



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ANTÔNIO VANDERLEI BRITO VIEIRA

ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DO USO DA
TECNOLOGIA *BATTERY ENERGY STORAGE SYSTEM* (BESS) EM USINAS
DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA NA REGIÃO SEMIÁRIDA DO
RIO GRANDE DO NORTE

MOSSORÓ

2024

ANTÔNIO VANDERLEI BRITO VIEIRA

ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DO USO DA TECNOLOGIA
BATTERY ENERGY STORAGE SYSTEM (BESS) EM USINAS DE ENERGIA SOLAR
FOTOVOLTAICA NA REGIÃO SEMIÁRIDA DO RIO GRANDE DO NORTE

Dissertação apresentada ao Mestrado em Engenharia Elétrica do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Linha de Pesquisa: Sistemas Elétricos

Orientador: Ednardo Pereira da Rocha, Prof. Dr.

Co-orientador: Rogerio Diogne de Souza e Silva, Prof. Dr.

MOSSORÓ

2024

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo autor(a).
Biblioteca Campus Mossoró / Setor de Informação e Referência
Bibliotecária: Keina Cristina Santos Sousa e Silva
CRB: 15/120

V658a Vieira, Vanderlei.
ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DO
USO DA TECNOLOGIA BATTERY ENERGY STORAGE SYSTEM
(BESS) EM USINAS DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA NA
REGIÃO SEMIÁRIDA DO RIO GRANDE DO NORTE /
Vanderlei Vieira. - 2024.
93 f. : il.

Orientador: Ednardo Pereira.
Coorientador: Rogério Diogne.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em
Engenharia Elétrica, 2024.

1. Gerenciamento. 2. Eficiência Energética. 3.
Armazenamento de Energia. 4. Confiabilidade. I.
Pereira, Ednardo, orient. II. Diogne, Rogério, co-
orient. III. Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

ANTÔNIO VANDERLEI BRITO VIEIRA

ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DO USO DA TECNOLOGIA
BATTERY ENERGY STORAGE SYSTEM (BESS) EM USINAS DE ENERGIA SOLAR
FOTOVOLTAICA NA REGIÃO SEMI-ÁRIDA DO RIO GRANDE DO NORTE

Dissertação apresentada ao Mestrado em Engenharia Elétrica do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Linha de Pesquisa: Sistemas Elétricos

Defendida em: 23/05/2024.

BANCA EXAMINADORA

Ednardo Pereira da Rocha, Prof. Dr. (UFERSA)
Presidente

Rogério Diogne de Souza e Silva, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

Adriano Aron Freitas de Moura, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

Magno Medeiros de Araújo, Prof. Dr. (IFRN)
Membro Examinador

AGRADECIMENTOS

Com imensa gratidão em meu coração, inicio expressando minha sincera reverência a Deus, cujo amor e proteção me acompanham em todos os dias da minha jornada. Sua presença constante enche cada passo meu de força, alimentando a chama dos meus sonhos e fortalecendo minha determinação.

Agradeço à minha mãe, Zilma Maria (in memoriam), que está presente em meu coração, e ao meu pai, cujo apoio incondicional é um pilar em minha vida, meu eterno reconhecimento.

À minha companheira, Arilene Franklin, cujo amor e apoio são minha âncora nos momentos mais desafiadores, pela paciência que teve comigo nessa etapa da minha vida, por ter sido abrigo nos momentos de angústia e por ter vibrado comigo em cada fase vencida, sou imensamente grato.

Não poderia deixar de expressar minha profunda gratidão aos meus filhos, Nicolás e Larissa, fonte de inspiração e alegria em minha jornada. Vocês são luz em minha vida.

Agradeço igualmente ao meu orientador, Professor Doutor Ednardo Pereira, e ao meu coorientador, Professor Doutor Rogério Diogne, pela sua notável competência, infinita paciência e valiosa contribuição para este trabalho. Sua aceitação em me guiar foi um presente, e sua orientação foi uma bússola que me conduziu ao sucesso.

A todos que, de alguma forma, torceram por mim nesta etapa crucial, meu mais profundo agradecimento!

À minha família, que sempre esteve ao meu lado, oferecendo suporte e encorajamento em cada etapa da minha carreira, meu eterno reconhecimento. Seu amor e apoio são o alicerce sobre o qual construo meus sonhos e conquistas. Obrigado a todos por fazerem parte desta jornada tão significativa em minha vida.

“Se você quiser descobrir os segredos do
Universo, pense em termos de energia,
frequência e vibração.”
Nikola Tesla

RESUMO

As tecnologias de armazenamento de energia estão se tornando cada vez mais importantes no setor de geração de energia elétrica, especialmente em sistemas que utilizam fontes renováveis de energia, como a energia solar. No semiárido do Rio Grande do Norte, onde a radiação solar é abundante, a utilização de sistemas de geração de energia solar pode ser uma solução viável e sustentável para a demanda energética. Devido à proximidade com a linha do equador, a região recebe altos níveis de radiação solar durante todo o ano, com uma média anual de irradiação solar entre 5 e 6 kWh/m² por dia. Além disso, a região apresenta uma variação anual de aproximadamente 20% na intensidade da radiação solar, o que ainda a torna uma opção atraente para a produção de energia solar fotovoltaica de maneira previsível e estável. Nesse contexto, o *Battery Energy Storage System* (BESS) pode ser uma solução viável para aumentar a confiabilidade do fornecimento de energia elétrica. O BESS consiste em armazenar a energia gerada pelos painéis solares em baterias, permitindo sua utilização posterior quando a geração de energia solar não é suficiente. Isso garante que a energia possa ser utilizada de forma mais eficiente, especialmente durante períodos de alta demanda ou quando ocorrem interrupções no fornecimento de energia elétrica. Este trabalho tem como objetivo principal apresentar uma análise da viabilidade técnica e econômica para a implementação da tecnologia BESS em usinas de geração solar de energia no campus da Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA em Mossoró - Rio Grande do Norte. A metodologia proposta envolve a coleta de dados sobre o consumo de energia elétrica do campus, o estudo das opções tecnológicas disponíveis para a implementação do BESS, a realização de análises técnicas e econômicas. Espera-se que os resultados obtidos permitam a implementação do sistema de armazenamento de energia BESS em usinas de geração de energia solar fotovoltaica no campus da Universidade, levando em consideração aspectos técnicos, econômicos e ambientais. Com isso, será possível garantir a confiabilidade do fornecimento de energia elétrica, reduzir custos e contribuir para a preservação ambiental.

Palavras-chave: Gerenciamento; Eficiência Energética; Armazenamento de Energia; Confiabilidade.

ABSTRACT

Energy storage technologies are becoming increasingly important in the electricity generation sector, especially in systems that utilize renewable energy sources such as solar power. In the Semiarid region of Rio Grande do Norte, where solar radiation is abundant, the use of solar power generation systems can be a viable and sustainable solution for energy demand. The Semiarid region of Rio Grande do Norte presents solar radiation characteristics that favor photovoltaic energy production. Due to its proximity to the equator, the region receives high levels of solar radiation throughout the year, with an annual average of solar irradiation between 5 and 6 kWh/m² per day. Additionally, the region experiences little variation in solar radiation intensity throughout the year, making photovoltaic solar energy production more predictable and stable. In this context, the Battery Energy Storage System (BESS) can be a viable solution to increase the reliability of electricity supply. BESS involves storing the energy generated by solar panels in batteries, allowing for later use when solar energy generation is insufficient. This ensures that energy can be utilized more efficiently, especially during periods of high demand or when power outages occur. The main objective of this work is to present an analysis of the technical and economic feasibility for implementing BESS technology in solar energy generation plants at the campus of the Federal Rural University of the Semiarid Region (UFERSA) in Mossoró, Rio Grande do Norte. The proposed methodology involves collecting data on the campus's electricity consumption, studying the technological options available for BESS implementation, assessing the potential for solar energy generation on-site, and conducting technical and economic analyses. It is expected that the results obtained will enable the implementation of the BESS energy storage system in photovoltaic solar energy generation plants on the university campus, taking into account technical, economic, and environmental aspects. This will help ensure the reliability of electricity supply, reduce costs, and contribute to environmental preservation.

Keywords: Management; Energy Efficiency; Energy Storage; Reliability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Processo de geração elétrica com painéis fotovoltaicos	11
Figura 2 – Fluxograma aplicações práticas da energia solar	12
Figura 3 – Irradiação Normal Direta Anual do Rio Grande do Norte.....	14
Figura 4 – Tecnologias de armazenamento de energia	16
Figura 5 – Classificação das Tecnologias de armazenamento	16
Figura 6 – Módulo de baterias de íons de lítio formado pela associação de células em série	17
Figura 7 – Módulo de supercapacitor XLM	18
Figura 8 – Estrutura e componentes de um volante de armazenamento <i>Flywheel</i>	19
Figura 9 – <i>Battery Energy Storage System</i> (BESS)	21
Figura 10 – Sistema de gerenciamento de bateria	22
Figura 11 – Classificação quanto à localização	23
Figura 12 – Solução <i>Indoor</i> – PbC ou LFP e Solução <i>Outdoor</i> – LFP	25
Figura 13 – Tela inicial da ferramenta web <i>REopt</i>	30
Figura 14 – Vista aérea das usinas solares do campus de Mossoró	35
Figura 15 – Vista aérea da usina fotovoltaica Mossoró 02.....	36
Figura 16 – Consumo na Ponta (kWh) e Fora de Ponta (kWh) Campus Leste.....	38
Figura 17 – Demanda Contratada e Medida.....	38
Figura 18 – Tela inicial de dados na ferramenta web <i>REopt</i>	41
Figura 19 – Tela de instruções login e coleta de dados	42
Figura 20 – Tela de dados escolha do recurso.....	42
Figura 21 – Tela de dados escolha do objetivo do estudo	43
Figura 22 – Tela de dados localização do Site e tarifa de energia.....	43
Figura 23 – Tela de dados perfil de carga	44
Figura 24 – Tela seleção da tecnologia	45
Figura 25 – Tela do resultado da análise financeira	47
Figura 26 – Tela da taxa de escaonamento de custos de O&M.....	50
Figura 27 – Curva de Carga de energia elétrica mês de outubro de 2022.....	54
Figura 28 – Curva de Carga de energia elétrica em dias letivos de outubro de 2022	55

