 47 artigos resultantes da etapa anterior. Posteriormente, verificou-se a relevância dos autores e foi feita a leitura dos artigos, restando assim, 10 artigos. Por fim, se averiguou os artigos disponíveis para download e todos estavam à disposição. Portanto, o PBF foi formado por 10 artigos no total.

Esses artigos estão detalhados na Tabela 1 e organizados em ordem decrescente do número de citações fornecidos pelas duas bases de dados da *Scopus* e *Web of Science*.



**Figura 11:** Fluxograma geral para seleção do PBF.

Fonte: Autor

**Tabela 1:** Resumo dos artigos do PBF.

<b>Autores (Ano)</b>	<b>Citações (País)</b>	<b>Resumo</b>
(Dai; Liu; Wei, 2019)	83 (China)	O artigo propõe um modelo de otimização para uma estação de carregamento de VE ligados a um sistema FV/BESS a fim de dimensionar o FV e o BESS e determinar o padrão de carga e descarga do BESS. O algoritmo utilizado de otimização é enxame de partículas (PSO).
(Mulleriyawage; Shen, 2020)	81 (Austrália)	O artigo formula um problema de otimização com objetivo de minimizar o custo total anual para investigar os benefícios adicionais da otimização de um BESS em relação à operação do BESS baseada na maximização do autoconsumo (feito pelo próprio consumidor). Os custos são baseados na energia e na degradação da bateria.
(Carli <i>et al.</i> , 2020)	69 (Itália)	O artigo é baseado em uma estratégia de controle que visa um planejamento ótimo simultâneo de cargas controláveis e da troca de energia com a rede. A programação do algoritmo é linear inteira mista para maximizar o autoabastecimento com energia solar e minimizar o custo diário da energia comprada da rede sob preços de energia variável.
(Conte <i>et al.</i> , 2020)	52 (Itália)	O artigo propõe uma estratégia de gestão ótima para um sistema composto por uma bateria e uma central fotovoltaica. Esse sistema fornece energia fotovoltaica e simultaneamente fornece à rede principal uma regulação primária da frequência com base em estatismo. O estado de energia da bateria é controlado por sinais de potência.
(Wu <i>et al.</i> , 2018)	50 (China)	O artigo estuda uma micro-rede ligada à rede com um sistema BESS. Funções quadráticas são feitas para formular as eficiências do BESS no processo de carga e descarga. Dados de previsão de 24h da produção PV e do BESS são usados durante da modelagem. Para minimização de custo operacional é usada programação linear.
(Wu <i>et al.</i> , 2022)	33 (China)	O artigo propõe para sistema FV/BESS uma forma de minimizar o custo do ciclo de vida e foi feito um novo modelo de programação não linear inteira mista considerando degradação da bateria a longo prazo. Este estudo comparou capacidades ótimas da bateria e análises de ciclo de vida.
(Yang <i>et al.</i> , 2020)	32 (China)	O artigo propõe uma estratégia de despacho ideal em dois estágios de um sistema FV/BESS doméstico sob ambiente de mercado de estratégia de preços e uma dinâmica para ajustar a estratégia para lidar com o erro de previsão.

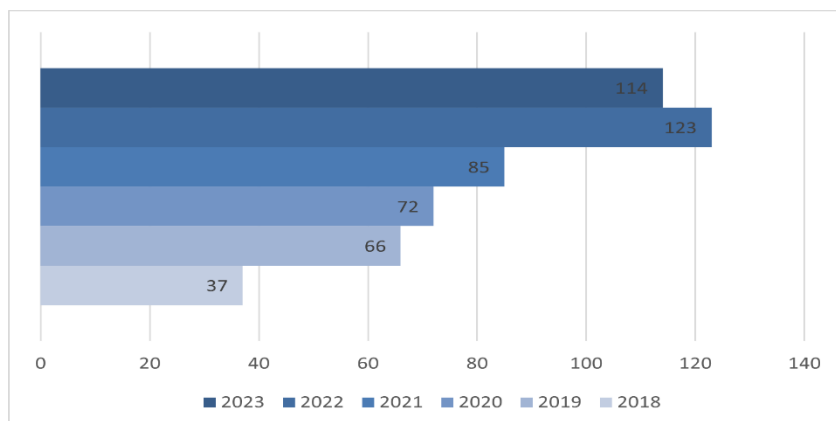
(Conte <i>et al.</i> , 2018)	32 (China)	O artigo propõe uma solução para o planejamento diário de controle em tempo real de sistema FV/BESS com um algoritmo que fornece o perfil ideal de entrega diária de energia com base em uma previsão da produção fotovoltaica. O objetivo é maximizar o ganho econômico.
(Thokar <i>et al.</i> , 2021)	19 (Índia)	O artigo propõe uma estrutura de otimização multiobjetivo desenvolvida para alocação ótima de vários sistemas FV/BESS em redes de distribuição. Com o primeiro objetivo de satisfazer as restrições operacionais. O outro objetivo é garantir a utilização ideal das capacidades do BESS. O algoritmo utilizado é o PSO.
(Bagalini <i>et al.</i> , 2019)	18 (China)	O artigo apresenta um estudo sobre o sistema FV/BESS em uma residência. É feito uma análise econômica para avaliar a rentabilidade dos sistemas residenciais de baterias utilizando o valor presente líquido como indicador de um investimento de 18 anos em que o BESS é substituído duas vezes.

Fonte: Autor

#### 2.2.2.2. Análise bibliométrica

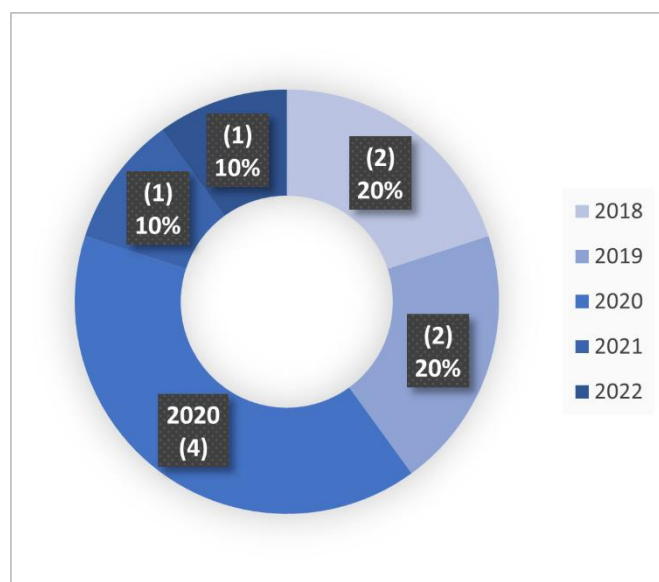
Com relação ao ano de publicação dos artigos, Figura 12 dispõe sobre a quantidade de artigos do banco de artigos total (496 artigos) publicados em cada ano. A partir disso, é observado uma tendência crescente de publicações sobre o tema da pesquisa entre os anos de 2018 e 2022, sendo este último de maior quantidade de publicações. No entanto, em relação ao ano de 2023, é notável que o número de publicações vem se aproximando do ano de 2022, levando em consideração que o ano de 2023 não tinha terminado ainda até o momento em que essa pesquisa bibliográfica foi realizada, é de grande probabilidade que essa tendência de crescimento continue acontecendo ao longo dos próximos anos. Então é de grande valia o crescente interesse em estudos voltados para o sistema de otimização com integração FV/BESS.

A Figura 13 apresenta uma visão geral do percentual anual dos artigos resultantes do PBF escolhido para essa pesquisa.



**Figura 12:** Quantitativo de artigos por ano para o banco de artigos total.

Fonte: Autor

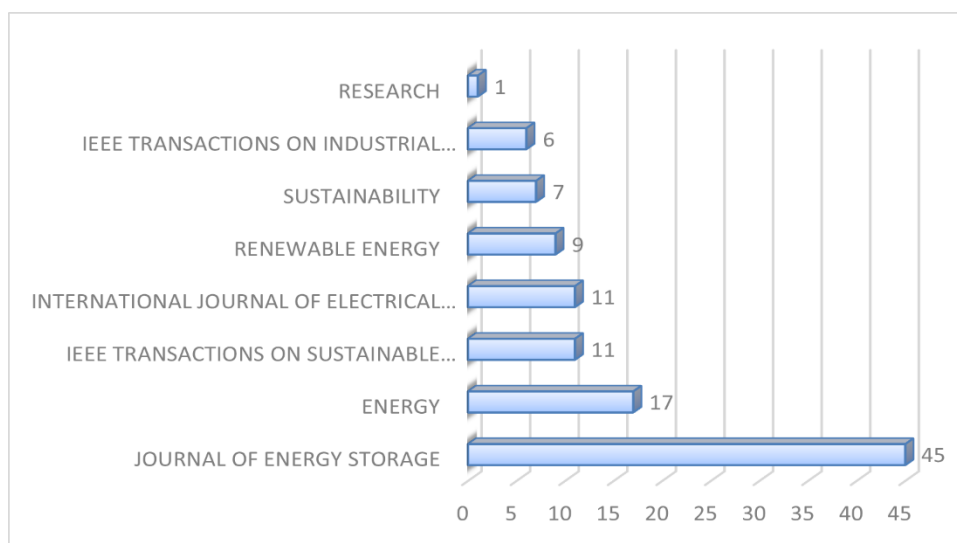


**Figura 13:** Quantitativo de artigos por ano do PBF.

Fonte: Autor

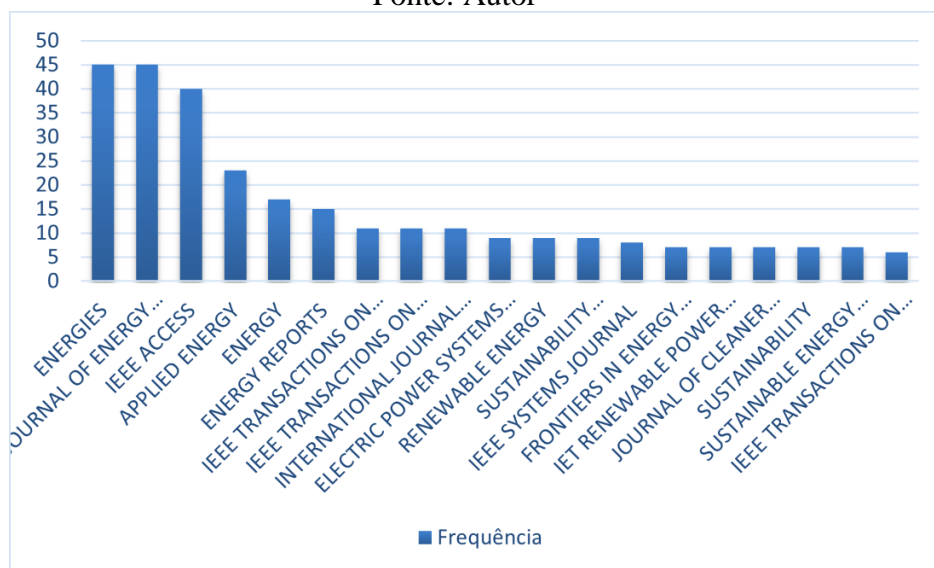
Ao avaliar os periódicos em que os artigos foram publicados na Figura 14, constatou-se que as principais revistas do PBF são *Journal of Energy Storage*, *Energy*, *IEEE Transactions on sustainable Energy*, *Internation Journal of Electrical Power & Energy Systems*. Há uma clara predominância de periódicos que abordam explicitamente a questão energética a partir de abordagens técnicas e financeiras com exceção da *Research* que possui um escopo mais amplo e não se volta apenas para pesquisas relacionadas ao tema energia. Ademais, a revistas *IEEE Transactions on Sustainable Energy* e *Renewable Energy* se destacam em relação às demais, pois englobam quatro dos artigos do portfólio bibliográfico final relacionados na Figura 13.

Além disso, a Figura 15 se baseia na lei de *Bradford* que afirma que há como estimar o grau de relevância de periódicos em uma específica área de conhecimento. Com isso, os periódicos como os mostrados na Figura 15, *Energies* e *Journal of Energy Storage* produzem o maior número de artigos sobre essa determinada pesquisa e formam um núcleo de periódicos, supostamente de maior qualidade e relevância para essa determinada área. Logo, é sugerido que a maioria dos artigos do portfólio bibliográfico dessa pesquisa esteja dentro de periódicos de grande relevância científica.



**Figura 14:** Quantitativo de artigos por periódico do PBF.

Fonte: Autor

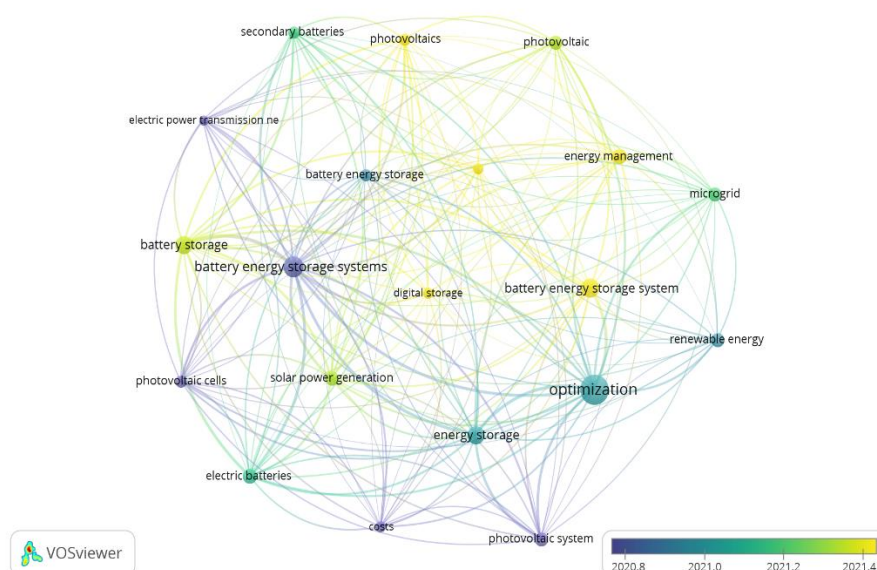


**Figura 15:** Agrupamento dos principais periódicos pela lei de Bradford.

Fonte: Autor

A Figura 16 apresenta a concorrência das palavras-chaves dos autores construída no software *VOSviewer* (van Eck; Waltman, 2010). A Figura 16 mostra as palavras-chaves que foram usadas pelo menos três vezes pelos artigos do PBF. Nessa rede, o tamanho do nó significa o número de vezes que essas palavras foram utilizadas pelos artigos, as linhas entre as palavras representam que tais palavras-chaves foram utilizadas pela mesma publicação e as cores representam a mediana do ano de publicação em relação aos artigos associados (Rotella Junior *et al.*, 2021). Desse modo, a Figura 16 mostra a relevância dos temas "otimização" e "sistema de armazenamento de energia" por serem os maiores nós, lembrando que eles foram usados como *strings* de busca. Esta rede também revela os nós amarelos como possíveis "tópicos quentes" para o campo, pois significam interesses de investigação mais recentes, incluindo gerenciamento de energia e geração de energia solar (fotovoltaica).