Figura 29 – Curva de Carga de energia elétrica em dias não úteis de outubro de 2022.....	55
Figura 30 – <i>Site and Utility</i>	58
Figura 31 – <i>Load Profile</i>	58
Figura 32 – Financeiro.....	59
Figura 33 – <i>Renewable Energy & Emissions</i>	59
Figura 34 – PV.....	60
Figura 35 – Bateria	61
Figura 36 – Resultado da análise técnica simulado I.....	62
Figura 37 – Resultado da análise técnica simulado II	62
Figura 38 – Resultado do Desempenho do sistema simulado I.....	64
Figura 39 – Resultado do Desempenho do sistema simulado II.....	65
Figura 40 – Resumo dos dados financeiros simulado I.....	67
Figura 41 – Resumo dos dados financeiros simulado II.....	68
Figura 42 – Emissões Climáticas e de Saúde simulado I	70
Figura 43 – Emissões Climáticas e de Saúde simulado II.....	70
Figura 44 – Comparação de Resultados	72

LISTA DE QUADROS

Quadro 01 – Usinas solares fotovoltaicas da UFERSA	35
Quadro 02 – Produção de energia fotovoltaica campus Leste e Oeste	37
Quadro 03 – Dados de consumo de Energia Ativa e Demanda	52

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BESS	<i>Battery Energy Storage System</i>
BMS	<i>Battery Management System</i>
BTM	<i>Behind-The-Meter</i>
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
EMS	<i>Energy Management System</i>
FP	Fora de Ponta
FTM	<i>Front-of-The-Meter</i>
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IL	Índice de Lucratividade
IRENA	<i>International Renewable Energy Agency</i>
kW	Quilowatt
kWh	Quilowatt-hora
kWp	Quilowatt pico
LCOE	<i>Levelized Cost of Energy</i>
NREL	<i>National Renewable Energy Laboratory</i>
PCS	<i>Power Conversion System</i>
O&M	Operação e Manutenção
REopt	<i>Renewable Energy Optimization</i>
RN	Rio Grande do Norte
TIR	Taxa Interna de Retorno
TMA	Taxa Mínima de Atratividade
TUSD	Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição
TE	Tarifa de Energia
USFV	Usina Solar Fotovoltaica
UFERSA	Universidade Federal Rural do Semi-Árido
VPL	Valor Presente Líquido

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	07
1.1 Justificativa	08
1.2 Objetivo geral	09
1.3 Objetivos específicos	09
1.4 Estruturação da Dissertação	10
2 REFERENCIAL TEÓRICO	11
2.1 Energia Solar	11
2.2 Armazenamento de Energia	15
2.3 Sistema de Armazenamento de Energia em Bateria (BESS)	21
2.4 Análise de viabilidade econômica	27
2.5 <i>REopt</i>	29
3 MATERIAIS E MÉTODOS	34
3.1 Descrição do Local de Estudo	34
3.2 Coleta de Dados	37
3.3 Análise dos Dados	39
3.4 Modelagem com a <i>REopt</i>	39
3.4.1 Etapas e configuração inicial da ferramenta web <i>REopt</i>	42
3.5 Análise financeira	46
3.6 Análise de sensibilidade	48
3.7 Análise de risco	49
3.8 Monitoramento e verificação	49
3.9 Custo de Operação e Manutenção	50
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	52
4.1 Perfil de consumo da Unidade Consumidora	53
4.2 Dimensionamento de sistemas de armazenamento de energia	56
4.3 Entradas padrão ferramenta web <i>REopt</i>	58
4.4 Análise técnica	61
4.4.1 Desempenho do sistema primeiro ano	63
4.5 Análise econômica	66
4.6 Análise ambiental	70
5 INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS	72

5.1 Análise <i>REopt</i>	73
5.2 Limitações do estudo	74
5.3 Contribuições do estudo	76
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	77
REFERÊNCIAS.....	78

1 INTRODUÇÃO

A geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis tem sido uma opção cada vez mais viável e relevante para reduzir a dependência de combustíveis fósseis e mitigar os impactos ambientais. Segundo a *International Renewable Energy Agency* (IRENA), a energia solar é uma das fontes renováveis que mais tem crescido nos últimos anos, principalmente devido à redução dos custos dos painéis solares. No entanto, a geração de energia solar é intermitente e depende da disponibilidade de luz solar, o que pode gerar variações na produção de energia ao longo do dia.

Para contornar essa limitação, o armazenamento de energia elétrica surge como uma solução viável. Nesse contexto, o *Battery Energy Storage System* (BESS) tem sido cada vez mais utilizado em sistemas de geração de energia solar, permitindo armazenar a energia gerada durante o dia para ser utilizada posteriormente, quando a geração solar for insuficiente.

De acordo com a *International Energy Agency* (IEA), a tecnologia BESS pode desempenhar um papel fundamental no aumento da penetração da geração de energia renovável na matriz energética global. A IEA estima que o mercado de BESS deve crescer mais de 40 vezes até 2040, impulsionado pela expansão da geração de energia renovável e pela necessidade de sistemas de armazenamento de energia mais flexíveis e eficientes (IEA, 2021).

Para a realização deste estudo, serão utilizadas referências bibliográficas de autores renomados na área de geração de energia solar, sistemas de armazenamento de energia e análise de viabilidade econômica, tais como Vargas *et al.* (2019), Lunthander *et al.* (2015) e Fialho (2018).

A viabilidade técnica e econômica é um aspecto fundamental a ser considerado na tomada de decisão sobre a adoção de tecnologias de armazenamento de energia em usinas de geração de energia solar. Por isso, o presente estudo propõe a utilização da ferramenta *REopt* para realizar uma análise de viabilidade econômica para a implementação de um sistema BESS em usinas de geração de energia solar no campus da Universidade Federal Rural do Semi-Árido em Mossoró, Rio Grande do Norte.

1.1 Justificativa

O Brasil possui um enorme potencial para a geração de energia solar devido à sua localização geográfica privilegiada. O Rio Grande do Norte, em particular, é um dos estados brasileiros com maior potencial solar de acordo com Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), com irradiação solar média anual entre 5 e 6 kWh/m² por dia na região do Semiárido. Já a cidade de Mossoró, localizada na região semiárida do estado, a média anual de irradiação solar é de aproximadamente 5,5 kWh/m² por dia. Nesse contexto, a Universidade Federal Rural do Semi-Árido, localizada em Mossoró, tem buscado implementar fontes renováveis de energia para reduzir seus custos e contribuir com a preservação ambiental.

No entanto, a geração de energia solar é intermitente, o que pode causar variações na produção de energia ao longo do dia e ao longo do ano. Para contornar essa limitação, de acordo com Vargas *et al.* (2019), a solução para essa demanda é a implementação de sistemas de armazenamento de energia, como as baterias de armazenamento de energia em escala de utilidade, conhecidas como sistemas BESS.

Além disso, a utilização da tecnologia BESS poderia contribuir para a redução dos custos de energia elétrica em horário de ponta, que costuma ser mais elevado. Segundo Cavalcante *et al.* (2018), a energia armazenada nas baterias poderia ser utilizada nesses momentos de pico, evitando que a universidade precise recorrer à energia da rede elétrica, que tem um custo mais elevado.

O estudo de viabilidade técnica e econômica do uso de tecnologias de armazenamento de energia é fundamental para subsidiar a tomada de decisão sobre a adoção de sistemas BESS em usinas de geração de energia solar.

Segundo Alotto *et al.* (2014), o armazenamento de energia é uma etapa crucial para a viabilização de sistemas de geração de energia renovável, como a solar e a eólica. Ainda de acordo com os autores, a adoção de tecnologias de armazenamento de energia é fundamental para permitir que a energia gerada durante os períodos de maior produção possa ser utilizada nos períodos de menor produção, garantindo assim um fornecimento constante de energia elétrica.

Além disso, o uso de sistemas de armazenamento de energia também pode contribuir para a estabilização da rede elétrica, reduzindo os picos de demanda de energia e evitando a sobrecarga do sistema. Isso pode trazer benefícios não só para os usuários finais, como as universidades e outros consumidores de energia, mas também para as concessionárias de

energia elétrica, que podem evitar investimentos em infraestrutura para atender a picos de demanda.

Em resumo, o referido trabalho pode demonstrar que a tecnologia BESS pode trazer benefícios significativos para a universidade, contribuindo para a redução dos custos de energia elétrica e a adoção de uma matriz energética mais limpa e sustentável.

1.2 Objetivo geral

O objetivo principal deste estudo é avaliar a viabilidade técnica e econômica do uso da tecnologia BESS em usinas de geração de energia solar fotovoltaica na região semi-árida do estado do Rio Grande do Norte por meio da análise técnica e econômica com a ferramenta *REopt*.

1.3 Objetivos específicos

Para atingir esse objetivo principal, os objetivos específicos são:

- Realizar uma revisão bibliográfica sobre energia solar, armazenamento de energia, tarifação de energia no Brasil, tecnologia BESS, análise de viabilidade econômica e ferramenta *REopt*;
- Elaborar cenários de análise considerando diferentes configurações de usinas de geração de energia solar e sistemas de armazenamento de energia;
- Utilizar o software *REopt* para modelar a performance do sistema BESS e fazer simulações de diferentes cenários de utilização de energia;
- Aplicar a metodologia do *REopt* para avaliar a viabilidade econômica da implementação do BESS nas usinas de geração de energia solar fotovoltaica;
- Analisar os resultados obtidos e discutir as implicações práticas da implementação de BESS em usinas de geração de energia solar no campus da UFERSA em Mossoró - RN.

Com estes objetivos específicos, espera-se alcançar o objetivo principal deste estudo, que é avaliar a viabilidade técnica e econômica do uso da tecnologia BESS em usinas de geração de energia solar na região semiárida do estado do Rio Grande do Norte, contribuindo para a ampliação do conhecimento sobre esta tecnologia e sua aplicação em sistemas de energia renovável.

1.4 Estrutura da Dissertação

Para cumprir os objetivos do estudo em questão, organizou-se seu conteúdo em capítulos, conforme delineado a seguir:

- Capítulo 1 – Introdução: Este capítulo oferece uma visão inicial do tema em questão, delineando as questões de pesquisa, os objetivos do estudo, bem como a delimitação e justificativa da pesquisa.
- Capítulo 2 – Referencial Teórico: Aborda os principais conceitos e teorias que norteiam toda a base de conhecimento usada para a condução desta pesquisa.
- Capítulo 3 – Materiais e Métodos: Este capítulo apresenta a classificação da pesquisa, os materiais e métodos empregados, além de fornecer a caracterização do objeto de estudo.
- Capítulo 4 – Resultados e Discussão: Expõe a análise e discussão dos resultados do uso da ferramenta web *REopt* para dimensionamento e desempenho do sistema de armazenamento de energia elétrica em baterias e do sistema de geração fotovoltaico conectado na rede do Campus Leste da UFERSA, assim como a análise de viabilidade econômica.
- Capítulo 5 – Conclusões: Apresenta as conclusões a respeito dos objetivos e das contribuições do trabalho, além de sugestões para futuras pesquisas. E seguido das referências.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

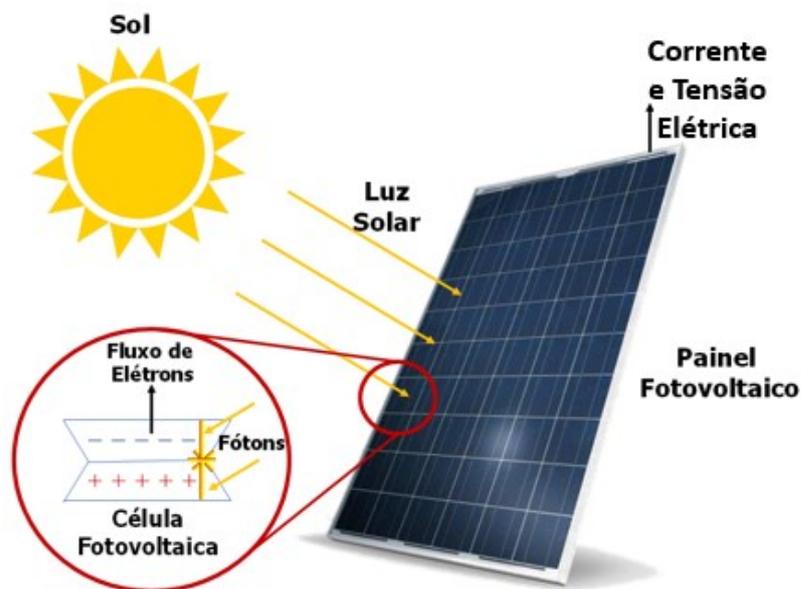
Este capítulo apresenta o referencial teórico sobre energia solar, armazenamento de energia, sistema de armazenamento de energia em bateria, análise de viabilidade econômica e *REopt*. Os conceitos básicos sobre energia solar, vantagens sistemas fotovoltaicos e desafios para implantação de grandes sistemas são apresentados no subtópico 2.1, o armazenamento de energia é abordado em detalhes no subtópico 2.2, o sistema de armazenamento de energia em baterias (BESS) é apresentado no subtópico 2.3, a análise de viabilidade econômica é apresentada no subtópico 2.4 e o software *REopt*, que pode ser usado para avaliar a viabilidade de projetos de energia renovável é discutido no subtópico 2.5.

2.1 Energia solar

A energia solar é uma fonte de energia renovável que se tornou cada vez mais importante para a produção de energia elétrica em todo o mundo. A energia solar é obtida pela conversão da luz solar em eletricidade por meio de células fotovoltaicas, que são feitas de materiais semicondutores como o silício, Silva (2023).

O processo de geração de energia elétrica com painéis solares fotovoltaicos é ilustrado na Figura 1.

Figura 1 – Processo de geração elétrica com painéis fotovoltaicos.



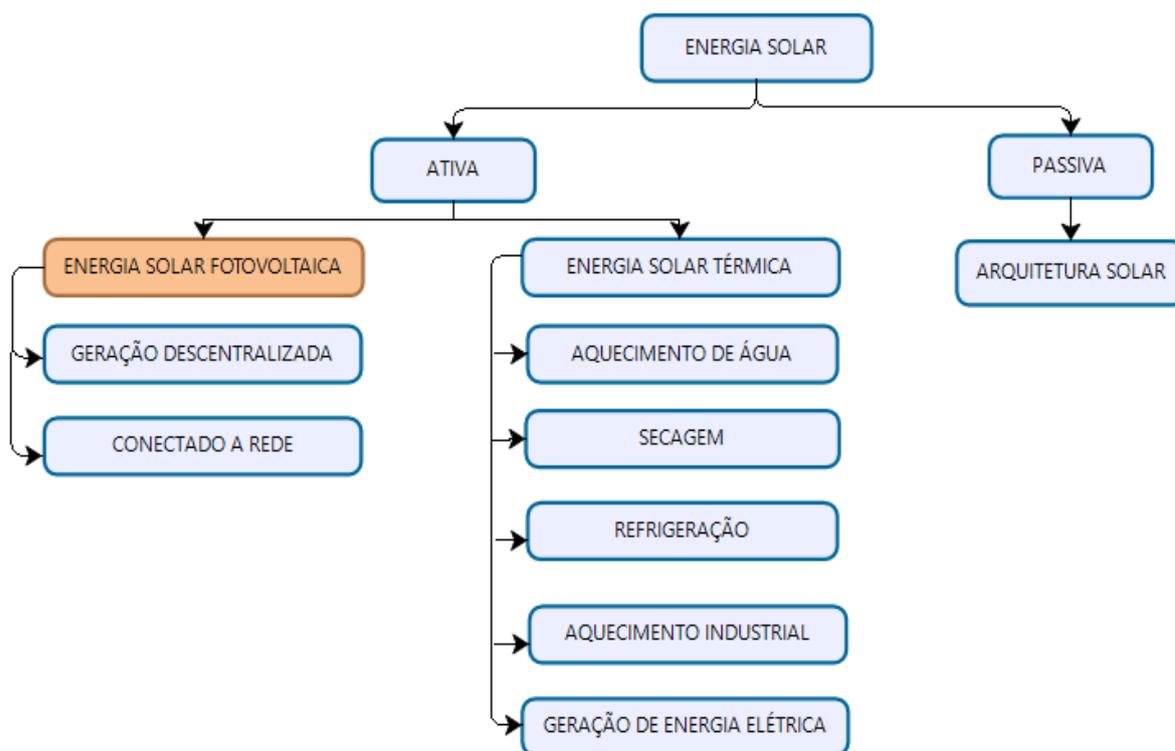
Fonte: Autor (2024).

As células fotovoltaicas têm uma eficiência relativamente baixa, mas são capazes de gerar energia elétrica mesmo em dias nublados. Além disso, a energia solar é uma fonte limpa de energia que não emite gases de efeito estufa ou poluentes atmosféricos, o que a torna uma alternativa atraente para a geração de energia elétrica (SILVA, 2015).

A energia solar pode ser empregada de maneira passiva, sendo esta uma prática predominante na arquitetura bioclimática, a qual visa integrar as construções ao ambiente natural, incluindo clima, vegetação e padrões de consumo, com o objetivo de otimizar a utilização dos recursos energéticos disponíveis. Além disso, é possível empregar a energia solar de forma ativa, utilizando dispositivos especializados que realizam a conversão direta desta fonte de energia em eletricidade ou calor, fazendo uso de coletores planos e concentradores (TOLMASQUIM, 2023).

A Figura 2 apresenta um fluxograma das aplicações práticas na forma passiva e ativa da energia solar.

Figura 2 – Fluxograma aplicações práticas da energia solar.



Fonte: Adaptado de Tolmasquim (2003).

A energia solar é uma fonte de energia renovável que tem atraído a atenção mundial nos últimos anos. De acordo com a IEA, a energia solar é a fonte de energia que mais cresce no mundo, com um aumento de 22% em relação ao ano anterior em 2020 (IEA, 2021). Isso se

deve principalmente à sua capacidade de gerar eletricidade e renovável sem emitir gases de efeito estufa.

A energia solar é gerada através da conversão da luz solar em eletricidade por meio de painéis solares. A tecnologia dos painéis solares tem evoluído rapidamente, com aumento na eficiência e redução nos custos de produção. De acordo com a *International Renewable Energy Agency* (IRENA), o custo da energia solar fotovoltaica caiu mais de 80% desde 2010, tornando-a cada vez mais competitiva em relação a outras fontes de energia (IRENA, 2020).