A Figura 17 traz a distribuição dos estudos em relação aos países. A análise de conteúdo do PBF de artigos identificou os locais mais frequentes de estudos de aplicação de um sistema ótimo EMS de integração FV/BESS. Em vista disso, os países mais frequentes são China (6 artigos), Itália (2 artigos), Austrália (1 artigo) e Índia (1 artigo). Esta concentração de publicações na Europa e Ásia indica oportunidades para mais estudos em outras localidades. Dessa forma, podem ocorrer ideias interessantes de estudos sobre fatores específicos do contexto que influenciam a viabilidade econômica e otimização de sistemas FV/BESS, assim como comparação entre fatores associados a diferentes locais.

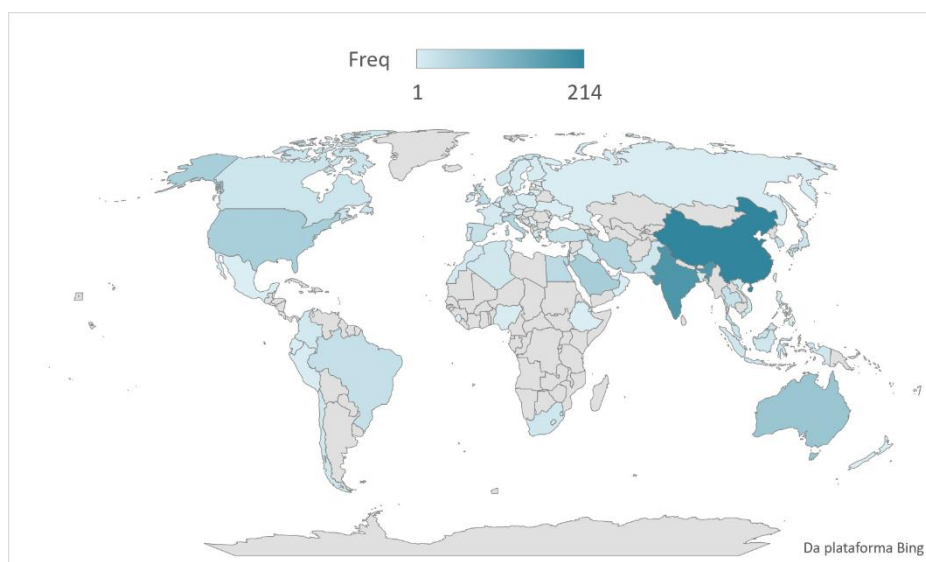


**Figura 16:** Gráfico de ocorrência de palavras-chaves no PBF.

Fonte: Autor

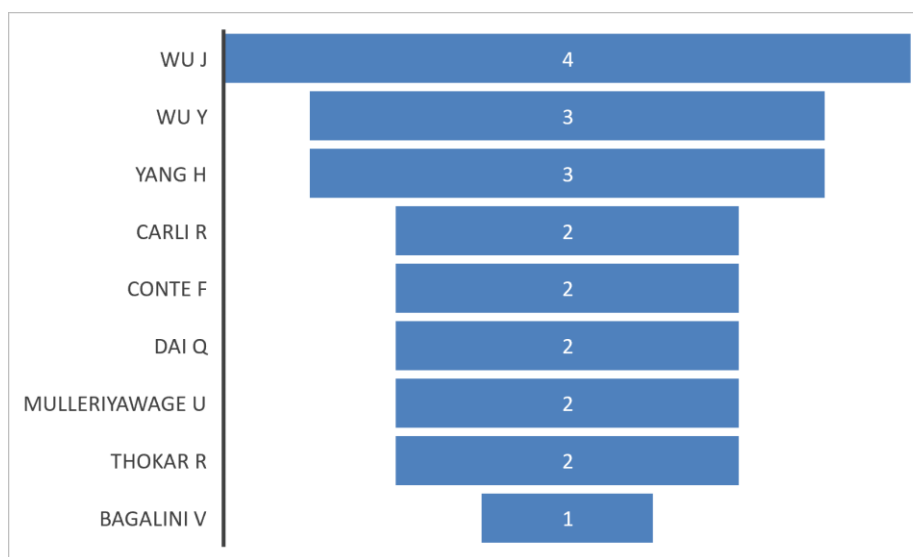


Em relação aos autores, os resultados obtidos mostram uma grande dispersão em termos de autores. No entanto, os autores chineses Wu J., Wu Y. e Yang H. se destacam em relação aos demais, tendo cada um contribuído em relação ao tema dessa pesquisa com 4 a 3 artigos para o banco de dados geral conforme visto na Figura 18.



**Figura 17:** Número de estudos por países.

Fonte: Autor



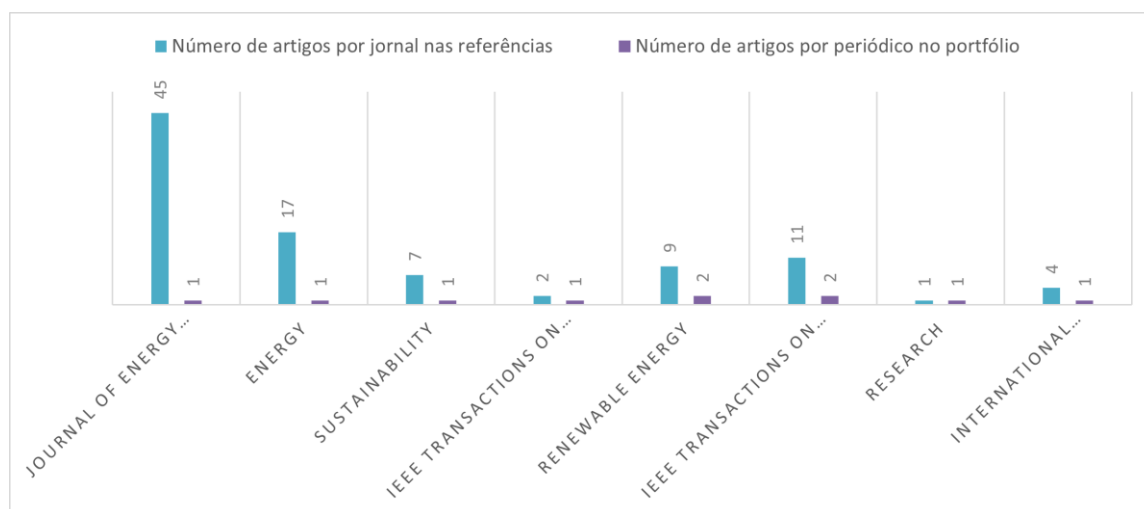
**Figura 18:** Autores do portfólio bibliográfico x quantidade de artigos produzidos.

Fonte: Autor

Nesta fase foi realizada uma análise combinada dos artigos do portfólio bibliográfico e suas referências. A Figura 19 ilustra um gráfico de relevância dos periódicos no meio acadêmico.

Nesse quesito, as revistas *Journal of Energy Storage*, *Energy* e *IEEE Transactions on Sustainable Energy* se destacam em relação aos demais, já que mostra um número significativo de artigos nas referências do PBF quando comparados a outros periódicos, respectivamente, contendo 45, 17 e 11 artigos.

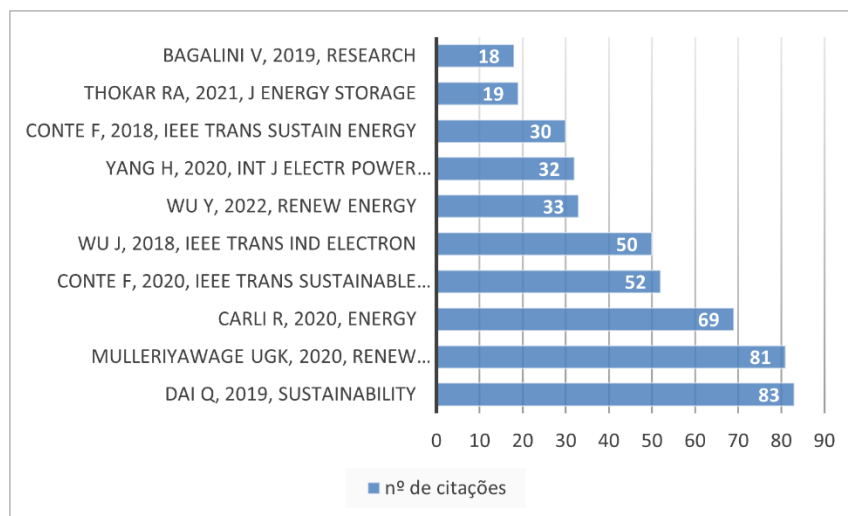
É importante ressaltar que o periódico de maior destaque é o *Journal of Energy Storage*, o que é evidenciado pela linha editorial do periódico em relação ao tema e ao nicho de mercado de estudo.



**Figura 19:** Gráfico de relevância dos periódicos na comunidade acadêmica.

Fonte: Autor

A Figura 20 mostra a distribuição dos artigos de maior destaque no PBF. Foram encontrados dois artigos de maior relevância no portfólio: um estudo realizado por (Dai; Liu; Wei, 2019) que se sobressai pelo elevado número de citações, estando acima do padrão; e o artigo de (Thokar *et al.*, 2021). O autor de (Conte *et al.*, 2020) também se evidencia no número de citações e ainda por ser influente em publicações recentes. Mesmo que mais atual, (Wu *et al.*, 2018) também apresenta influência relevante nas publicações acadêmicas, pois é relativamente citado em publicações entre 2020 a 2023.



**Figura 20:** Número de citações dos artigos do portfólio bibliográfico.

Fonte: Autor

### 2.3. Revisão bibliográfica

Quanto a primeira lente especificada na subseção 2.2.1.3, houve uma predominância significativa de artigos do PBF de aplicações em termos de pequena escala do sistema fotovoltaico como acontece em (Bagalini *et al.*, 2019; Carli *et al.*, 2020; Conte *et al.*, 2018; Dai; Liu; Wei, 2019; Mulleriyawage; Shen, 2020; Thokar *et al.*, 2021; Wu *et al.*, 2018, 2022; Yang *et al.*, 2020), seguindo o mesmo raciocínio da revisão bibliográfica dada na seção 2.3. Dentre esses, percebe-se que (Carli *et al.*, 2020; Conte *et al.*, 2018; Dai; Liu; Wei, 2019; Wu *et al.*, 2018) estão inseridos no contexto de redução de custos de um sistema FV/BESS (ARC). Nesse caso, (Carli *et al.*, 2020; Conte *et al.*, 2018; Wu *et al.*, 2018) referem-se a determinar um perfil de geração FV por meio da previsão de potência do BESS com intuito de maximizar ganho para suprir a demanda de eletricidade de uma rede local conectada uma rede de distribuição (micro-rede).

Ainda com relação aos contextos, observa-se também uma predominância no assunto sobre dimensionamento ou capacidade ótima da bateria (DI) dependendo da demanda energética. Assim os trabalhos (Bagalini *et al.*, 2019; Mulleriyawage; Shen, 2020; Thokar *et al.*, 2021; Wu *et al.*, 2022) se relacionam com tal assunto. (Bagalini *et al.*, 2019; Mulleriyawage; Shen, 2020) propõem dimensionar de forma ótima o BESS integrado a um sistema FV residencial com o intuito de maximizar o autoconsumo da residência. Para (Thokar *et al.*, 2021; Wu *et al.*, 2022), o contexto é dirigido ao fornecimento de geração distribuída, com o primeiro artigo focando

também na mitigação de diferentes problemas de qualidade de energia (MDPQE), que a intermitência da geração de energia fotovoltaica pode ocasionar. Por conseguinte, (Thokar *et al.*, 2021) utiliza um sistema de otimização baseado em algoritmo genético (AG) a fim de usar de forma ideal a FER, garantindo uma alta penetração de FV na rede sem fluxo reverso de energia. O segundo utiliza a otimização do tipo programação inteira mista não linear (modelo clássico) para resolver a capacidade ideal do BESS, melhorar a vida útil do mesmo e a relação de autoconsumo com a rede.

O contexto de MDPQE é estudado em (Conte *et al.*, 2018, 2020; Thokar *et al.*, 2021). (Conte *et al.*, 2020) foi o único artigo focado no nível de geração para uma usina centralizada. Tal trabalho teve como objetivo definir um plano de despacho de energia utilizando o BESS para maximizar ganho econômico e fornecer um serviço de regulação primária de frequência contínuo e confiável. Isso é realizado por meio de otimização linear considerando tanto o ganho econômico através de penalizações e preços intradiários de energia.

Em relação ao DMCP, tem-se (Yang *et al.*, 2020) que realizou uma solução de otimização por enxame de partículas (PSO) para lidar com o controle de potência de carga e descarga das baterias, o controle da eletricidade enviada para rede e a eletricidade comprada da rede para se adequar à carga real e potência de saída fotovoltaica. Já o CIE é realizado também em (Bagalini *et al.*, 2019; Dai; Liu; Wei, 2019; Wu *et al.*, 2018). (Dai; Liu; Wei, 2019) desenvolve um modelo de otimização para determinar os tamanhos ideais do sistema FV/BESS e investigar a estratégia ideal de gerenciamento de energia do BESS, minimizando o custo de eletricidade num contexto de carregamento de veículos elétricos. Também é levado em consideração nesse artigo uma relação custo-benefício, onde o custo de tarifa de eletricidade é usado para poder vender o excesso de energia.

Quanto a segunda lente de análise da subseção 2.2.1.3 foram vistos uma concentração de soluções baseadas em otimização clássica (mais complexo e demorado porém fornece uma solução exata e precisa) como os apresentados nos trabalhos de (Carli *et al.*, 2020, 2020; Conte *et al.*, 2018, 2020; Mulleriyawage; Shen, 2020; Wu *et al.*, 2018, 2022). Em relação aos métodos de otimização heurísticos (fornecem resultados satisfatórios em um espaço de tempo pequeno), os artigos (Dai; Liu; Wei, 2019; Thokar *et al.*, 2021; Yang *et al.*, 2020) se sobressaem, com os dois primeiros usando o algoritmo PSO e o último utilizando o AG. A partir disso, é possível perceber que os algoritmos heurísticos apresentam um processo de otimização que tem uma maior velocidade de convergência em relação aos dos métodos clássicos (Yang *et al.*, 2020).

Dentre todos os artigos (Bagalini *et al.*, 2019) não utiliza método de otimização, resolvendo seu problema de maximização de autoconsumo através do dimensionamento do sistema FV/BESS focando no desempenho energético e avaliação econômica por meio do valor presente líquido (VPL). O VPL é um indicador econômico utilizado para avaliar o desempenho de um sistema, permitindo quantificar lucros sendo dados pela diferença entre o valor presente dos benefícios obtidos e os custos incorridos em um investimento (Rotella Junior *et al.*, 2021).