Além disso, a energia solar tem a vantagem de ser modular e escalável, o que significa que ela pode ser adaptada a diferentes necessidades de consumo de energia, desde pequenos sistemas residenciais até grandes usinas de energia solar. De acordo com a IRENA (2020), a capacidade instalada de energia solar no mundo aumentou em média 20% ao ano nos últimos cinco anos.

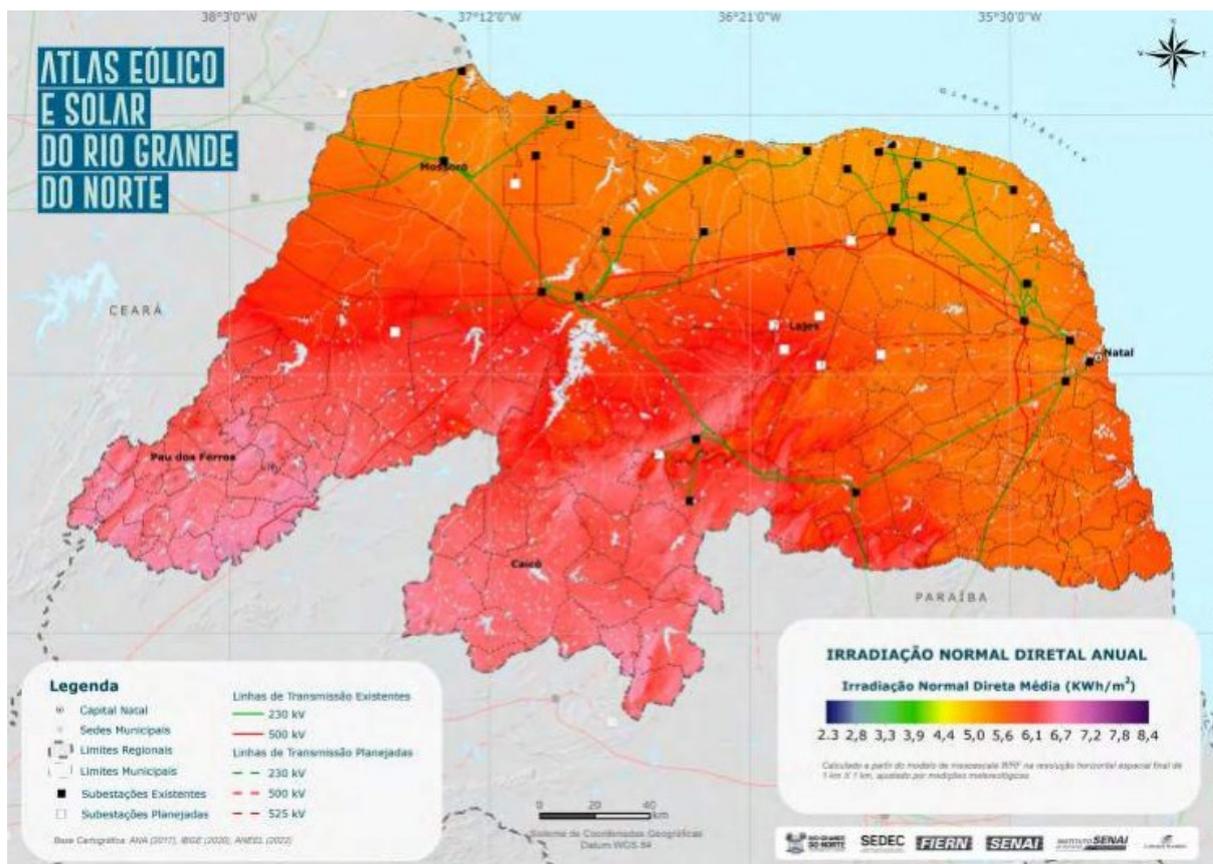
Uma das principais vantagens da energia solar é que ela é uma fonte de energia distribuída, o que significa que a energia é gerada no local em que é consumida. Isso elimina a necessidade de transportar energia elétrica por longas distâncias, reduzindo assim as perdas de energia no transporte e melhorando a eficiência energética do sistema elétrico. Além de poder trazer benefícios econômicos e ambientais para as comunidades locais, reduzindo a dependência de combustíveis fósseis e a emissão de gases de efeito estufa (GOLDEMBERG, 2012).

Além de ser uma fonte de energia renovável, a energia solar também pode trazer benefícios econômicos significativos. A instalação de sistemas de energia solar pode reduzir os custos de energia para os consumidores e gerar empregos na cadeia produtiva da energia solar, desde a fabricação de painéis solares até a instalação e manutenção de sistemas solares. De acordo com o relatório da IEA, a energia solar fotovoltaica foi responsável pela criação de mais de 3 milhões de empregos em todo o mundo em 2019 (IEA, 2021).

Além disso, a energia solar tem um potencial de geração de energia significativo em todo o mundo, especialmente em regiões ensolaradas. De acordo com a IEA, a energia solar pode se tornar a principal fonte de energia elétrica até 2050, respondendo por cerca de um terço da geração total de energia elétrica (IEA, 2020).

Conforme ilustrado pela Figura 3, o Estado do Rio Grande do Norte apresenta um considerável potencial solar, com uma média anual de irradiação que atinge 18 MJ/m² por dia (Atlas eólico e solar do Estado do Rio Grande do Norte, 2022).

Figura 3 – Irradiação Normal Direta Anual do Rio Grande do Norte.



Fonte: Atlas Eólico e Solar do Rio Grande do Norte (2022).

Ainda segundo a IEA, a capacidade instalada de energia solar fotovoltaica cresceu mais de 30 vezes em todo o mundo entre 2010 e 2019, e a previsão é de que continue a crescer nos próximos anos (IEA, 2020).

No entanto, a implantação em grande escala da energia solar apresenta desafios como o alto custo inicial, a dependência de condições climáticas favoráveis e a necessidade de armazenamento de energia para uso em momentos de baixa incidência solar.

Para superar esses desafios, os pesquisadores têm trabalhado no desenvolvimento de novas tecnologias, como células solares de alta eficiência, sistemas de armazenamento de energia e tecnologias de concentração solar, para aumentar a eficiência e a capacidade de armazenamento da energia solar (GREENER, 2019).

Em conclusão, a energia solar é uma fonte de energia limpa e renovável com um grande potencial de geração de energia elétrica. A implantação em grande escala da energia solar apresenta desafios, mas a pesquisa em novas tecnologias pode ajudá-los a superá-los e tornar a energia solar uma parte importante do sistema elétrico do futuro.

2.2 Armazenamento de energia

Uma das principais preocupações em relação à transição para uma matriz energética mais sustentável e renovável é o armazenamento de energia. Segundo Hockaday e Cohn (2018), a instabilidade e a intermitência das fontes renováveis, como a energia solar e eólica, tornam essenciais sistemas de armazenamento de energia para garantir o fornecimento constante e confiável de energia elétrica.

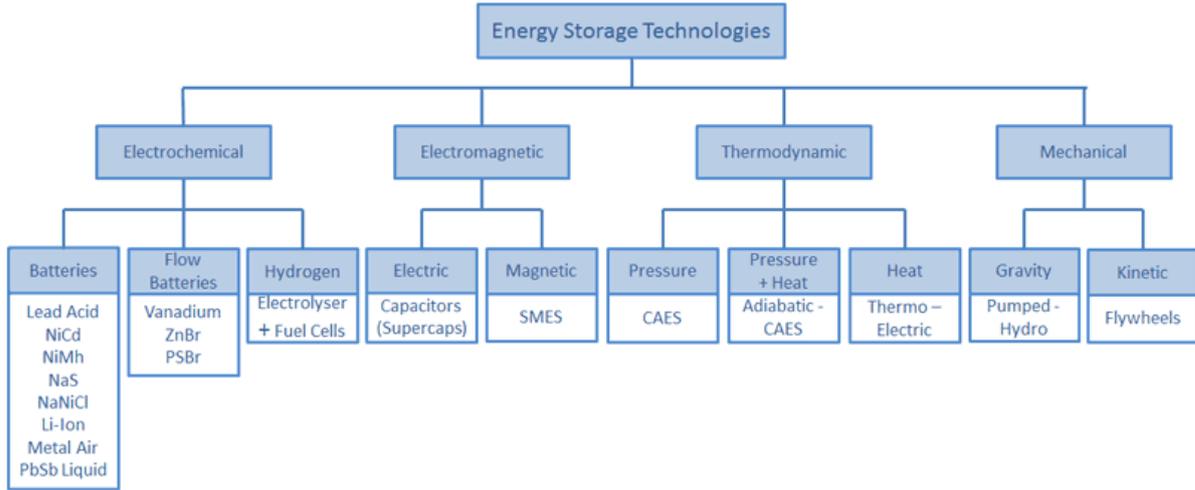
O armazenamento de energia elétrica é uma tecnologia essencial para a integração de fontes renováveis de energia no sistema elétrico, permitindo o gerenciamento da variação da oferta e demanda de energia em diferentes momentos. Neste item, serão apresentados conceitos e tecnologias de armazenamento de energia elétrica em destaque os sistemas de armazenamento de energia elétrica, bem como suas aplicações e desafios.

Segundo a *International Energy Agency* (IEA), o armazenamento de energia elétrica tem um papel importante na integração de fontes de energia renovável na rede elétrica, ajudando a estabilizar a oferta e a demanda de energia em diferentes momentos do dia. Além disso, o armazenamento de energia elétrica também pode melhorar a confiabilidade da rede elétrica e fornecer energia de reserva em caso de falhas na rede.