Na terceira lente, observou-se que apenas alguns artigos levaram em conta um modelo mais complexo de degradação da bateria. Primeiro, é necessário salientar que a degradação da bateria é um fator-chave de custo para o sistema durante sua operação, consequentemente, não pode ser negligenciado (Mulleriyawage; Shen, 2020). Portanto, os artigos que dedicaram sua modelagem a um modelo que representa melhor o funcionamento da bateria ao longo do tempo foram (Dai; Liu; Wei, 2019; Mulleriyawage; Shen, 2020; Wu *et al.*, 2022). Dentre essas modelagens algumas considerações são essenciais para o ideal funcionamento da bateria, e assim, se tornam comum entre os artigos, como as taxas de restrições de carga e descarga do BESS, que não devem exceder a potência nominal especificada pelo fabricante das baterias segundo (Dai; Liu; Wei, 2019). Uma outra restrição importante é a quantidade máxima e mínima de energia em um banco de baterias.

Também é levado em consideração em (Dai; Liu; Wei, 2019) a variável DoD que é a profundidade permitida de descarga da bateria e deve ser respeitada. Além disso, segundo (Wu *et al.*, 2022) a degradação da bateria é motivada pelo aumento do número de ciclos utilizados e no tempo de uso de serviço da baterias. Tais problemas acarretam consequências como levar a um declínio no SoC máximo permitido fazendo-se necessário que haja restrições em relação a essa variável. Ademais, em (Wu *et al.*, 2022) foram consideradas duas variáveis “novas” em relação aos demais artigos que foram o *cycling aging* e *calendar aging*. O primeiro se refere a razão entre a energia total entregue da bateria e o ciclo de vida da bateria, enquanto o segundo se refere ao processo da bateria não estar sendo utilizada, mesmo assim ocorre um pequeno processo de degradação, necessitando ser custeado. Tal variável depende da temperatura ambiente e do SoC (Wu *et al.*, 2022).

Tais considerações são importantes para o processo de otimização, a fim de que se possa obter assim um custo em relação à degradação da bateria, já que ela é um processo importante de influência de como o sistema irá se comportar ao longo do tempo.

Para última lente, o que se pôde identificar foi que a principal lacuna é em relação ao contexto em que está sendo aplicada a otimização do sistema FV/BESS, isto é, a maioria dos trabalhos são voltados para a demanda de eletricidade de pequena escala. Logo, um promissor estudo é se aprofundar mais na área de transmissão e geração de energia. Somado a isso, observa-se que os modelos de otimização heurísticos são mais recomendáveis e menos explorados para realizar o algoritmo do sistema de gerenciamento de energia. Já modelos de degradação da bateria ainda são pouco explorados, sendo utilizadas poucas variáveis para influenciar o funcionamento do BESS. Nesse contexto, variáveis como temperatura e modelagem de perdas da bateria são deixadas de lado, por consequência, a modelagem se torna menos representativa do sistema real. Outro fator que se observa de lacuna em relação ao Brasil, é a falta de políticas públicas voltadas para subsídios do uso do BESS, em que não há ainda nenhum tipo de desconto ou favorecimento em relação a tarifas de energia, que é uma variável econômica de grande importância para o processo de otimização.

Adicionalmente, a questão da penalidade em caso de ultrapassagem da potência contratada não foi explorada em trabalhos anteriores.

Por fim, a revisão de literatura sobre o assunto relacionada ao contexto brasileiro ainda é pouco difundida, dificultando a busca de artigos que se enquadrem no tema proposto neste trabalho. Dentre as buscas em plataformas de pesquisa como *Web of Science* e *Scopus*, foram encontrados três artigos mais ligados ao tema. Assim, os artigos (Angelim; Affonso, 2018; Bitencourt *et al.*, 2016; Deotti *et al.*, 2020) utilizaram sistemas FV/BESS com foco em geração distribuída. Em (Deotti *et al.*, 2020), foi realizado um estudo técnico e econômico de um sistema FV/BESS residencial para o contexto regulatório brasileiro. Sua análise econômica foi realizada utilizando VPL, ROI e TIR, porém, as tarifas utilizadas foram voltadas para o cenário de geração distribuída, o que difere das tarifas utilizadas para o contexto de análise de geração centralizada. Em relação à CDB, observou-se um modelo simples que não considerou o número de ciclos de vida da bateria e a influência da temperatura na sua EOL. O artigo (Angelim; Affonso, 2018) propôs um sistema EMS para coordenar o uso de FV/BESS trabalhando para minimizar os custos de consumo de energia com o sistema atuando na demanda de energia. Sua análise econômica foi feita através do TOU, devido às tarifas de energia voltadas para o aspecto de menor geração. Por fim, o artigo (Bitencourt *et al.*, 2016) apresentou um dimensionamento ótimo de BESS e uma estratégia de penetração FV sem exceder o limite de tensão para um sistema residencial no sudeste do Brasil. O CDB realizado por (Bitencourt *et al.*, 2016) também

é simples, considerando apenas o custo da bateria, a carga e descarga facilitada pelo banco de baterias e o cálculo do SoC. As penalidades não foram exploradas pelos artigos porque provavelmente estão em cenários de geração diferentes dos do presente trabalho.

### 3. METODOLOGIA DA PESQUISA

O EMS proposto é realizado para maximizar a função objetivo ( $FO$ ) (US\$), que é expressa por:

$$\max FO(P_b) = R_{EP} - C_{DB} - C_{PEN} \quad (1)$$

em que  $R_{EP}$  (US\$) é a receita da quantidade de energia gerada por dia,  $C_{DB}$  (US\$) é o CDB por unidade monetária,  $C_{PEN}$  (US\$) é o custo da penalidade a ser aplicada caso o limite de potência contratado seja violado e  $P_b$  (MW) é a variável de decisão que denota a referência para potência BESS. Assim, o valor ótimo de  $P_b$  é determinado também considerando a eficiência de saída ( $\eta_{out}$ ) do sistema, ou seja, o valor de  $P_b$  multiplicado por  $\eta_{out}$  resulta no valor real referência de potência do BESS. Para uma solução mais realista, a eficiência  $\eta_{out}$  leva em consideração as perdas nos conversores de energia, perdas nos cabos e perdas nos transformadores do ramal de conexão à rede BESS.

As funções de restrições  $R_{EP}$  e  $C_{DB}$  e  $C_{PEN}$  são descritas na seção 3.1, 3.2 e 3.3 respectivamente.

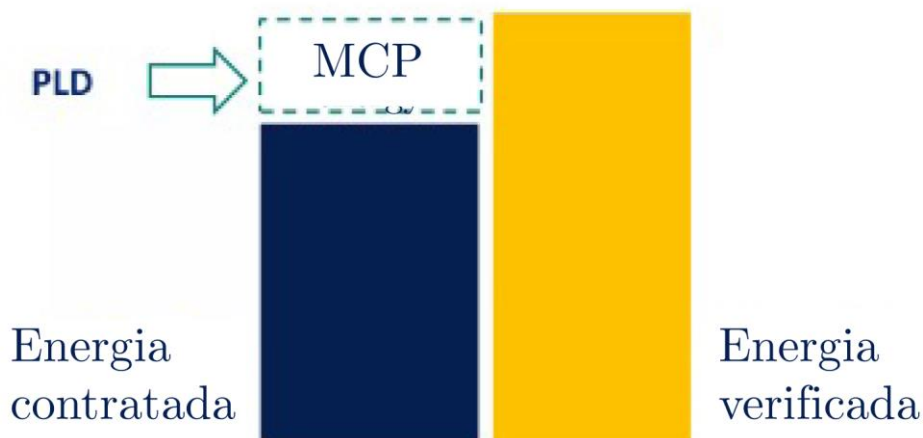
#### 3.1. Modelo de precificação de energia

As regras de mercado relativas à precificação da energia são a base para a formulação da função objetivo na equação (1). Este trabalho discute a precificação do mercado de energia brasileiro sob a perspectiva do ACR, e a abordagem do ganho financeiro está focada no MCP.

No Brasil, a geração de energia das usinas de grande escala é normalmente medida a cada hora, o que é comparado ao valor da energia estabelecido no contrato de venda.

Se o valor da geração for inferior ao valor do contrato de venda, então o gerador terá exposição negativa ao MCP, portanto terá que pagar pela quantidade de energia faltante ao custo do Preço de Liquidação das Diferenças (PLD). Por outro lado, caso haja uma exposição positiva, ou seja, uma geração maior que a prevista no contrato para aquele período, o gerador venderá a energia ao custo do PLD como mostrado na Figura 21.





**Figura 21:** Estrutura geral do mercado energético de curto prazo.

Fonte: Adaptado de (CanalEnergia, 2022)

O PLD é o preço horário do MWh para cada hora do dia seguinte, baseado no CMO, que é obtido a partir dos mecanismos de previsão de carga do Operador Nacional de Sistema Elétrico (ONS). Neste contexto, o CMO é dado com base nas usinas que estão em operação no momento, sendo seu custo baseado no maior valor de MWh consumido, que normalmente se refere aos custos da energia elétrica produzida pelas termelétricas. Como existe uma dependência das decisões e previsões concedidas pelo ONS, o CMO normalmente é dado no dia anterior, sendo válido por 24 horas no dia seguinte. Os valores de CMO são de acesso aberto pelo ONS, e o PLD é obtido diretamente no site da CCEE.

Além disso, o PLD é definido através de um processo iterativo baseado no CMO horário. A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) determina anualmente os valores mínimo e máximo do valor horário do PLD e do valor máximo diário do PLD. Assim, o valor de CMO é comparado com os limites mínimo e máximo do PLD e, caso não esteja dentro desta faixa, o valor de PLD será dado pelo seu limite mais próximo, caso contrário, o valor PLD é o CMO.

Como o preço do PLD varia durante o dia, dependendo do horário em que a energia é gerada em excesso ou em déficit em relação à energia contratada, o gerador pode ter lucro ou prejuízo.

Portanto, a função de custo  $R_{EP}$  pode ser calculada da seguinte forma:

$$R_{EP} = G_{cont}E_{cont} + G_{PLD}(E_{mea} - E_{cont}) \quad (2)$$

em que  $G_{cont}$  (US\$/MWh) é o custo do MWh definido no contrato,  $E_{cont}$  (MWh) é a quantidade de energia determinada no contrato a ser fornecida a cada hora,  $G_{PLD}$  (US\$/MWh) é o valor PLD e  $E_{mea}$  (MWh) é a energia medida atualmente.

O cálculo de  $E_{mea}$  é definido pela potência FV/BESS injetada na rede  $P_g$  (MW) e intervalo de tempo ( $\Delta t$ ) (hora):

$$E_{mea} = P_g \Delta t \quad (3)$$

$$P_g = P_b + P_{pv} - P_l \quad (4)$$

em que  $P_b$  (MW) é a potência de despacho BESS ( $P_b > 0$  indica descarga),  $P_{pv}$  (MW) é a potência do gerador FV e  $P_l$  (MW) é o consumo interno da planta de geração.

Além disso, no ACR, o sistema de precificação é definido anualmente de modo que sua divisão mensal e horária depende do contrato de venda de energia, no qual são consideradas a sazonalidade energética (distribuição mensal para o ano) e a modulação energética (distribuição horária para os meses). A sazonalidade padrão é *flat*, que é a distribuição da mesma quantidade de energia para todos os meses do ano. Após definida a sazonalidade energética, é determinada a divisão mensal de energia definida para cada época do mês em questão. Da mesma forma, a modulação padrão é *flat*, para que a energia seja distribuída uniformemente entre os meses. A definição do tipo de sazonalidade e modulação interfere no balanço energético ( $E_{mea} - E_{cont}$ ), portanto afeta a receita de acordo com o valor do PLD como na equação (2).

Desta forma, quando a usina FV gera energia a receita é positiva, então a usina lucra com a venda da energia de acordo com o valor contratado e o valor do PLD, caso contrário a receita é negativa, ou seja, a usina deverá adquirir energia de acordo com o valor contratado no valor PLD.

É fundamental ressaltar que a parcela do valor a ser cobrada via contrato é fixa, e a parcela variável depende diretamente do valor do PLD em determinado horário, podendo ocorrer perda também caso haja baixa geração em períodos de alto valor de PLD.

### 3.2. Modelo de Degradação da Bateria

A redução da vida útil da bateria está diretamente ligada ao seu uso e às condições de *standby*. Assim, é fundamental considerar o custo relacionado à sua degradação, pois o custo

do BESS impacta significativamente o custo total do sistema (Badawy; Sozer, 2017). Dessa forma, a modelagem da degradação do uso ocorre por meio de fatores que impactam a saúde e a vida útil da bateria, como o *calendar aging*, DoD e perda total da bateria. A modelagem CDB é baseada em células LFP.

O  $C_{DB}$  pode ser calculado somando os custos destes fatores de impacto:

$$C_{DB} = C_{AG} + C_{DoD} + C_{BL} \quad (5)$$

em que  $C_{AG}$  (US\$) é o custo relacionado ao impacto do *calendar aging* na bateria,  $C_{DoD}$  (US\$) é o custo relacionado ao impacto do DoD na bateria e  $C_{BL}$  (US\$) é o custo relacionado à perda total da bateria.

De acordo com (Swierczynski *et al.*, 2015), o *calendar aging* é definido como uma perda irreversível da capacidade de armazenamento da bateria e da capacidade de energia. Assim, a bateria não pode ser poupada por longos períodos sem ser utilizada. Uma estimativa da vida útil da bateria ( $M_{lifetime}$ ) (mês) pode ser obtida analisando o SoC e a temperatura:

$$M_{lifetime} = \left( \frac{100(1 - EOL)}{(8.409 \cdot 10^{-1} SoC^{0.823} + 0.5195) \cdot (3.258 \cdot 10^{-9} T^{5.087} + 0.295)} \right)^{1.25} \quad (6)$$

em que  $EOL$  (%) é a capacidade da bateria no EOL,  $T$  (°C) é a temperatura ambiente local e  $SoC$  (%) é a porcentagem da capacidade de energia ainda disponível na bateria. Conforme apresentado em (Swierczynski *et al.*, 2015), este trabalho considera o critério EOL definido como 80%, ou seja, 20% de desvanecimento de capacidade. Além disso, o valor de  $T$  pode ser obtido, para cada dia em um determinado local, a partir dos dados da NASA *Power*, disponíveis em (NASA, 2021).

Portanto, um valor diário de custo  $C_{AG}$  pode ser calculado por:

$$C_{AG} = \frac{C_b}{30M_{lifetime}} \quad (7)$$

em que  $C_b$  (US\$) é o preço da bateria, considerando 30 dias em um mês.

Em seguida, são impostas restrições para retardar o envelhecimento da bateria, evitar a perda da bateria e trabalhar em operação saudável. Para isso,  $SoC$  e  $P_b$  são limitados em valores mínimo e máximo:

$$SoC_{\min} \leq SoC(t) \leq SoC_{\max} \quad (8)$$

$$p_{b\min}(t) \leq P_b(t) \leq p_{b\max}(t) \quad (9)$$

Os limites  $SoC_{\min}$ ,  $SoC_{\max}$ ,  $P_{b\min}$  e  $P_{b\max}$  são definidos a partir das especificações do fabricante. Desta forma, são definidos limites operacionais para  $P_b$ ,  $p_{b\min}$  e  $p_{b\max}$  em função de  $\Delta t$  (hora), para garantir o mínimo e máximo  $SoC$  não é alcançado devido a esses intervalos já predefinidos. Estes limites operacionais são calculados para definir o estado atual de carregamento, respeitando os limites de  $SoC_{\min}$ ,  $SoC_{\max}$ ,  $P_{b\min}$  e  $P_{b\max}$  do seguinte modo:

$$\begin{aligned} p_{b\min}(t) &= \min \left\{ 0, \frac{[SoC(t - \Delta t) - SoC_{\max}]Q}{\Delta t \cdot \eta_{in}} \right\} \\ &= P_{b\min}, \quad \text{if } p_{b\min}(t) \leq P_{b\min} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} p_{b\max}(t) &= \max \left\{ 0, \frac{[SoC(t - \Delta t) - SoC_{\min}]Q}{\Delta t} \right\} \\ &= P_{b\max}, \quad \text{if } p_{b\max}(t) \geq P_{b\max} \end{aligned} \quad (11)$$

em que  $Q$  (MWh) é a capacidade total da bateria e  $\eta_{in}$  (%) é a eficiência total de entrada.

O cálculo do custo  $C_{DoD}$  depende do efeito dos ciclos de carga e descarga ( $N_{cycles}$ ) (ciclo) em função de  $DoD$  (%) (Swierczynski *et al.*, 2015), que é dado por:

$$N_{cycles} = \left( \frac{100(1 - EOL)}{2.4 \cdot 10^{-4} e^{0.02717(T+273.15)} \cdot 2.853 \cdot 10^{-1} DoD^{0.4904}} \right)^2 \quad (12)$$

Vale ressaltar que um ciclo é considerado uma carga e descarga total da bateria, e que  $EOL$  e  $T$  são constantes em (12).

Além disso,  $N_{cycles}$  deve ser calculado a partir do DoD que a bateria está exposta durante sua vida útil, que é aproximadamente a média diária do DoD, pois a bateria não apresenta grandes variações em funcionando em dias diferentes, permanecendo praticamente igual durante sua vida.

Em (Swierczynski *et al.*, 2015), a equação (12) foi determinada para uma visão de longo prazo da bateria (ou seja, análise *post-mortem*), na qual o DoD e a temperatura foram aplicados

para estimar a número máximo de ciclos. Por outro lado, neste trabalho foi utilizada uma média diária DoD, pois uma operação completa do BESS ocorre em 24 horas.

Assim, um valor horário de custo  $C_{DoD}$ , adaptado de (Hoke *et al.*, 2014), é definido por:

$$C_{DoD} = \begin{cases} C_b \cdot \frac{1 - SoC(t)}{2N_{cycles}}, & \text{if } SoC(t) < SoC(t - \Delta t) \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (13)$$

em que a divisão por 2 denota um ciclo completo de descarga seguido de carregamento. Além disso, a primeira parte da equação simboliza que a bateria está em processo de descarregamento, portanto calcula que houve um custo de profundidade de descarga;  $C_{DoD}$  não é calculado quando a bateria está carregando.

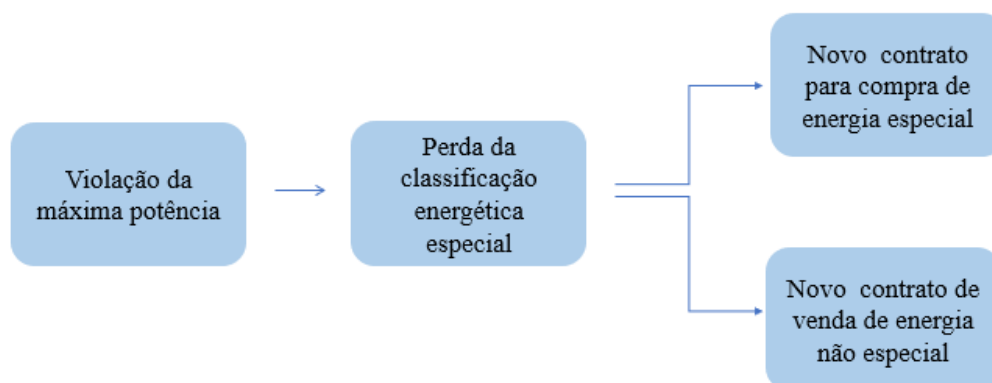
Finalmente, se as restrições (8) e (9) forem violadas, a bateria será perdida permanentemente. Assim, o custo  $C_{BL}$  considera se os  $SoC$  e  $P_b$  atuais estão dentro de seus limites máximo e mínimo, caso contrário o gasto com uma bateria nova é imposto:

$$C_{BL} = C_b \quad (14)$$

A modelagem CDB, além de incluir dados como temperatura, *calendar aging* e EOL, foi adaptada para uma visão operacional de curto prazo. Além disso, as restrições de potência operacional do BESS foram consideradas em (8) e (9), vinculadas ao intervalo de tempo de operação e ao atual SoC.

### 3.3. Modelo de Penalidade

Conforme mencionado anteriormente, caso a UFV ultrapasse o limite de potência contratada pelo menos quatro vezes durante o mês, o desconto TUST é temporariamente perdido e reclassificado como fonte convencional especial. Outro possível impacto negativo é a reclassificação de fonte convencional especial para fonte convencional não especial, o que impede a UFV de cumprir outros contratos especiais de energia como explicam a Figura 22. Neste caso, a planta FV é multada por ultrapassar sua capacidade e, a partir do mês seguinte ao ocorrido, deverá celebrar contratos de compra de energia especial por meio de outra usina, o que acarreta custos adicionais.



**Figura 22:** Ultrapassagem de limite de potência injetada.

Fonte: Autor

Portanto, o custo da penalidade,  $C_{PEN}$  (US\$), está incluído em caso de violação das restrições de energia ou do contrato de energia. Neste trabalho, uma penalidade é aplicada quando o limite de potência é violado três ou mais vezes em um mês pois de acordo com a regulamentação brasileira existe um limite contratual para a potência que será injetada na rede elétrica (CCEE, 2019). No caso deste projeto foi de 27 MW, mas esta não é a potência máxima da usina, tendo seus inversores potências de pico que chegam a mais de 28 MW. Com uma visão operacional diária, a penalidade envolve uma taxa de desconto ( $\delta_{dr}$ ) (%) sobre a venda da energia gerada, exigindo a compra de energia com aumento de preço ( $\delta_{pi}$ ) (%) com uma única violação da potência contratada ( $P_{lim}$ ) (MW).

$$C_{PEN} = R_{EP} - C_{sold} + C_{purch}, \quad (15)$$

0, caso contrário

$$C_{sold} = (1 - \delta_{dr})G_{cont}E_{cont} + G_{PLD}(E_{mea} - E_{cont}) \quad (16)$$

$$C_{purch} = (1 + \delta_{pi})G_{cont}E_{cont} + G_{PLD}(E_{mea} - E_{cont}) \quad (17)$$

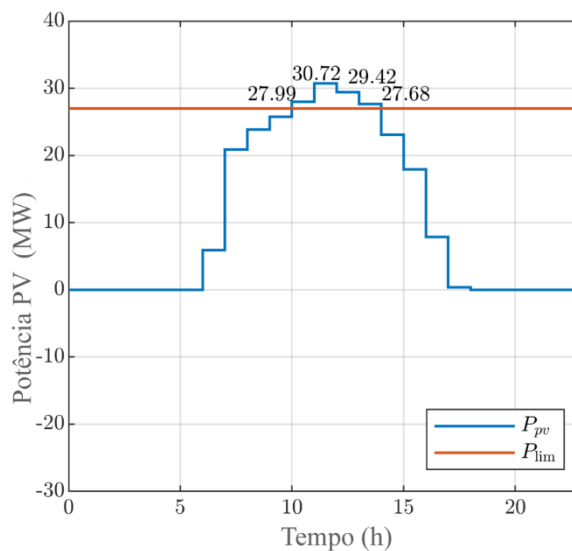
em que  $C_{sold}$  (US\$) é o custo associado à venda de energia não especial estabelecida em novo contrato e  $C_{purch}$  (US\$) é o custo associado com a compra de energia especial de gerador terceirizado.

### 3.4.Dados de Entrada e Solucionador do EMS Proposto

### 3.4.1 Dados de entrada

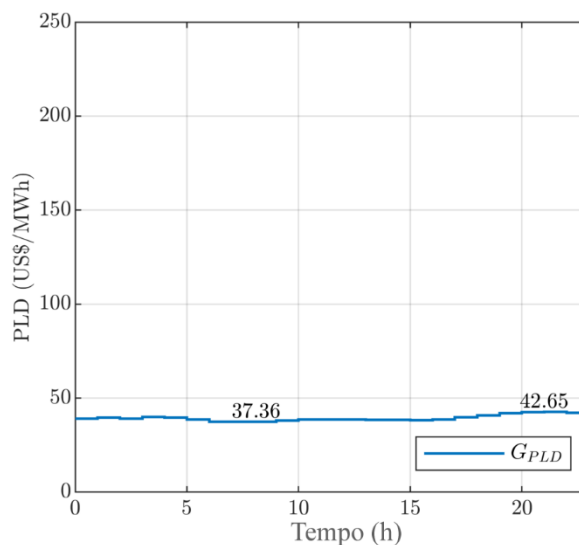
As principais entradas do EMS proposto, que compreende um otimizador de curto prazo, são  $P_{pv}$  e  $G_{PLD}$ ; outras entradas para o EMS são constantes:  $G_{cont}$ ,  $E_{cont}$ ,  $\Delta t$ ,  $EOL$ ,  $T$ ,  $C_b$ ,  $SoC_{min}$ ,  $SoC_{max}$ ,  $P_{min}$ ,  $P_{max}$ ,  $Q$ ,  $\eta_{out}$ ,  $\eta_{in}$  e  $P_{lim}$ . Observe que tanto  $P_{pv}$  quanto  $G_{PLD}$  são dinâmicos durante o dia, em que  $P_{pv}$  é obtido de um sistema de previsão com base em dados meteorológicos (como irradiância horizontal global e direção do vento) e  $G_{PLD}$  podem ser acessados no site da (CCEE, 2019).

Na Figura 23, a potência FV prevista,  $P_{pv}$ , é ilustrada para a planta FV de Coremas em 12-set-2021. Como pode ser observado, a potência FV ( $P_{pv}$ ) ultrapassou o limite contratado ( $P_{lim} = 27$  MW), portanto, neste caso, sem operação do BESS, o excedente de energia (cerca de 7,82 MWh) seria desperdiçado, uma vez que a usina tenha atingido o limite contratual de energia que pode entrar na rede para aquele período específico, o excesso de energia não poderá mais ser vendido, pois a rede não está “programada” para receber mais energia do que pode tolerar. Para o PLD, os dados são obtidos da CCEE, e são ilustrados os valores horários de PLD,  $G_{PLD}$ , apresentando pequenas variações de valores entre as horas do dia na Figura 24.



**Figura 23:** Geração de energia fotovoltaica ( $P_{pv}$ ) 12-set-2021 e limite de potência contratada  $P_{lim}$ .

Fonte: Autor



**Figura 24:** Perfil PLD com pequenas variações de valor (01-Jan-2021).

Fonte: Autor

#### 3.4.2 Solucionador da otimização

Para resolver os problemas de otimização, o AG é um dos métodos mais convencionais, onde um número aleatório de populações é definido e, posteriormente, diversas iterações são realizadas para otimizar uma função objetivo. O AG é utilizado principalmente para funções objetivo não lineares, sendo adequado para encontrar a solução ótima de problemas que visam a otimização de UFV/BESS, devido à sua rapidez em alcançar um resultado satisfatório e fácil implementação, de acordo com (Thokar *et al.*, 2021). Assim, o AG foi usado para alcançar a programação EMS ideal na planta FV\BESS com base nos dados de previsão. O algoritmo foi aplicado para resolver (1) para maximização de lucro, resultando em carga e descarga ideais de energia BESS para um dia com intervalo de 1 hora. O AG foi realizado no MATLAB com base nos parâmetros descritos na Tabela 2, em que o indivíduo é um vetor formado por 24 valores (relacionados às horas) e é otimizado para determinar o valor ótimo  $P_b$ .

As restrições do problema estão descritas em (9) para (10), (11) e (15). Como o algoritmo não sabe o que acontecerá nos próximos dias em relação à tarifa do mercado de energia, a bateria pode ser completamente descarregada no final do dia. No entanto, isso encurtaria o seu tempo útil consideravelmente à medida que mais ciclos de vida útil da bateria são usados. Desta forma, uma limitação de 20% do SoC pode ser programada para que a bateria não descarregue totalmente, e assim já inicia o dia com esta aplicação  $SoC_{min}$  conforme mostrado na Tabela 4.



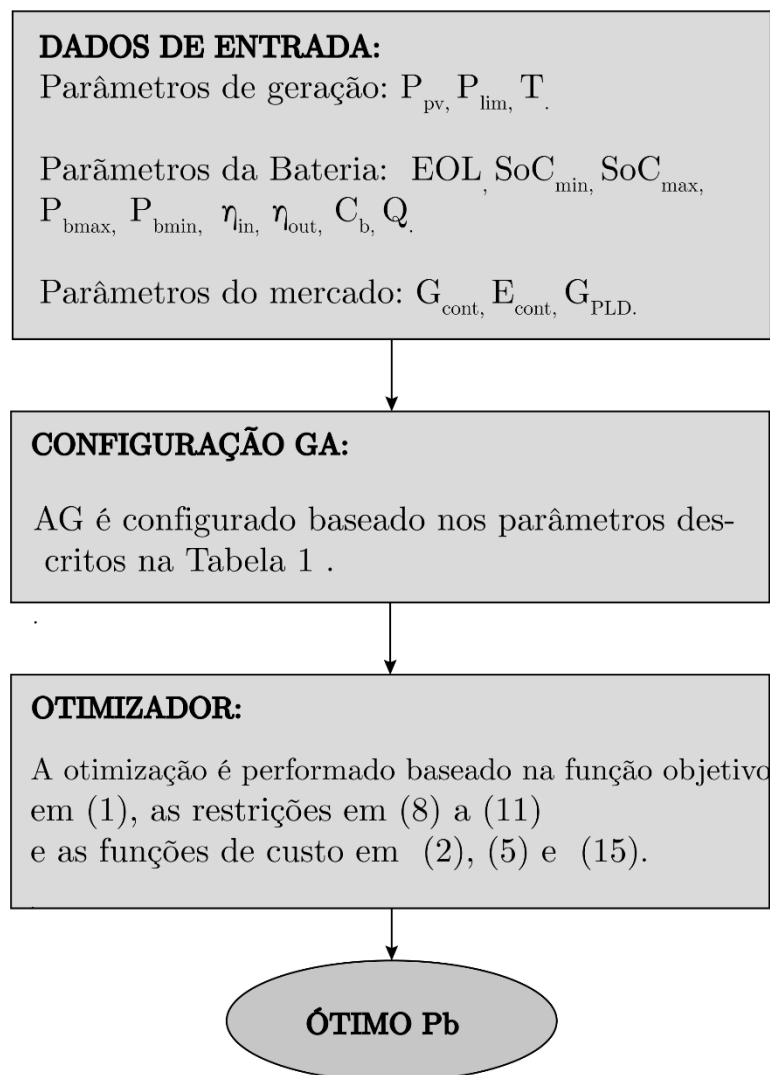
O diagrama EMS proposto é mostrado na Figura 25 resumindo os blocos de construção conceituais para a otimização.