O armazenamento de energia pode ser realizado em diferentes tipos de dispositivos, como baterias, supercapacitores, *flywheels*, entre outros. As baterias são o tipo mais comum de armazenamento de energia elétrica, sendo utilizadas em veículos elétricos, sistemas de energia solar e eólica, e sistemas de backup de energia. Apresentam vantagens como alta eficiência energética, rápida resposta, longa vida útil e baixa emissão de poluentes, porém também apresentam desafios como alto custo, baixa densidade de energia e degradação com o tempo (OLIVEIRA, 2012)

A Figura 4 mostra uma classificação das tecnologias de armazenamento de energia, divididas em: Eletroquímica, Eletromagnética, Termodinâmica e Mecânica. Podemos destacar as baterias que são um tipo de tecnologia eletroquímica, onde as células eletroquímicas convertem energia química armazenada em energia elétrica, os supercapacitores pertencem ao tipo tecnologia de armazenamento de energia eletromagnética e os *flywheels* pertencem ao tipo de tecnologia de armazenamento de energia mecânica.

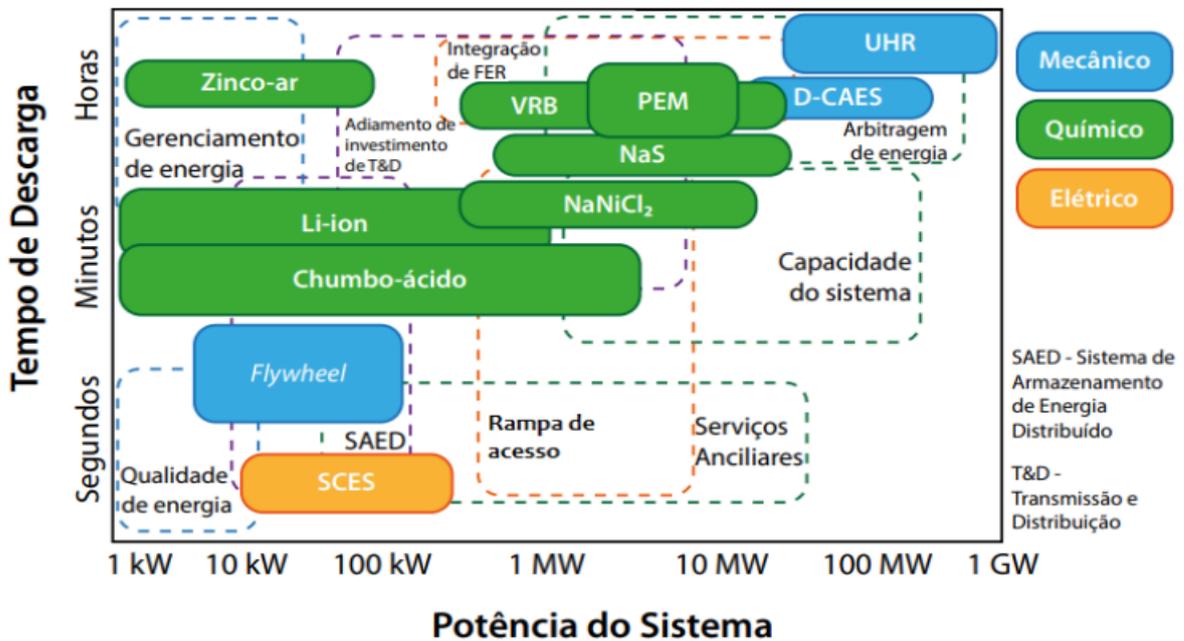
Figura 4 – Tecnologias de armazenamento de energia.



Fonte: BET (2017).

Na Figura 5 é apresentada uma comparação entre as tecnologias de armazenamento, levando em consideração tanto o tempo de descarga quanto a potência do sistema. Podem ser classificadas como: mecânica, química e elétrica.

Figura 5 – Classificação das Tecnologias de armazenamento.



Fonte: Adaptado de Cantane; Hideo; Junior (2020).

Dentre as tecnologias de armazenamento de energia elétrica, destaca-se o sistema de armazenamento de energia em bateria, que tem sido cada vez mais utilizada em sistemas de geração de energia renovável, especialmente a partir da fonte solar fotovoltaica. Segundo Torres-Flores (2011), as baterias de armazenamento de energia têm a vantagem de serem

modulares e facilmente escaláveis, permitindo que as soluções de armazenamento possam ser dimensionadas de acordo com a demanda.

Segundo Safarian *et al.* (2021), as baterias de íons de lítio são as mais utilizadas atualmente, devido à sua alta densidade de energia e capacidade de armazenamento. No entanto, outras tecnologias de baterias como as de sódio, zinco-ar e fluxo redox também estão sendo estudadas como alternativas mais baratas e sustentáveis.

A Figura 6 apresenta um módulo de baterias de íons de lítio do fabricante ENEPAQ onde as células estão ligadas em série. Os módulos de bateria são uma combinação única da mais recente tecnologia de bateria, segurança e facilidade de uso.

Figura 6 – Módulo de baterias de íons de lítio formado pela associação de células em série.



Fonte: Enepaq (2023).

Além das baterias, os supercapacitores também são uma tecnologia de armazenamento de energia elétrica em ascensão. Os supercapacitores apresentam vantagens como alta capacidade de carga e descarga, alta eficiência energética e longa vida útil, porém apresentam desafios como baixa densidade de energia e alto custo (KANG *et al.*, 2020).

O armazenamento de energia elétrica em supercapacitores tem sido objeto de muitas pesquisas nos últimos anos devido às suas vantagens em relação às baterias convencionais, tais como maior eficiência de carga e descarga, maior capacidade de ciclagem, maior vida útil, entre outras. Nesta seção, serão apresentados alguns trabalhos que discutem as características e aplicações dos supercapacitores na armazenagem de energia elétrica.

Um estudo realizado por Zhong *et al.* (2017) analisou a eficiência de um sistema híbrido composto por painéis solares fotovoltaicos, inversor, controlador de carga e supercapacitores. Os resultados indicaram que o uso de supercapacitores no sistema reduziu a perda de energia em relação ao uso de baterias convencionais, além de melhorar a eficiência do sistema de armazenamento de energia.

Em outro estudo, Kim *et al.* (2019) avaliaram a capacidade de um supercapacitor como fonte de energia para veículos elétricos. Os resultados mostraram que o supercapacitor apresentou uma maior capacidade de descarga em comparação com as baterias convencionais utilizadas em veículos elétricos, o que torna o sistema de armazenamento de energia mais eficiente e durável.

Um terceiro estudo realizado por Zhang *et al.* (2018) investigou a utilização de supercapacitores na conversão e armazenamento de energia elétrica. Os resultados indicaram que a utilização de supercapacitores como sistema de armazenamento de energia elétrica foi mais eficiente e confiável do que o uso de baterias convencionais, tornando-se uma opção promissora para aplicações em diferentes dispositivos, desde os elétricos portáteis até *smart grids*.

Uma aplicação de projeto em destaque temos que a maioria dos sistemas de controle de ângulo das pás de turbinas eólicas utiliza supercapacitores devido à sua rápida taxa de carga/descarga e ao custo efetivo. Esses supercapacitores são amplamente empregados em microrredes, operando em conjunto com sistemas de armazenamento, para complementar os serviços oferecidos pela microrrede e prolongar a vida útil das baterias (WANG *et al.*, 2020, XU *et al.*, 2020).

Um módulo de supercapacitores XLM do fabricante EATON é apresentado na Figura 7, este módulo oferece alta densidade de potência simultaneamente para fornecer energia a cargas durante horários de pico e para capturar energia para diversas aplicações.

Figura 7 – Módulo de supercapacitor XLM.



Fonte: EATON (2023).

Portanto, a utilização de supercapacitores para o armazenamento de energia elétrica apresenta vantagens significativas em relação às baterias convencionais, principalmente no que diz respeito à eficiência e durabilidade. Essas características tornam os supercapacitores

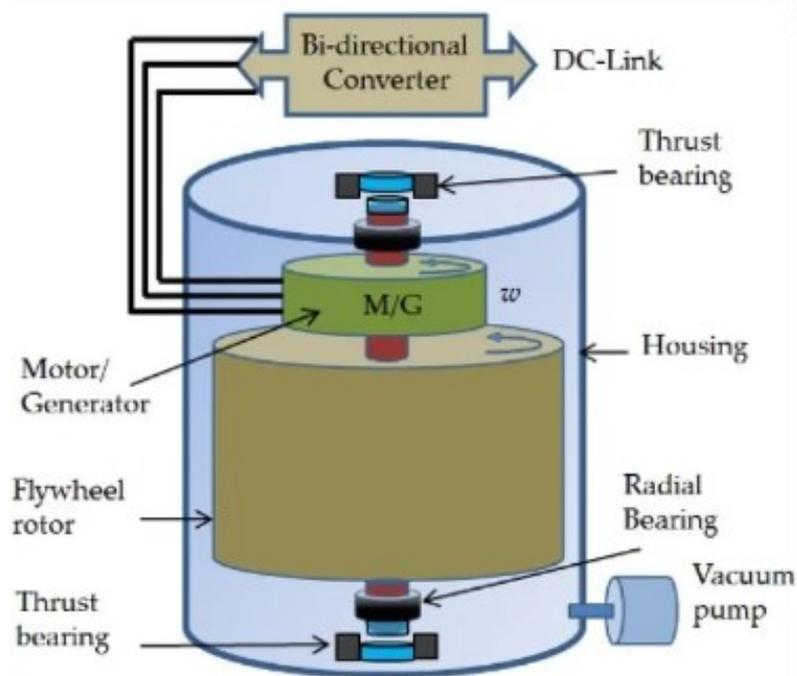
uma opção promissora para diversas aplicações em sistemas de armazenamento de energia, tais como em veículos elétricos, geração de energia por fontes renováveis, entre outras.