**Tabela 2:** Configuração dos parâmetros do AG.

<b>Descrição</b>	<b>Valores</b>
Dimensão de saída	24
Tamanho da população	$5 \cdot 10^4$
Limite de parada da geração	$10^3$
Tolerância a erros	$10^{-9}$
Tempo máximo de parada	60 s
Tempo limite	180 s
Taxa de sucesso de cruzamento	80%
Elites mantidas	80%
Restrições populacionais iniciais	-2,016 ; 2,016 MWh

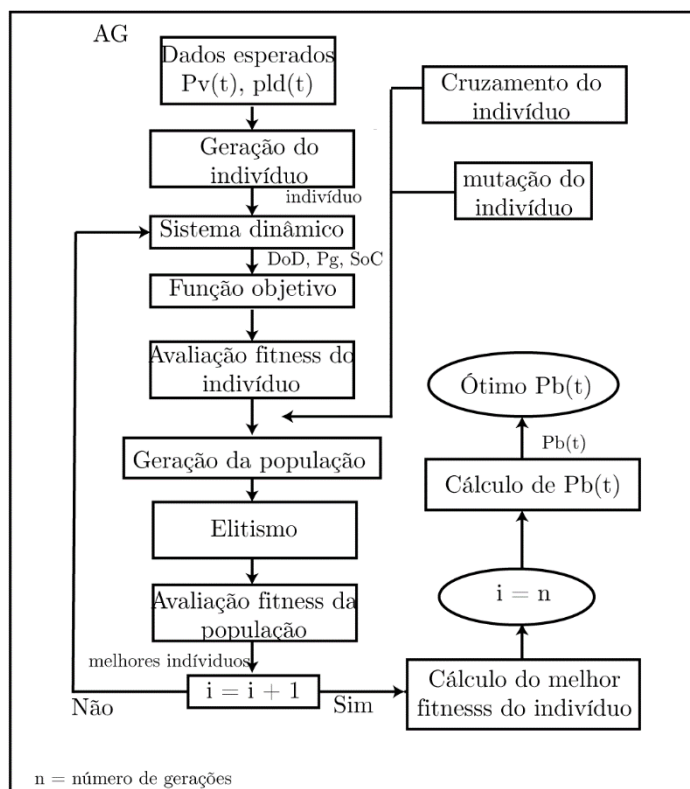
Fonte: Autor

O diagrama AG é mostrado na Figura 26, na qual o indivíduo é um vetor composto por 24 valores e é otimizado para que o  $P_b$  ótimo possa ser calculado e obtido. A criação do indivíduo é feita por uma lista simples com o número de genes igual ao valor final de variáveis que se deseja obter, nesse caso, 24 valores. Cada indivíduo terá um atributo *fitness*, isto é, um valor total relacionado a função objetivo ( $I$ ) que é calculado para cada indivíduo. Esses genes, primeiramente, são dados de forma aleatória até ir convergindo para um valor *fitness* maximizado. As populações são preenchidas com indivíduos. Cada população representa uma nova geração, e a cada nova geração espera-se indivíduos com um melhor valor de *fitness*. O elitismo na Figura 26 é desenvolvido dentro do AG, a partir dos filhos dos indivíduos, nos quais, os melhores são passados para próxima geração.



**Figura 25:** Diagrama do EMS proposto que é executado todos os dias, destacando os dados de entrada necessários, a configuração do AG e as principais equações usadas na otimização.

Fonte: Autor



**Figura 26:** Fluxograma operacional do AG.

Fonte: Autor

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1. Análise do sistema FV/BESS otimizado

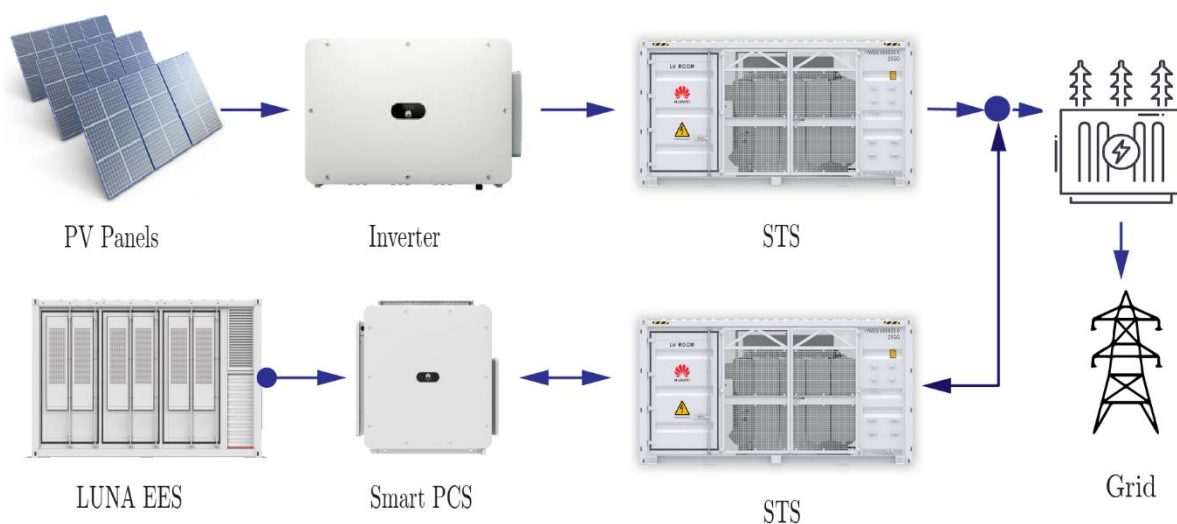
Os resultados apresentados neste trabalho foram obtidos a partir de simulação baseada na usina FV Coremas-IV, cujos principais equipamentos estão ilustrados na Figura 27. Esta usina FV é composta por um conjunto de geração FV de 31,2 MWp, inversores de potência e subestações transformadoras inteligentes (STS) - fornece serviços de forma mais inteligente e segura - que são conectadas do ponto de acoplamento de média tensão à transmissão de alta tensão através de um transformador elevador. Os modelos desses equipamentos são descritos na Tabela 3.

**Tabela 3:** Equipamentos da planta FV

<b>Equipamento</b>	<b>Descrição</b>	<b>Fabricante</b>
Inversor	Sun2000-185KTL	Huawei
Painéis FV	Astro5Twins 530/535 Wp	Astronergy
STS	STS-3000K-H1	Huawei
Smart PCS	LUNA2000-200KTL-H0	Huawei
LUNA ESS	LUNA2000-2.0MWH-2H1	Huawei

Fonte: Autor

De igual modo, o BESS e os conversores de energia inteligentes (Smart PCS) – conversor que atua como inversor e retificador - também são ligados à rede através das STS. O EMS proposto estabeleceu a referência de potência para a operação do BESS, tendo como entradas os parâmetros descritos na Tabela 4, além da potência FV ( $P_{pv}$ ) e do valor PLD ( $G_{PLD}$ ).

**Figura 27:** Arquitetura da planta Coremas-IV FV/BESS.

Fonte: Autor

**Tabela 4:** Parâmetros de entrada para o EMS proposto.

<b>Descrição</b>	<b>Parâmetros</b>	<b>Valores</b>
------------------	-------------------	----------------

Custo do Contrato (MWh <sup>1</sup> )	$G_{cont}$	34,42 US\$
Energia contratada	$E_{cont}$	7,2 MWh
Intervalo de tempo	$\Delta t$	1 h
<i>End of life</i>	$EOL$	80 %
Temperatura <sup>2</sup>	$T$	28,31 °C
Preço do BESS	$C_b$	US\$ 266112,00
SoC mínimo	$SoC_{min}$	20 %
SoC máximo	$SoC_{max}$	100 %
Potência Máxima BESS	$P_{bmax}$	-2,016 MW
Potência mínima BESS	$P_{bmin}$	2,016 MW
Capacidade Total da Bateria	$Q$	2,016 MWh
Eficiência de entrada	$\eta_{in}$	87,28 %
Eficiência de saída	$\eta_{out}$	96,98 %
Taxa de desconto de energia	$\delta_{dr}$	20 %
Aumento do preço da energia	$\delta_{pi}$	20 %
Limite de potência contratada	$P_{lim}$	27 MW

Fonte: Autor

Da Tabela 4, vale destacar o cálculo de  $\eta_{out}$  e  $\eta_{in}$ , que foram incluídos para representar um cenário realista. O parâmetro  $\eta_{out}$  é a eficiência relativa ao BESS até o ponto de acoplamento de média tensão, sendo calculada pelo produto da eficiência dos transformadores inteligentes, cabos, conversores inteligentes e BESS no qual tais valores são atribuídos na Tabela 5. Por outro lado, já para o cálculo de  $\eta_{in}$  são consideradas as eficiências mencionadas na Tabela 6, incluindo também a eficiência de carga e descarga (90%) da Huawei BESS.

**Tabela 5:** Eficiência de saída do BESS.

Eficiência	Valores (%)
------------	-------------

<sup>1</sup> Taxa de câmbio utilizada: 5.23 R\$/US\$ em 27/03/2023 segundo (BCB, 2024).

<sup>2</sup> Temperatura em Coremas, Brasil, em 12/09/2021.

Eficiência do transformador	98,80
Eficiência do cabeamento	99,25
Eficiência PCS	98,80
$\eta_{out}$	96,98

Fonte: Autor

**Tabela 6:** Eficiência de entrada do BESS.

Eficiência	Valores (%)
Eficiência do transformador	98,90
Eficiência do cabeamento	99,25
Eficiência PCS	98,80
Eficiência da bateria	90,00
$\eta_{in}$	87,28

Fonte: Autor

Para avaliar o desempenho do EMS proposto, dois cenários foram simulados: comparação da operação ótima da planta FV/BESS sob pequenas e grandes variações de PLD.

Em ambos os cenários foi usado o perfil de geração FV previsto para o dia 12-Set-2021 (cf. Figura 23). Além disso, foram consideradas arbitrariamente a sazonalidade *flat* e a modulação *flat*, o que significa que o preço da energia contratada é constante ao longo dos meses do ano e das horas do dia.

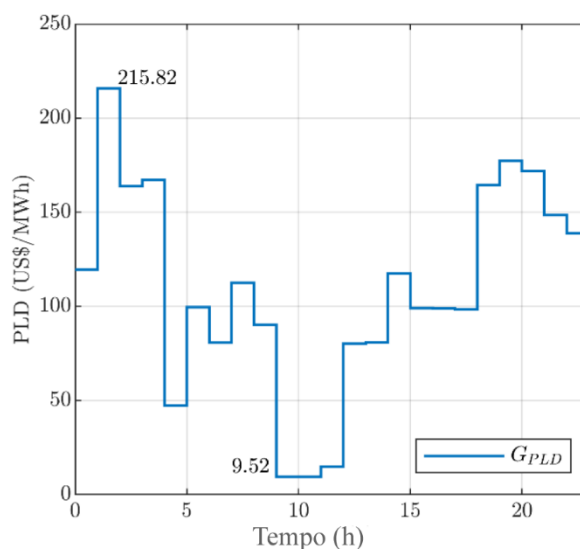
Na Figura 23, observa-se que no dia 12-Set-2021 a geração de FV ocorreu durante o dia, por volta das 6h00 às 17h00. A potência  $P_{pv}$  ultrapassa o limite contratado  $P_{lim}$  entre 10h00 e 13h00. Ademais, o consumo interno  $P_l$  foi negligenciado ao longo do dia, uma vez que a energia consumida em um sistema de geração de grande porte é muito pequena se comparada à quantidade gerada. Para o carregamento inicial da bateria foi considerado um SoC de 20% para garantir que o sistema funcione mesmo que a bateria não tenha sido carregada anteriormente, mas tenha energia disponível no início do dia.

Em ambos os cenários, a operação ótima da planta FV/BESS foi avaliada sob diferentes perfis PLD, como mostrado nas Figura 24 e Figura 28, para demonstrar o desempenho do EMS sob a variação do PLD. Os valores de PLD da Figura 24 apresentaram mediana diária de 38,86 US\$/MWh, com máximo de 42,65 US\$/MWh às 21h e mínimo de 37,36 US\$/MWh às 7h, resultando em uma variabilidade de 13,61%. Por outro lado, os valores de PLD da Figura 28 apresentaram mediana diária de 106,07 US\$/MWh, com máximo de 215,81 US\$/MWh à 1:00 e mínimo de 9,52 US\$/MWh às 9h e às 10h, resultando em uma variabilidade de 194,48%.

Considerando isso, na Figura 29, o BESS foi carregado às 10h e às 12h quando o limite de potência foi excedido e foi descarregado (até atingir o  $SoC_{min}$ ) especificamente às 21h, quando o  $G_{PLD}$  estava em seu máximo de 42,65 US\$/MWh.

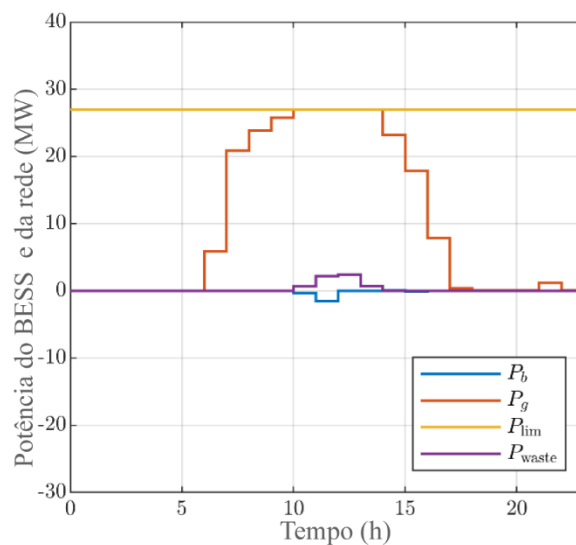
Além disso, note-se que o BESS foi carregado às 10h00 quando  $P_{lim}$  foi inicialmente excedido, mas distribuído entre as 10h00 e as 11h00.

Desta forma, evita-se que o BESS seja totalmente carregado em um único intervalo de tempo, o que preserva a vida útil da bateria. Assim que o BESS estiver totalmente carregado, a energia residual ( $P_{waste}$ ) deve ser desperdiçada para evitar a penalidade. Neste caso, um total de 5,97 MWh (7,82-1,85 MWh) foi desperdiçado.



**Figura 28:** Perfil PLD com grandes variações de valor (12-Set-2021).

Fonte: Autor



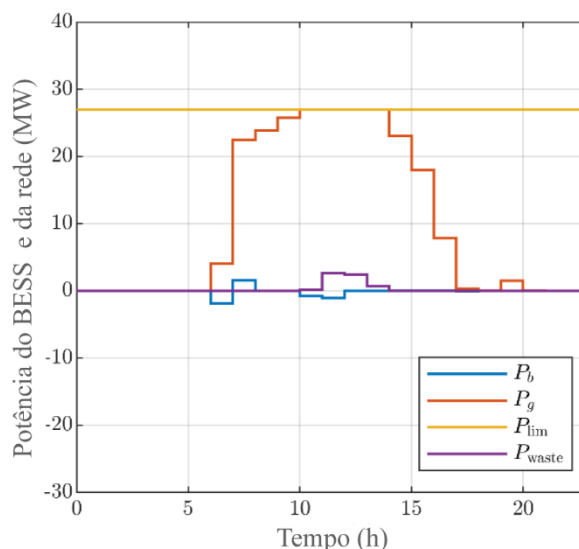
**Figura 29:** Operação da planta FV/BESS para o perfil de geração fotovoltaica do dia 12-Set-2021: potência da rede ( $P_g$ ), potência BESS ( $P_b$ ), considerando  $P_b < 0$  para carregamento e vice-versa, limite de potência contratada ( $P_{lim}$ ) e potência desperdiçada ( $P_{waste}$ ) no cenário de pequenas variações de PLD como mostrado na Figura 24.

Fonte: Autor

Por outro lado, no caso de grandes variações de PLD como mostrado na Figura 30, o BESS teve sua operação iniciada antes de  $P_{lim}$  ser atingido para que fosse cobrado a partir das 6h, seguido de alta às 7h, considerando que  $G_{PLD}$  era maior às 7h do que às 6h. Posteriormente, às 10h00 e às 11h00, o BESS foi carregado quando a potência limite foi ultrapassada e, das 14h às 17h, ocorreu novo ciclo de descarga e carga devido às variações de  $G_{PLD}$ .

Finalmente, às 19h, foi realizada a última descarga de BESS quando  $G_{PLD}$  atingiu seu valor submáximo. Da mesma forma que no cenário anterior, um total de US\$ 5,97 MWh foi desperdiçado para evitar a penalidade.

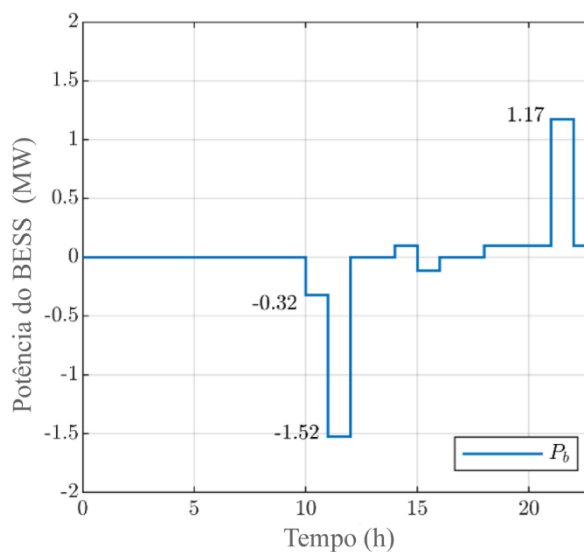




**Figura 30:** Operação da planta FV/BESS para o perfil de geração fotovoltaica do dia 12-Set-2021: potência da rede ( $P_g$ ), potência BESS ( $P_b$ ), considerando  $P_b < 0$  para carregamento e vice-versa, limite de potência contratada ( $P_{lim}$ ) e potência desperdiçada ( $P_{waste}$ ) no cenário de grandes variações de PLD como mostrado na Figura 28.

Fonte: Autor

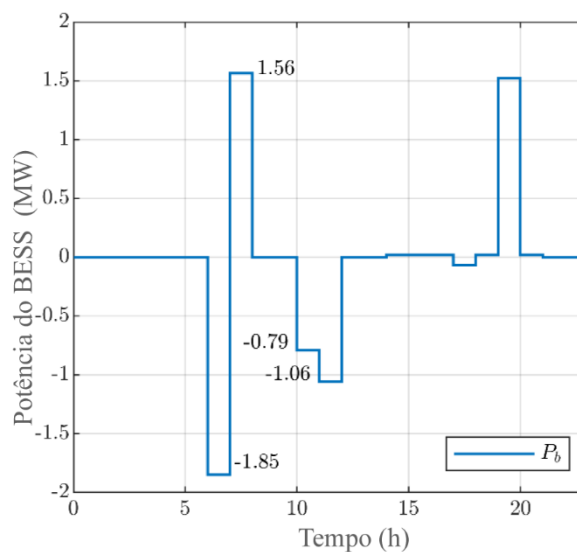
Na Figura 31, é ilustrada uma vista ampliada da potência  $P_b$  sob os diferentes perfis PLD e, a partir dela, pode ser estimada a energia trocada com a rede. Considerando inicialmente que  $SoC_{min}$  é 20%, a capacidade máxima de carga da bateria é 80% de  $Q$  dividido por  $\eta_{in}$  (ex:  $0,8Q/\eta_{in} = 1,85\text{MWh}$ ), uma vez que é necessário fornecer mais energia pelo gerador para compensar as perdas. Da mesma forma, ao descarregar o BESS,  $P_b$  é multiplicado por  $\eta_{out}$ , uma vez que a bateria é a fonte de energia. Assim, como se pode observar na Figura 31, o BESS foi parcialmente carregado com 0,32 MWh às 10:00 e 1,52 MWh às 12:00, descarregando 1,17 MWh às 21:00.



**Figura 31:** Operação ideal da planta FV/BESS para o perfil de geração fotovoltaica do dia 12-Set-2021: visão ampliada da potência do BESS ( $P_b$ ), considerando  $P_b < 0$  para carregamento e vice-versa, no cenário de pequenas variações de PLD como mostrado na Figura 24.

Fonte: Autor

No outro cenário mostrado na Figura 32, o BESS foi completamente carregado com 1,85 MWh às 6:00 e descarregado 1,56 MWh às 7:00. Esta diferença na energia de carga e descarga é explicada pela eficiência de ida e volta do BESS, que foi incluída em  $\eta_{in}$ . Da mesma forma, outros ciclos de carga e descarga ocorreram como mencionado anteriormente. Vale a pena destacar que, na operação mostrada na Figura 31, o BESS acumulou 1,87 MWh de carga em um dia, enquanto que, na operação mostrada na Figura 32, devido a variações de  $G_{PLD}$ , acumulou 3,8 MWh de carga em um dia, o que significa que a quantidade de energia que pode ser acumulada em um dia pode exceder a capacidade máxima de armazenamento do BESS. Como resultado, a central FV/BESS pode se beneficiar mais do funcionamento ótimo do BESS especialmente em casos de grandes variações de PLD do que em casos de pequenas variações de PLD. Isso ocorre porque os ganhos nos dias que mostram grande variação no PLD se devem ao maior uso da bateria. Assim, a energia pode ser vendida com mais frequência durante o dia, aumentando o lucro daquele dia específico, bem como reduzir os custos relacionados com o *calendar aging* do BESS.



**Figura 32:** Operação ideal da planta FV/BESS para o perfil de geração fotovoltaica do dia 12-Set-2021: visão ampliada da potência do BESS ( $P_b$ ), considerando  $P_b < 0$  para carregamento e vice-versa, no cenário de grandes variações de PLD como mostrado na Figura 28.

Fonte: Autor

Para demonstrar o ganho financeiro que pode ser obtido com a operação do EMS proposto, a Tabela 7 descreve a receita obtida em duas semanas de operação da UFV sem o BESS e com a operação otimizada do BESS. A primeira semana de 2021 e a semana de 12 a 18 de setembro de 2021 foram escolhidas arbitrariamente para a análise do ganho financeiro. Além disso, foram utilizados valores reais de PLD, obtidos no sítio Web do CCEE, para cada dia de funcionamento.

**Tabela 7:** O ganho financeiro do sistema de produção fotovoltaico durante duas semanas sem BESS e com o funcionamento ótimo do BESS.

<b>Data</b>	<b>Usina FV sem o BESS (US\$)</b>	<b>Op. Planta PV/BESS (US\$)</b>
01-Jan-2021	8.010,80	8.076,48
02-Jan-2021	10.285,52	10.374,41
03-Jan-2021	8.408,51	8.496,70
04-Jan-2021	8.653,87	8.661,17
05-Jan-2021	9.867,90	9.958,82
06-Jan-2021	8.061,11	9.142,54
07-Jan-2021	9.803,39	9.904,37
<b>Acumulado</b>	<b>64.091,10</b>	<b>64.614,49</b>
12-Set-2021	2.498,24	2.772,00
13-Set-2021	7.499,36	7.652,41
14-Set-2021	11.325,50	11.502,64
15-Set-2021	11.799,42	11.939,91
16-Set-2021	12.828,38	13.006,68
17-Set-2021	13.628,92	13.812,54
18-Set-2021	12.686,74	12.879,31
<b>Acumulado</b>	<b>72.266,58</b>	<b>73.565,51</b>

Fonte: Autor

Comparando os resultados para a operação da UFV sem BESS e com BESS, observa-se que, em todos os dias destacados, houve uma receita maior na operação ótima. Na primeira semana, o ganho estimado de receita acumulada pela usina FV/BESS foi 0,82% (US\$523,39 em valores absolutos) maior que a operação sem BESS. Na outra semana analisada, este ganho estimado foi de 1,8% (US\$1.298,93 em valores absolutos) sendo o dia 12 de setembro o dia em que se obteve o maior ganho financeiro de 10,96% (US\$273,75 em valores absolutos).

Para além disso, os valores de receita obtidos na primeira semana de janeiro apresentaram pequenas variações, tal como os valores de PLD para os dias dessa semana que também apresentaram pequenas variações. Da mesma forma, ocorre de 14 a 18 de setembro, com valores absolutos de receita superiores aos de janeiro porque o valor mediano de PLD foi superior em setembro.

Diferentemente do que ocorreu nos dias 14 a 18 de setembro, os valores de PLD dos dias 12 e 13 apresentaram variações significativas, com máximos ocorrendo nos períodos em que não houve geração de energia (das 00:00 às 05:00 e a partir das 18:00) e mínimos ocorrendo no horário de verão, o que impacta diretamente na receita do gerador. Em outras palavras, a UFV é cobrada pela energia contratada no valor PLD nas horas em que não há geração de energia.

Por exemplo, o valor máximo do PLD na madrugada do dia 12 de setembro foi cinco vezes superior ao valor do MWh contratado. Este fato justifica que a receita seja pelo menos quatro vezes inferior à dos dias 14 a 18 de setembro.

#### 4.2. Análise do ROI

Há variadas abordagens possíveis para otimizar o lucro de uma UFV/BESS. Em concordância com as seções anteriores, uma das abordagens é a operação diária ótima com influência do mercado de energia e nas características da usina. De maneira semelhante, outra estratégia que pode se complementar a isso é encontrar o melhor contrato para a UFV. Assim, para definir o melhor contrato para usina, o impacto de inserção do BESS na usina de Coremas IV foi analisado em termos financeiros para determinar sua viabilidade avaliando o impacto de diferentes tamanhos de BESS.

O sistema de armazenamento de energia ainda é um alto custo, logo, pode levar mais tempo para que os benefícios financeiros superem o investimento. Levando isso em consideração, a principal variável utilizada para definir o tamanho do BESS foi o período de retorno de investimento (ROI).

Uma simulação de um ano foi feita para obter o ROI para diferentes tamanhos do BESS, considerando que os próximos anos terão praticamente o mesmo comportamento que o ano trabalhado aqui que é o de 2021. O valor escolhido foi o cenário com o menor ROI. O cenário analisado aqui aborda a operação de curto prazo.

Com o tamanho fixo da usina de 31,2 MW, foram testados diferentes tamanhos de BESS, variando de um contêiner (2MWh) a dez contêineres (20 MWh), avaliando o ROI para cada caso. Foram escolhidos dois modos de operações diferentes. O primeiro foi com a realização do *peak-shaving* carregando o BESS com o excesso de FV e descarregando-a a partir da 18:00 horas até atingir o  $SoC_{\min}$ . O segundo foi a operação otimizada.

O preço base de uma bateria foi de 132 US\$/kWh<sup>3</sup> multiplicado por  $Q$  para obter o valor de cada contêiner LUNA2000. Os preços do BESS considerados neste estudo estão dados na Tabela 8.

---

<sup>3</sup> Taxa de câmbio utilizada: 5.23 R\$/US\$ em 27/03/2023 segundo (BCB, 2024).

**Tabela 8:** Preços do BESS.

Capacidade (MWh)	Preço (R\$)
2	1.596.700,00
4	3.193.300,00
6	4.790.000,00
8	6.386.700,00
10	7.983.400,00
12	9.580.000,00
14	11.176.700,00
16	12.773.376,00
18	14.370.000,00
20	15.966.700,00

Fonte: Autor

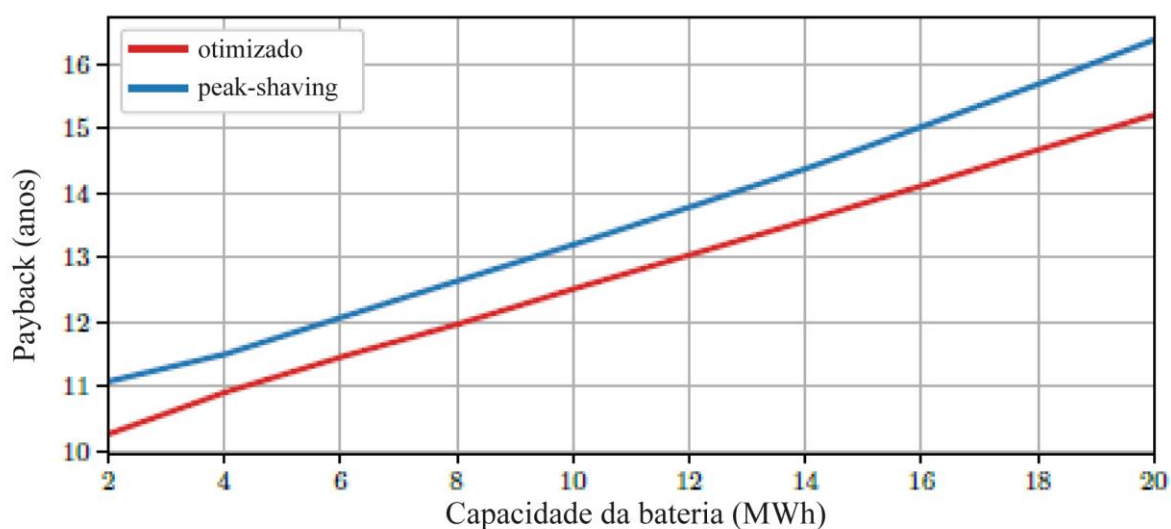
O primeiro ponto observado é o período do ROI com relação aos tamanhos do BESS mostrado na Figura 33. É possível notar que o ROI é diretamente afetado pelo tamanho do BESS. Mesmo a bateria sendo de tamanho maior e conseqüentemente armazenar mais energia, é mais vantajoso economicamente instalar uma bateria menor.