Outra tecnologia de armazenamento de energia é o *flywheel*, que consiste em um sistema de armazenamento cinético, onde a energia elétrica é convertida em energia cinética, armazenada em um rotor que gira em alta velocidade e, posteriormente, é convertida novamente em energia elétrica quando necessário (SAHA, 2018).

Segundo Kavala *et al.* (2018), um flywheel é um dispositivo mecânico de armazenamento de energia rotacional, que consiste em um rotor giratório suspenso em um mancal que reduz a fricção e as perdas de energia. A energia é armazenada na forma de energia cinética, quando o rotor é acelerado, e é recuperada quando o rotor é desacelerado.

Um sistema de volante típico de armazenamento de energia elétrica é mostrado na Figura 8. A energia armazenada em um volante é determinada pela forma e material do rotor.

Figura 8 – Estrutura e componentes de um volante de armazenamento *Flywheel*.



Fonte: AMIRYAR; PULLEN (2017).

Os *flywheels* apresentam diversas vantagens em relação às tecnologias convencionais de armazenamento de energia, tais como baterias e supercapacitores. Segundo Ehsani et al. (2018), os *flywheels* possuem uma alta densidade de energia, o que significa que podem armazenar uma grande quantidade de energia em um espaço relativamente pequeno. Além disso, apresentam alto número de ciclos de carga e descarga de energia, pouca manutenção e um alto tempo de vida útil, podendo durar mais de 20 anos com manutenção adequada.

Outra vantagem dos *flywheels* é a sua alta eficiência, que é próxima a 90%, segundo Kühn *et al.* (2018). Isso significa que a energia elétrica pode ser armazenada e recuperada com poucas perdas de energia durante o processo, tornando-os uma opção atraente para aplicações que exigem uma alta eficiência energética, como veículos elétricos e sistemas de geração de energia renovável.

Além disso, os *flywheels* apresentam uma maior flexibilidade operacional em relação às baterias e supercapacitores, que têm uma limitação em relação ao número de ciclos de carga e descarga. Segundo Saha (2018), os *flywheels* não têm essa limitação e podem ser carregados e descarregados milhares de vezes sem perder a eficiência ou capacidade de armazenamento.

No entanto, apesar das vantagens apresentadas, os *flywheels* também possuem algumas desvantagens. Uma delas é a necessidade de um sistema de controle de velocidade muito preciso, para manter o rotor em uma velocidade constante e evitar vibrações e desequilíbrios (EHSANI *et al.*, 2018). Além disso, o custo inicial de um sistema de armazenamento em *flywheel* é relativamente alto, o que pode ser um obstáculo para a sua adoção em larga escala.

Em resumo, o armazenamento de energia em *flywheels* apresenta diversas vantagens em relação às tecnologias convencionais de armazenamento de energia elétrica, como alta eficiência, flexibilidade operacional e tempo de vida útil prolongado. Embora apresente algumas desvantagens, é uma tecnologia promissora para aplicações que exigem alta eficiência e durabilidade, como veículos elétricos e sistemas de geração de energia renovável.

Uma aplicação de projeto em destaque temos que em 2018, no Havaí, foi implantado um sistema da empresa *Amber Kinetics*, com capacidade de 8 kW/32 kWh. Esse sistema tem a capacidade de fornecer energia por até 4 horas e é instalado de forma modular. A empresa também aposta na combinação de múltiplos desses sistemas em paralelo para aumentar tanto a quantidade de energia fornecida quanto a potência nominal (FROESE, 2018). Anteriormente, em 2011, a empresa *Beacon Power* já havia estabelecido uma instalação no estado de Nova Iorque, com uma potência nominal de 40 MW por 15 minutos, composta por unidades de 100 kW/25 kWh (SISKEL, 2011).

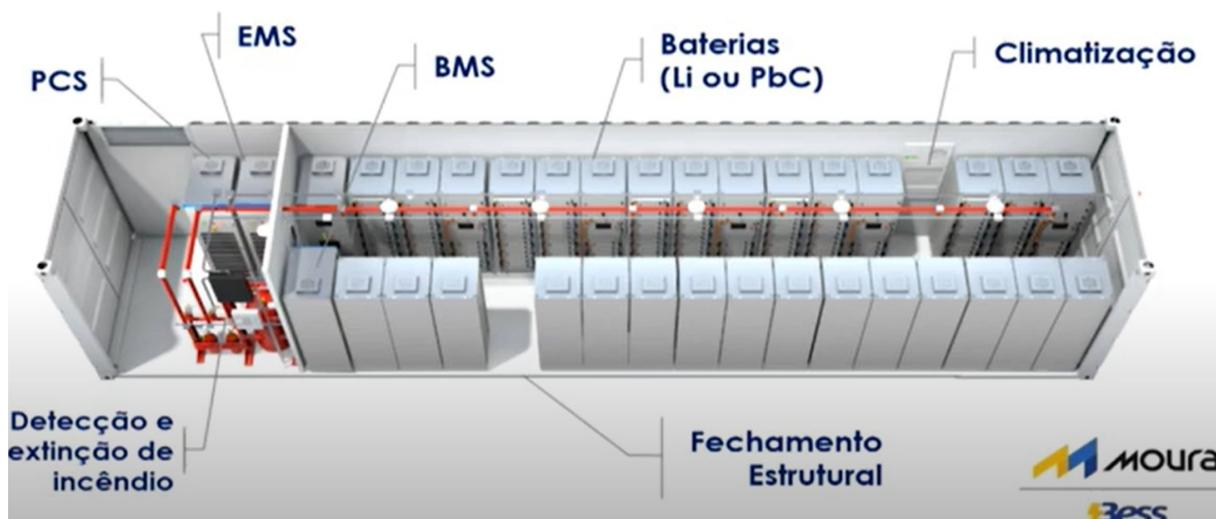
Em resumo, o armazenamento de energia elétrica é uma tecnologia fundamental para a transição energética, permitindo o gerenciamento da oferta e demanda de energia elétrica de forma mais eficiente e sustentável. As baterias, supercapacitores e *flywheels* são algumas das tecnologias de armazenamento de energia elétrica mais utilizadas e estudadas atualmente, cada uma apresentando vantagens e desafios específicos.

2.3 Sistema de Armazenamento de Energia em Bateria (BESS)

Sistemas de Armazenamento de Energia em Bateria (BESS) são uma tecnologia promissora para a integração de fontes renováveis de energia no sistema elétrico, bem como para melhorar a qualidade e confiabilidade da energia elétrica. O BESS é composto por um conjunto de baterias que são capazes de armazenar a energia elétrica gerada durante períodos de baixa demanda e fornecê-la quando a demanda aumenta.

A Figura 9 mostra um sistema de armazenamento de energia elétrica com a tecnologia *Battery Energy Storage System* (BESS) do fabricante MOURA.

Figura 9 – *Battery Energy Storage System* (BESS).

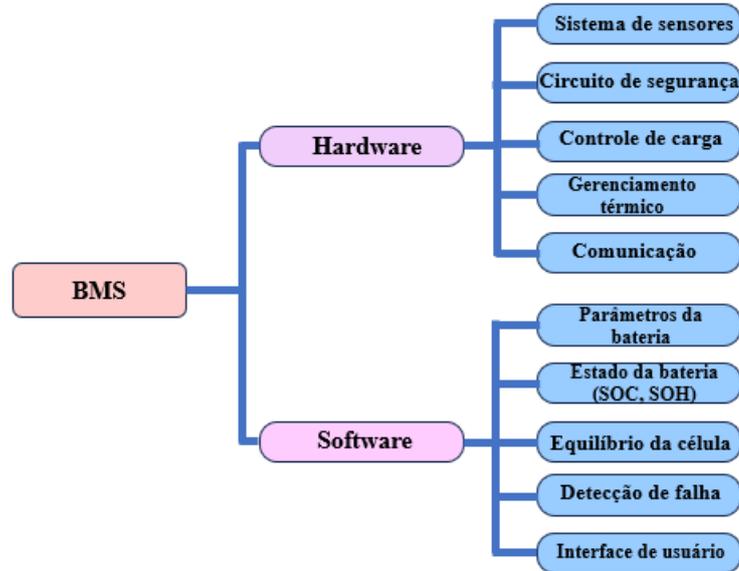


Fonte: MOURA (2022).

Em linhas gerais, um Sistema de Armazenamento de Energia em Bateria (BESS) é composto por diversos elementos, incluindo um conjunto de baterias, um Sistema de Monitoramento de Baterias (BMS, *Battery Management System*), um Sistema de Conversão de Potência (PCS, *Power Conversion System*), um Sistema de Gerenciamento de Energia (EMS, *Energy Management System*), além de componentes auxiliares, como sensores e dispositivos de combate a incêndios.

A Figura 10 ilustra um sistema de gerenciamento de bateria dividido em software e hardware.

Figura 10 – Sistema de gerenciamento de bateria.



Fonte: Xing, Ma, Tsui, & Pecht (2011).

As baterias desempenham um papel fundamental no BESS, armazenando energia química e fornecendo-a como energia elétrica conforme necessário. O BMS é responsável por supervisionar e controlar os parâmetros das baterias durante a operação do sistema de armazenamento. O PCS tem a função de converter energia entre Corrente Alternada (CA) e Corrente Contínua (CC) conforme exigido pelo sistema. O EMS é encarregado de monitorar e gerenciar o desempenho do BESS e seus dispositivos. Por sua vez, os sistemas auxiliares visam manter a operação segura e confiável do sistema de armazenamento de energia.