O ROI de menor período foi de dez anos e três meses para operação otimizada com um sistema de 2 MWh para o preço de energia considerado (180 R\$/MWh). Por causa dessa conclusão de que a bateria de 2 MWh foi escolhida como pesquisa deste trabalho.

O sistema de armazenamento de energia garante um ganho financeiro para o sistema fotovoltaico. Em conformidade do que é mostrado na Figura 35, o ganho aumenta à medida que a capacidade da bateria cresce,

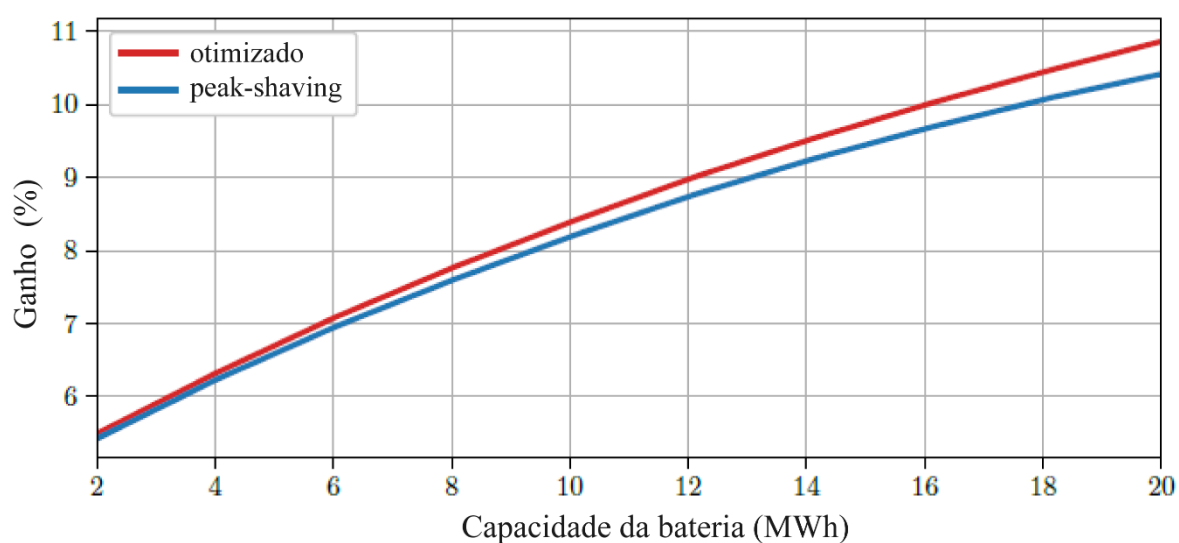
Entretanto, a curva da Figura 34 sinaliza uma tendência a saturação do ganho. Com um BESS maior, toda a energia excedente do sistema fotovoltaico será utilizada e a receita máxima será alcançada. Dessa forma, aumentar o dimensionamento do BESS depois disso não adiantará mais pois o ganho permanecerá o mesmo. É importante ressaltar também que o sistema otimizado tende a aumentar o seu ganho com um BESS maior, como é detalhado na Figura 35. Isso ocorre por causa da maior possibilidade de operar com mais potência e energia armazenada.

Portanto, o ganho aumenta à proporção que o tamanho do BESS também aumenta. Isso garante um resultado melhor com relação a redução de picos. Todavia, o período mínimo do ROI foi o de 10 anos e 3 meses para o tamanho mínimo disponível do BESS, de 2 MWh. Esse resultado mostra que a viabilidade da bateria depende diretamente do preço da energia e do preço da bateria uma vez que a Figura 34 visa um ganho de 5,5% com a operação otimizada. Porém, o BESS ainda é uma tecnologia com preço elevado para o cenário atual.



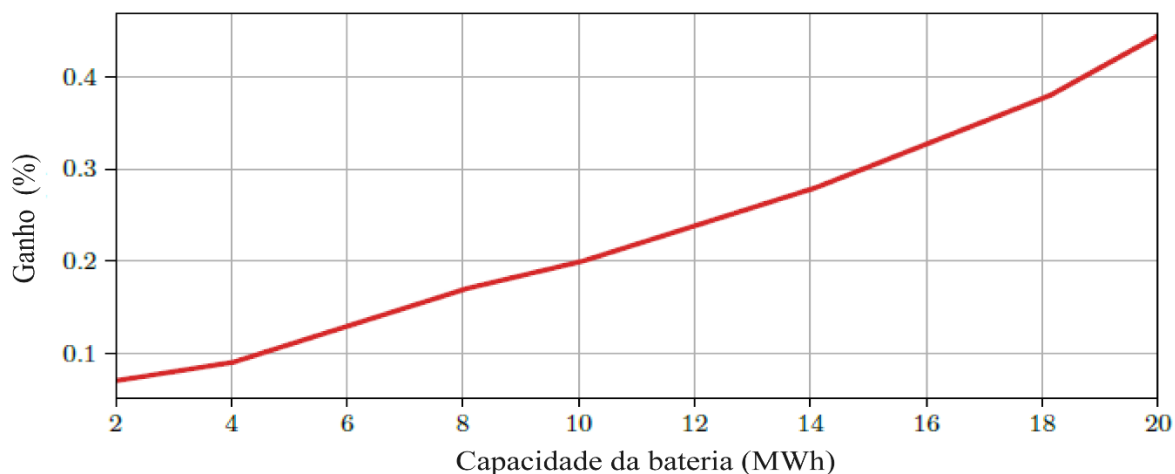
**Figura 33:** ROI para diferentes tamanhos de bateria.

Fonte: Autor



**Figura 34:** Ganho financeiro da operação otimizada em relação ao sistema original.

Fonte: Autor



**Figura 35:** Ganho financeiro da operação otimizada em relação à operação de corte de pico.

Fonte: Autor

O ROI foi calculado com base na simulação da usina e operação em um ano com dados do PLD do ano de 2021 (PLD horário) e dados de geração de 2021 disponibilizado pela própria usina. Os resultados e as variáveis consideradas estão na Tabela 9 para o sistema utilizando o BESS com operação otimizada e o sistema utilizando o *peak-shaving*.

**Tabela 9:** Análise de variáveis para a viabilidade do sistema FV/BESS com operação *peak-shaving*, otimizada e sem o BESS para o ano de 2021.

Variáveis	<i>Peak-shaving</i>	Com otimização	Planta sem BESS
Preço do BESS (R\$ e06)		1,5967	-
<i>N</i>	250,5029	285,5636	-
Lucro (R\$ e06)	17,4360	17,4480	16,5380
Ganho	5,43 %	5,50 %	-
ROI	11,0723	10,2568	-

Fonte: Autor

O sistema FV/BESS com otimização obteve um ganho de 0,07% em relação ao sistema operando apenas com o *peak-shaving* para o ano de 2021. Nesse ano, foram realizados 285 ciclos, o que representa uma boa utilização da bateria, pois garante uma melhoria na vida útil dela uma vez que o custo de *calendar aging* é diminuído e também proporciona um maior lucro total, considerando esse benefício atendido durante esses dias. Em contradição a isso, durante, provavelmente, 80 dias houve a operação mínima do BESS, pois provavelmente, neste período, a usina não atingiu o *Plim*. Além disso, utilizando 80% do DoD, são esperados para as baterias Luna2000 mais de 6000 ciclos para o BESS. Assim, considerando apenas o número de ciclos



das baterias, o sistema pode ser estimado que leve 30 anos para chegar ao seu ponto de fim de vida. No entanto, como visto na Tabela 9, o ROI encontrado foi de 10 anos e 3 meses. Ademais, se o sistema FV atingir sua potência máxima ao longo do ano, espera-se obter um ROI menor, considerando que há um aumento de ciclos por ano. Portanto, conclui-se que a otimização FV/BESS traz um ganho considerável durante seu tempo de uso e o ROI é obtido ao longo de um período menor que o período estimado para a utilização das baterias.

### 4.3. Comparação do sistema de otimização

O sistema EMS da integração FV/BESS também foi desenvolvido no ambiente de implementação *Python*, o algoritmo de otimização foi desenvolvido através da biblioteca *DEAP*. Assim, a fim de testar a comprovação do AG em si, foi realizada uma comparação entre o (ga, 2023), biblioteca do MATLAB, e o (DEAP, 2023), biblioteca do *Python*.

O *DEAP* (*Distributed Evolutionary Algorithms in Python*) é uma estrutura de computação evolutiva que prototipagem rápida e teste de ideias, ele procura tornar os algoritmos explícitos e estruturas de dados transparentes de modo a ser usado não de forma limitante, mas como desejado pelo problema a que se quer criar (DEAP, 2023).

Desse modo, o algoritmo no *DEAP* foi configurado com os mesmos valores já listados nas Tabela 4 ,Tabela 5: Eficiência de saída do BESS.

Eficiência	Valores (%)
Eficiência do transformador	98,80
Eficiência do cabeamento	99,25
Eficiência PCS	98,80
$\eta_{out}$	96,98

Fonte: Autor

**Tabela 6 e Erro! Fonte de referência não encontrada.** e mesma arquitetura dos equipamentos listados na Tabela 3. O funcionamento do AG no (DEAP, 2023) funciona basicamente da mesma forma que foi apresentado no fluxograma da Figura 26, havendo modificações no funcionamento da configuração da cruzamento e mutação. As configurações usadas como parâmetros para o AG do DEAP são apresentadas na Tabela 10.

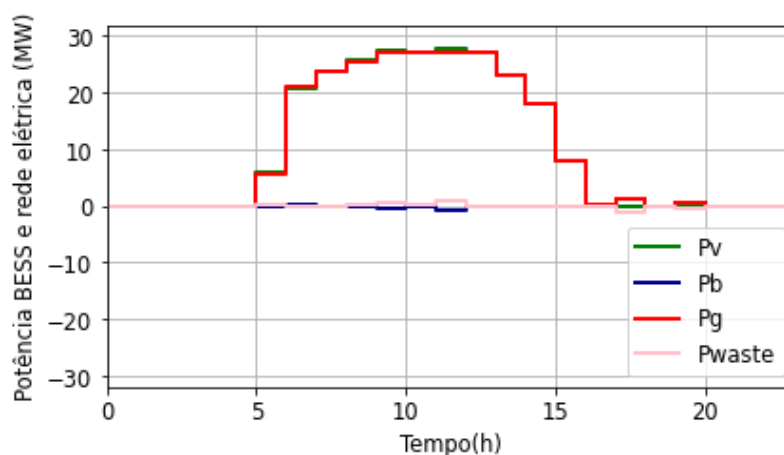
**Tabela 10:** Parâmetros para o AG do DEAP.

Descrição	Valores
Dimensão de saída	24
Tamanho da população	1000
Limite de parada da geração	50
Taxa de sucesso de cruzamento	40%
Taxa de mutação	15 %
Elites mantidas	80 %
Restrições populacionais iniciais	-2.016, 2.016 MWh

Fonte: Autor

A opção dentro do AG do (DEAP, 2023) de mutação foi *mutFlipBit* (inverte os genes de lugar) e de cruzamento foi *cxUniform* (cruza dois indivíduos, modificando os outros dois da sequência de geração).

Assim, o gráfico da potência do BESS e o gráfico das potências BESS, da rede elétrica e da potência de geração são mostrados nas Figura 36 e Figura 37.

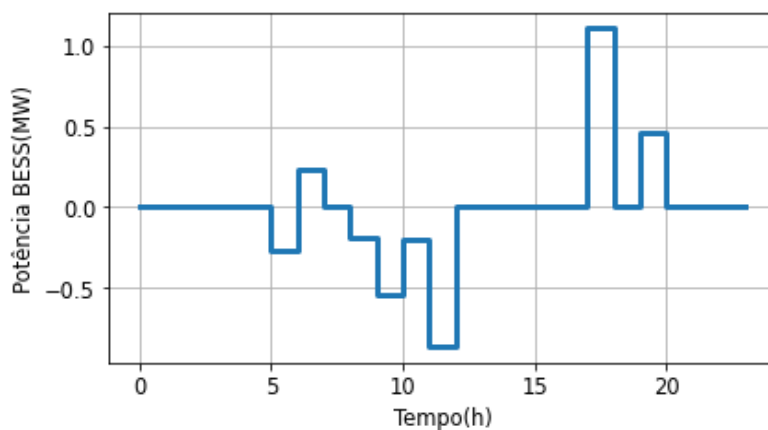


**Figura 36:** Operação da planta FV/BESS para o perfil de geração fotovoltaica do dia 12-Set-2021: potência da rede (Pg) , potência BESS (Pb), considerando  $P_b < 0$  para carregamento e vice-versa, potência fotovoltaica (Pv) e potência desperdiçada (Pwaste) no cenário de grandes variações de PLD como mostrado na Figura 28.

Fonte: Autor

Como pode ser observado, o modo de funcionamento do mesmo sistema nos diferentes ambientes de implementação se comportou basicamente da mesma forma como pode ser notado comparando Figura 30 com a Figura 36. A bateria tende a carregar e descarregar mais vezes

durante todo o dia por causa das altas variações do PLD. Na Figura 32 e Figura 37 também é possível notar essas semelhanças de comportamento. Além disso, o ganho financeiro para esse dia do algoritmo *DEAP* se aproxima muito, para o dia 12-set-2021, com o apresentado na Tabela 7, tendo seu valor dado por US\$ 2674, 44, isto é, o (ga, 2023) do MATLAB tem um ganho 3,5 % a mais comparado com AG do (DEAP, 2023). No entanto, em relação a tempo computacional, o (ga, 2023) “roda” seu algoritmo em um tempo de 60 segundos, comparado com AG do (DEAP, 2023) de 5 segundos. Portanto, conclui-se que em relação a tempo computacional, o sistema funcionamento em *Python* é mais eficiente, porém, o sistema do MATLAB ganha em relação a termos financeiros, o que é de extrema relevância. Acredita-se que calibrando melhor o algoritmo AG do DEAP, haja possibilidade de obter um ganho maior.



**Figura 37:** Operação ideal da planta FV/BESS para o perfil de geração fotovoltaica do dia 12-Set-2021: visão ampliada da potência do BESS ( $P_b$ ), considerando  $P_b < 0$  para carregamento e vice-versa, no cenário de grandes variações de PLD como mostrado na Figura 28.