O sistema de gerenciamento de bateria (BMS), é responsável por supervisionar e gerenciar diversos aspectos, incluindo o nível de carga, a avaliação da condição de saúde da bateria, a temperatura, a corrente elétrica, a tensão elétrica, além de garantir proteção contra curto-circuito, sobrecarga, descargas excessivas e superaquecimento.

Os sistemas BESS são amplamente utilizados em todo mundo fornecendo energia elétrica a milhares de casas, empresas, comunidades e fabricas, bem como em sistemas de armazenamento de energia em larga escala (SOLOVEV, 2021). Eles são especialmente úteis para compensar a intermitência de fontes renováveis de energia, como energia solar e eólica, que podem ser afetadas por variações climáticas. E também são usados para fornecer serviços de resposta à demanda e estabilidade do sistema elétrico, que podem ajudar a evitar interrupções e apagões (ELLABBAN *et al.*, 2014).

As possibilidades de utilização do Sistema de Armazenamento de Energia em Bateria (BESS) variam em relação às aplicações, dependendo de sua instalação em relação ao

medidor de energia elétrica, seja antes (BTM, *Behind-The-Meter*) ou depois (FTM, *Front-of-The-Meter*), conforme ilustrado na Figura 11.

Figura 11 – Classificação quanto à localização.



Fonte: Adaptado de ENERGYSAGE (2019).

As aplicações BTM concentram-se em questões de gestão, confiabilidade e qualidade da energia elétrica no ponto de consumo final. Por outro lado, as aplicações FTM são orientadas para atividades relacionadas à geração, transmissão e distribuição de energia, visando adiar investimentos, evitar sobrecargas nas linhas e fornecer serviços auxiliares, como regulação de frequência e reativação do sistema após uma falha de energia (*black start*), entre outros (IRENA, 2020).

Os sistemas de armazenamento em frente do medidor em larga escala desempenham um papel crucial no setor de geração de energia, oferecendo uma variedade de serviços essenciais, facilitam o despacho de grandes usinas de energia renovável, como solares e eólicas, esses sistemas também desempenham um papel fundamental ao absorver picos de geração e redistribuí-los para períodos de alta demanda, contribuindo assim para uma gestão mais eficiente e estável da rede elétrica.

Além disso, em áreas remotas ou em sistemas isolados da rede elétrica principal, os sistemas de armazenamento, quando combinados com sistemas fotovoltaicos, são capazes de substituir os tradicionais geradores a diesel, porém os sistemas fotovoltaicos ocupam uma área considerável devido à necessidade de painéis solares para captar a energia solar. Em comparação com geradores a diesel, os sistemas fotovoltaicos requerem mais espaço para a instalação dos painéis, mas apresentam vantagens em termos de sustentabilidade e redução de emissões. Além de promover a independência energética e a sustentabilidade nessas comunidades (SOLAR, 2021).

Nos sistemas de transmissão e distribuição de energia, os sistemas de armazenamento em frente do medidor oferecem uma série de benefícios adicionais, proporcionam uma maior eficiência às redes, evitando a necessidade de construir novas linhas de transmissão ou

subestações para lidar com picos temporários de consumo ou geração, os operadores podem implantar unidades de armazenamento em pontos estratégicos da rede. Isso não só ajuda a otimizar o fluxo de energia, mas também contribui para uma gestão mais inteligente e flexível da rede elétrica.

Além de desempenhar um papel fundamental na melhoria da qualidade do fornecimento de energia elétrica, eles têm a capacidade de absorver flutuações de tensão ou frequência, ajudando assim a reduzir a incidência de quedas de energia. Esses serviços auxiliares não só melhoram a confiabilidade do sistema, mas também garantem uma distribuição mais estável e consistente de energia para os consumidores (GREENER, 2021).

Para os consumidores individuais, os sistemas de armazenamento atrás do medidor oferecem uma gama significativa de vantagens, ajudam a gerenciar o consumo de energia e a demanda contratada, esses sistemas também desempenham um papel fundamental como fonte de energia de backup. Isso significa que, em caso de interrupções na rede elétrica principal, os consumidores podem contar com energia armazenada para manter suas atividades funcionando sem interrupções.

Além de potencializar os benefícios da geração distribuída. Ao armazenar o excesso de energia gerada por painéis solares ou outras fontes renováveis, os consumidores podem aproveitar ao máximo a energia produzida em momentos de baixa demanda ou ausência de luz solar.

Esses sistemas também podem oferecer serviços auxiliares remunerados à rede elétrica. Por exemplo, ao participar de programas de resposta à demanda ou fornecer energia de reserva durante períodos de pico, os consumidores podem obter benefícios financeiros adicionais enquanto ajudam a estabilizar a rede elétrica.

Essas vantagens combinadas transformam os consumidores em "prossumidores", permitindo-lhes não apenas consumir energia, mas também produzi-la, armazená-la e fornecê-la de volta à rede conforme necessário, proporcionando assim um importante aumento na autonomia energética, na resiliência do sistema e na sua complexidade.

A Figura 12 mostra soluções indoor para sistema de armazenamento de energia elétrica com a tecnologia *Battery Energy Storage System* (BESS) do fabricante MOURA. Opções de solução indoor com sistema de baterias LFP para 0,5 MWh, 1,5 MWh e 3 MWh; e baterias PbC para 0,5 MWh e 1,0 MWh. E opção de solução outdoor sistema com baterias LFP para 372 kWh.

Figura 12 – Solução *Indoor* – PbC ou LFP e Solução *Outdoor* – LFP.



Fonte: MOURA (2022).

Um estudo realizado por Aziz *et al.* (2018) investigou os avanços recentes na tecnologia de baterias de íons de lítio para aplicações em sistemas de armazenamento de energia. O estudo mostrou que as baterias de íons de lítio são a escolha preferida para aplicações BESS devido à sua alta densidade de energia, longa vida útil e baixa manutenção.

Outro estudo realizado por Khare *et al.* (2019) avaliou o desempenho de um sistema BESS de íons de lítio em uma usina de energia solar em larga escala. Os resultados mostraram que o sistema BESS foi capaz de suavizar as flutuações de energia gerada pelos painéis solares, melhorando a estabilidade da rede elétrica e reduzindo a necessidade de backup de energia.

Um terceiro estudo realizado por Shen *et al.* (2020) analisou a viabilidade de um sistema BESS para fornecer energia de reserva para hospitais em caso de falha de energia. Os resultados mostraram que um sistema BESS pode fornecer energia confiável e rápida para manter os equipamentos críticos do hospital funcionando, garantindo a segurança e o bem-estar dos pacientes.

Além disso, a BESS também pode ser utilizada para auxiliar na estabilização da rede elétrica, atuando como uma fonte de energia de reserva em momentos de pico de demanda ou queda na geração de energia (BAUMANN *et al.*, 2015). Dessa forma, a BESS pode contribuir para a segurança e confiabilidade do sistema elétrico como um todo.

No entanto, a eficiência da BESS ainda é um fator limitante para a sua ampla adoção em larga escala. Segundo Li *et al.* (2017), a eficiência da BESS varia entre 75% e 90%,

dependendo das características específicas da bateria utilizada e do sistema de controle empregado. Ainda assim, a eficiência da BESS tem aumentado ao longo dos anos com o desenvolvimento de novas tecnologias de bateria e sistemas de controle mais avançados (ZHANG *et al.*, 2018).

Outra questão importante relacionada à BESS é a sua vida útil. A deterioração gradual das baterias ao longo do tempo pode reduzir a capacidade de armazenamento de energia e aumentar os custos de manutenção e substituição (SATHIAMOORTHY *et al.*, 2016). No entanto, pesquisas estão sendo realizadas para desenvolver novas tecnologias que possam prolongar a vida útil das baterias e reduzir esses custos (WANG *et al.*, 2019).

No entanto, o custo dos sistemas BESS ainda é alto e é um obstáculo para a sua adoção em larga escala. Além disso, a vida útil das baterias pode ser limitada, e a segurança do armazenamento de energia é uma preocupação importante para a sua implantação.

Para superar esses desafios, os pesquisadores estão trabalhando no desenvolvimento de novas tecnologias de baterias e sistemas BESS que são mais eficientes e têm maior vida útil, bem como sistemas de gerenciamento de bateria avançados, que permitem um uso mais eficiente e seguro da energia armazenada (JAIN *et al.*, 2016).

Uma aplicação de projeto temos a utilização de baterias ZEBRA em algumas pequenas centrais elétricas, como é o caso da FIAMM Green Energy Island, que possui uma capacidade de armazenamento de energia elétrica de 230 kWh. Essa central elétrica tem um pico de potência de 181 kW e gera aproximadamente 200 MWh/ano através de painéis fotovoltaicos (SANTERNO S.P.A, 2011). Um exemplo adicional ocorreu em 2016 nas ilhas gregas de Tilos, onde foram instalados 2,4 MWh em baterias dessa tecnologia para fornecer suporte a um sistema híbrido de geração, composto por 800 kW de turbinas eólicas e 160 kW de um parque fotovoltaico de pequena escala (IEA, 2022).

Em conclusão, a BESS é uma tecnologia promissora para a integração de fontes renováveis de energia no sistema elétrico e para melhorar a qualidade e confiabilidade da energia elétrica. Embora ainda haja desafios a serem superados, os avanços na tecnologia de baterias e gerenciamento de baterias estão tornando os sistemas BESS mais eficientes e seguros.