Fonte: Autor

## 5. CONCLUSÃO

Neste trabalho, uma solução EMS para a programação ótima de BESS foi proposta para uma planta FV em escala de utilidade pública, com o objetivo de permitir a integração de BESS à geração centralizada e reduzir o tempo de retorno do investimento. O objeto de estudo é uma usina FV centralizada de 31,2 MWp localizada em Coremas, Brasil.

Para isso, uma função o objetivo foi proposta para maximizar os lucros, incluindo funções de custo de receita, degradação da bateria com limites dinâmicos de energia BESS e a penalidade em caso de exceder o limite de energia contratado. A função de custo da receita foi modelada com base no sistema tarifário brasileiro que considera o PLD. A função do CDB modelou os custos para uma operação diária do BESS relacionados ao envelhecimento do calendário, DoD e perda total da bateria. Por fim, foi desenvolvida uma modelagem de penalidades considerando a perda de descontos e benefícios.

O problema de otimização foi resolvido usando AG, considerando uma operação de curto prazo da planta FV/BESS. O otimizador proposto foi validado através de simulações que representam fielmente a operação da UFV de Coremas-IV. As entradas dinâmicas para o EMS foram a potência FV gerada e o valor diário de PLD, tendo, como saída, a potência ótima de carga e descarga do BESS. A partir dos resultados simulados, foi verificado um ganho financeiro diário na operação otimizada do BESS em relação à operação da planta FV sem BESS, destacando que quanto maior a variação do PLD no dia, maior o ganho relativo de que receita pode ser obtido.

Além disso, como resultado da modelagem proposta, podem ser destacados os seguintes pontos:

- O custo relacionado ao impacto do DoD resulta na distribuição da potência de carga/descarga, principalmente quando há excesso de energia gerada, proporcionando menor degradação da bateria, pois uma carga/descarga em níveis de potência menores, distribuídos ao longo do tempo, resulta em um maior número máximo de ciclos para um determinado EOL.
- O custo do envelhecimento do calendário permite o funcionamento do BESS nos dias em que não há energia excedente. Desta forma, não há ganho financeiro, no entanto, incorre-se no prolongamento da vida útil da bateria.

- O PLD como variável de entrada permite que a quantidade de energia que pode ser armazenada e despachada em um dia possa exceder a capacidade máxima de armazenamento do BESS, gerando assim uma receita adicional.
- O ROI foi de 10 anos e 3 meses, o que é um valor razoável para a empresa, caso a bateria tenha um tempo de vida maior que isso.
- O AG desenvolvido com a biblioteca do MATLAB obteve resultados semelhantes aos resultados do AG da biblioteca do *python* o que indica uma certa comprovação no desenvolvimento do algoritmo e os resultados obtidos em simulação.

Como continuidade deste trabalho, é possível i) avaliar a operação otimizada do BESS na variação da modulação e da sazonalidade (ou seja, variabilidade da energia contratada ao longo dos meses e horas); ii) avaliar a operação otimizada do BESS em cenários de sombreamento da geração FV; e iii) dimensionar o BESS para melhor atender ao montante de geração excedido; iv) observar outros algoritmos evolutivos para questão de comparação de tempo computacional.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ABSOLAR, ABSOLAR. **Brasil avança no ranking mundial da fonte solar.** [S. l.], 2022. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/noticia/brasil-avanca-no-ranking-mundial-da-fonte-solar/>. Acesso em: 21 nov. 2023.

ANDO, Ryu *et al.* A Planned Power Generation for Battery-Assisted Photovoltaic System Using Short-Term Forecast. **IEEE Access**, [s. l.], v. 9, p. 125238–125246, 2021.

ANGELIM, J. H.; AFFONSO, C. M. Energy management on university campus with photovoltaic generation and BESS using simulated annealing. *In*: 2018 IEEE TEXAS POWER AND ENERGY CONFERENCE (TPEC), 2018, College Station, TX. **2018 IEEE Texas Power and Energy Conference (TPEC)**. College Station, TX: IEEE, 2018. p. 1–6. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8312112/>. Acesso em: 29 jan. 2024.

BADAWY, Mohamed O.; SOZER, Yilmaz. Power Flow Management of a Grid Tied PV-Battery System for Electric Vehicles Charging. **IEEE Transactions on Industry Applications**, [s. l.], v. 53, n. 2, p. 1347–1357, 2017.

BAGALINI, V. *et al.* Solar PV-Battery-Electric Grid-Based Energy System for Residential Applications: System Configuration and Viability. **Research**, [s. l.], v. 2019, p. 2019/3838603, 2019.

BCB. Cotação Dólar EUA. *In*: 2024. Disponível em: <https://www.bcb.gov.br/>. Acesso em: 15 mar. 2024.

BITENCOURT, L. *et al.* Maximum PV Penetration Under Voltage Constraints Considering Optimal Sizing of BESS on Brazilian Secondary Distribution Network. **IEEE Latin America Transactions**, [s. l.], v. 14, n. 9, p. 4063–4069, 2016.

BNEF, BNEF. **Lithium-ion Battery Pack Prices Rise for First Time to an Average of \$151/kWh.** [S. l.], 2022. Disponível em: <https://about.bnef.com/blog/lithium-ion-battery-pack-prices-rise-for-first-time-to-an-average-of-151-kwh>. Acesso em: 17 out. 2023.

CANALENERGIA, CanalEnergia. **Consumo de energia tem alta de 0,6% em agosto, puxado pelo mercado livre.** [S. l.], 2022. Disponível em: <https://www.canalenergia.com.br/noticias/53225208/consumo-de-energia-tem-alta-de-06-em-agosto-puxado-pelo-mercado-livre>. Acesso em: 6 jun. 2023.

CARLI, Raffaele *et al.* Energy scheduling of a smart microgrid with shared photovoltaic panels and storage: The case of the Ballen marina in Samsø. **Energy**, [s. l.], v. 198, p. 117188, 2020.

CCEE. **Balço energético.** [S. l.: s. n.], 2020. Disponível em: <https://capacita.ccee.org.br/home/teams/categories>. Acesso em: 23 jan. 2023.

CCEE. **Cálculo do Desconto Aplicado à TUST/TUSD - Geradores.** [S. l.], 2019. Disponível em: <https://capacita.ccee.org.br/auth/signi>. Acesso em: 8 jun. 2023.

CCEE. **Contratos.** [S. l.: s. n.], 2018. Disponível em: [https://capacita.ccee.org.br/home/choice\\_courses?category\\_filter=1153](https://capacita.ccee.org.br/home/choice_courses?category_filter=1153). Acesso em: 22 jan. 2023.

CCEE. **Uma outra característica relacionada com o PLD é que o SIN é dividido em submercados e são estabelecidos preços para liquidar no MCP diferentes para cada região.** [S. l.: s. n.], 2021. Disponível em: <https://capacita.ccee.org.br/home/teams/categories>. Acesso em: 23 jan. 2023.

CHEN, Xin; XIAO, Mingqing; WEN, Bincheng. Remaining Useful Life Prediction of Lithium-Ion Batteries Based on Cataclysmic Mutation Genetic Algorithm and Support Vector Regression. *In: 2021 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER ELECTRONICS, COMPUTER APPLICATIONS (ICPECA), 2021, Shenyang, China. 2021 IEEE International Conference on Power Electronics, Computer Applications (ICPECA).* Shenyang, China: IEEE, 2021. p. 766–769. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9362683/>. Acesso em: 18 jan. 2024.

CONTE, Francesco *et al.* A Stochastic Optimization Method for Planning and Real-Time Control of Integrated PV-Storage Systems: Design and Experimental Validation. **IEEE Transactions on Sustainable Energy**, [s. l.], v. 9, n. 3, p. 1188–1197, 2018.

CONTE, Francesco *et al.* Day-Ahead and Intra-Day Planning of Integrated BESS-PV Systems Providing Frequency Regulation. **IEEE Transactions on Sustainable Energy**, [s. l.], v. 11, n. 3, p. 1797–1806, 2020.

DAI, Qiongjie; LIU, Jicheng; WEI, Qiushuang. Optimal Photovoltaic/Battery Energy Storage/Electric Vehicle Charging Station Design Based on Multi-Agent Particle Swarm Optimization Algorithm. **Sustainability**, [s. l.], v. 11, n. 7, p. 1973, 2019.

DAS, Choton K. *et al.* Overview of energy storage systems in distribution networks: Placement, sizing, operation, and power quality. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 91, p. 1205–1230, 2018.

DEAP. **DEAP documentation - Distributed Evolutionary Algorithms in Python.** [S. l.], 2023. Disponível em: <https://deap.readthedocs.io/en/master/#>. Acesso em: 2 fev. 2023.

DEOTTI, Lucas *et al.* Technical and Economic Analysis of Battery Storage for Residential Solar Photovoltaic Systems in the Brazilian Regulatory Context. **Energies**, [s. l.], v. 13, n. 24, p. 6517, 2020.

GA, ga. **Ga.** [S. l.], 2023. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/gads/ga.html>. Acesso em: 18 jan. 2023.

HAAS, Lucas. **Otimização de um Sistema de Armazenamento de Energia em Baterias para Suavização dos Efeitos de Sombreamento em Usinas Fotovoltaicas.** [S. l.: s. n.], 2023. Disponível em: <https://www.cear.ufpb.br/ppger/contents/menu/documentos/dissertacoes-1/2023-2024>. Acesso em: 16 jan. 2023.

HANNAN, M.A. *et al.* Battery energy-storage system: A review of technologies, optimization objectives, constraints, approaches, and outstanding issues. **Journal of Energy Storage**, [s. l.], v. 42, p. 103023, 2021.

HOKE, Anderson *et al.* Accounting for Lithium-Ion Battery Degradation in Electric Vehicle Charging Optimization. **IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics**, [s. l.], v. 2, n. 3, p. 691–700, 2014.

IRENA, IRENA. **Annual patents filed for energy storage technologies, World.** [S. l.], 2022. Disponível em: <https://ourworldindata.org/grapher/patents-energy-storage>. Acesso em: 17 out. 2023.

MEJÍA-GIRALDO, Diego *et al.* A BESS Sizing Strategy for Primary Frequency Regulation Support of Solar Photovoltaic Plants. **Energies**, [s. l.], v. 12, n. 2, p. 317, 2019.

MOHAMMADI, Fazel; SAIF, Mehrdad. A comprehensive overview of electric vehicle batteries market. **e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy**, [s. l.], v. 3, p. 100127, 2023.

MULLERIYAWAGE, U.G.K.; SHEN, W.X. Optimally sizing of battery energy storage capacity by operational optimization of residential PV-Battery systems: An Australian household case study. **Renewable Energy**, [s. l.], v. 160, p. 852–864, 2020.

NASA, NASA. **NASA POWER | Prediction Of Worldwide Energy Resources.** [S. l.], 2021. Disponível em: <https://power.larc.nasa.gov/>. Acesso em: 9 abr. 2023.

PDE 2029. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2029.** [S. l.]: EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2018. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Documents/PDE%202029.pdf>. Acesso em: 31 jan. 2023.



RANA, Md Masud *et al.* A review on hybrid photovoltaic – Battery energy storage system: Current status, challenges, and future directions. **Journal of Energy Storage**, [s. l.], v. 51, p. 104597, 2022.

ROCHA, Jessica P. M.; SALVADORI, Fabiano; GEHRKE, Camila S. Provision of ancillary service in a grid-connected photovoltaic power system. *In*: 2018 IEEE APPLIED POWER ELECTRONICS CONFERENCE AND EXPOSITION (APEC), 2018, San Antonio, TX, USA. **2018 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)**. San Antonio, TX, USA: IEEE, 2018. p. 2355–2361. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8341345/>. Acesso em: 8 nov. 2023.

ROTELLA JUNIOR, Paulo *et al.* Economic Analysis of the Investments in Battery Energy Storage Systems: Review and Current Perspectives. **Energies**, [s. l.], v. 14, n. 9, p. 2503, 2021.

S. ALVES, Camila *et al.* Alocação Ótima de Sistemas de Armazenamento de Energia a Baterias para Mitigar Sobretensão em Redes Elétricas sob Massiva Penetração de Geração Fotovoltaica. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - SBSE2020, 2020. **Anais do Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos 2020**. [S. l.]: sbabra, 2020. Disponível em: [https://www.sba.org.br/open\\_journal\\_systems/index.php/sbse/article/view/2310](https://www.sba.org.br/open_journal_systems/index.php/sbse/article/view/2310). Acesso em: 18 jan. 2024.

SANTOS, Rafael; MACÊDO, Euler. **Estimação do Estado de Carga de Baterias de Lítio-íon em Diferentes Condições de Temperaturas Utilizando Filtros de Kalman**. [S. l.: s. n.], 2019. Disponível em: Acesso em: 20 jan. 2023.

SWIERCZYNSKI, Maciej *et al.* Lifetime Estimation of the Nanophosphate  $\text{LiFePO}_4/\text{C}$  Battery Chemistry Used in Fully Electric Vehicles. **IEEE Transactions on Industry Applications**, [s. l.], v. 51, n. 4, p. 3453–3461, 2015.

THOKAR, Rayees Ahmad *et al.* Multiobjective nested optimization framework for simultaneous integration of multiple photovoltaic and battery energy storage systems in distribution networks. **Journal of Energy Storage**, [s. l.], v. 35, p. 102263, 2021.

TIAN, Yuting *et al.* Stacked Revenue and Technical Benefits of a Grid-connected Energy Storage System. [s. l.], 2017.

VAN ECK, Nees Jan; WALTMAN, Ludo. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. **Scientometrics**, [s. l.], v. 84, n. 2, p. 523–538, 2010.

- WEG. **Complexo Solar de Coremas é inaugurado na Paraíba**. [S. l.], 2020. Disponível em: <https://www.weg.net/institutional/BR/pt/news/produtos-e-solucoes/complexo-solar-de-coremas-e-inaugurado-na-paraiba>. Acesso em: 16 jan. 2023.
- WU, Ji *et al.* Energy Management Strategy for Grid-Tied Microgrids Considering the Energy Storage Efficiency. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, [s. l.], v. 65, n. 12, p. 9539–9549, 2018.
- WU, Yaling *et al.* Optimal battery capacity of grid-connected PV-battery systems considering battery degradation. **Renewable Energy**, [s. l.], v. 181, p. 10–23, 2022.
- YANG, Hejun *et al.* Optimal two-stage dispatch method of household PV-BESS integrated generation system under time-of-use electricity price. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, [s. l.], v. 123, p. 106244, 2020.
- YAO, Meiqi; CAI, Xu. Energy Storage Sizing Optimization for Large-Scale PV Power Plant. **IEEE Access**, [s. l.], v. 9, p. 75599–75607, 2021.
- ZIA, Muhammad Fahad; ELBOUCHIKHI, Elhoussin; BENBOUZID, Mohamed. Optimal operational planning of scalable DC microgrid with demand response, islanding, and battery degradation cost considerations. **Applied Energy**, [s. l.], v. 237, p. 695–707, 2019.