2.4 Análise de viabilidade econômica

A análise de viabilidade econômica é uma ferramenta importante para a tomada de decisão em investimentos. Segundo Brealey, Myers e Allen (2011), essa análise envolve a estimativa dos fluxos de caixa futuros de um projeto, a escolha de uma taxa de desconto e a avaliação do Valor Presente Líquido (VPL) e da Taxa Interna de Retorno (TIR) do projeto. O VPL é calculado subtraindo-se o valor presente dos fluxos de caixa dos investimentos iniciais, enquanto a TIR é a taxa de desconto que iguala o valor presente dos fluxos de caixa futuros ao investimento inicial.

Segundo Puccini (2011), o Valor Presente Líquido (VPL) é a soma algébrica do valor atual de todos os fluxos de caixa, considerando as taxas de juros apropriadas e pode ser calculado conforme equação (1).

$$VPL = I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+i)^t} \quad (1)$$

Em que: I_0 é o investimento inicial (R\$); FC_t é o fluxo de caixa no período t (R\$); i é a Taxa Mínima de Atratividade (TMA) esperada pelo investidor (% ao período); e n é o período estimado para o projeto.

A Taxa Interna de Retorno (TIR) expressa a lucratividade gerada por um investimento específico, sendo definida como a taxa de juros compostos que torna o Valor Presente Líquido (VPL) igual a zero (PUCCINI, 2011), conforme a equação (2).

$$0 = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+TIR)^t} \quad (2)$$

Em que: I_0 é o investimento inicial (R\$); FC_t é o fluxo de caixa no período t (R\$); TIR é a taxa interna de retorno; e n é o período estimado para o projeto. Em uma análise de viabilidade de investimento, quando a TIR for maior que a TMA, é possível considerar o projeto economicamente viável.

A análise de sensibilidade é uma técnica utilizada para avaliar a robustez da análise de viabilidade econômica frente a variações em premissas críticas do projeto. De acordo com Souza *et al.* (2018), a análise de sensibilidade pode ser realizada de diversas maneiras, como variando a taxa de desconto, os custos fixos e variáveis, a demanda e o preço de venda. Essa técnica permite identificar quais premissas têm maior impacto no resultado final da análise e, portanto, devem ser mais cuidadosamente analisadas.

Ainda segundo Souza *et al.* (2018), a análise de viabilidade econômica é importante para avaliar a sustentabilidade financeira de um projeto. Essa análise permite identificar se um projeto é capaz de gerar receitas suficientes para cobrir seus custos e proporcionar um retorno adequado aos investidores. Além disso, a análise de viabilidade econômica também permite comparar projetos entre si e escolher aqueles que apresentam maior rentabilidade.

Assim, a análise de viabilidade econômica é uma ferramenta importante para avaliar se um projeto é financeiramente viável e sustentável a longo prazo. No entanto, para uma avaliação mais completa da viabilidade do projeto, é necessário considerar também aspectos não financeiros, como os impactos sociais e ambientais que o projeto pode causar. Além disso, para uma análise mais precisa e realista dos fluxos de caixa futuros, é importante considerar o contexto macroeconômico e regulatório em que o projeto será desenvolvido.

Dessa forma, a análise de viabilidade econômica se torna mais abrangente e pode contribuir para uma tomada de decisão mais informada e consciente. Entre os fatores a serem considerados na análise de viabilidade econômica estão os custos de investimento, custos operacionais, receitas geradas pelo projeto e fluxo de caixa ao longo do tempo.

Segundo Bastos (2019), a análise de viabilidade econômica deve ser realizada com base em uma metodologia sistemática e rigorosa, que inclua a avaliação de riscos e incertezas e a consideração de fatores como o valor do dinheiro no tempo e a taxa de retorno exigida pelos investidores. A autora destaca ainda que a análise de sensibilidade é uma técnica importante para avaliar o impacto de variações nos parâmetros do projeto sobre a viabilidade econômica.

Outro autor que destaca a importância da análise de viabilidade econômica é Fialho (2018), que enfatiza a necessidade de avaliar não apenas os custos e benefícios financeiros, mas também os impactos sociais e ambientais do projeto. Segundo ele, uma análise abrangente e criteriosa pode ajudar a identificar potenciais riscos e oportunidades de melhoria, bem como a garantir que o projeto seja economicamente viável e sustentável a longo prazo.

Para realizar a análise de viabilidade econômica, é comum utilizar diversas técnicas, como a análise de fluxo de caixa descontado, a análise de custo-benefício e a análise de Valor Presente Líquido (VPL). Segundo Bodie, Kane e Marcus (2014), a técnica de VPL é uma das mais amplamente utilizadas, pois permite avaliar se o fluxo de caixa gerado pelo projeto é suficiente para cobrir os custos de investimento e gerar retornos positivos para os investidores.

Além disso, a utilização de indicadores financeiros como o payback, a Taxa Interna de Retorno (TIR) e o Índice de Lucratividade (IL) também pode ser útil na análise de viabilidade econômica. Segundo Ross, Westerfield e Jaffe (2015), a TIR é um indicador especialmente importante, pois reflete a taxa de retorno esperada pelo projeto e pode ser comparada com a taxa de retorno exigida pelos investidores para avaliar a viabilidade financeira do projeto.

Em resumo, a análise de viabilidade econômica é uma ferramenta essencial para avaliar a viabilidade e a sustentabilidade financeira de projetos. É importante considerar diversos fatores, como custos de investimento, custos operacionais, receitas geradas pelo projeto e fluxo de caixa ao longo do tempo, e utilizar técnicas como a análise de fluxo de caixa descontado, a análise de valor presente líquido e indicadores financeiros como a TIR e o IL.

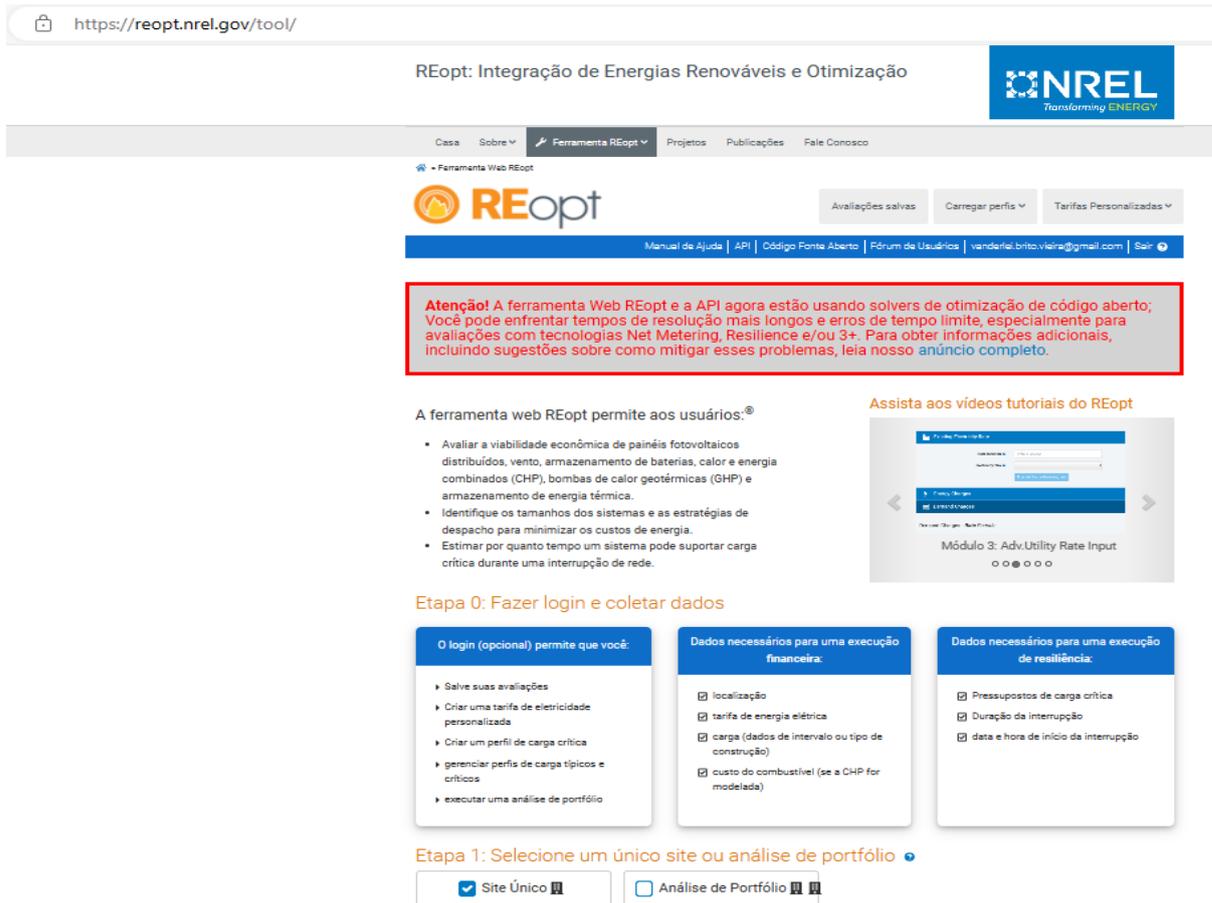
2.5 REopt

REopt é uma ferramenta de otimização desenvolvida pelo NREL (*National Renewable Energy Laboratory*) dos Estados Unidos. Sua principal função é determinar o tamanho ideal e a combinação de tecnologias de energia renovável e armazenamento de energia para atender às necessidades energéticas de um determinado local. O objetivo é maximizar a eficiência energética e minimizar os custos operacionais ao longo do tempo (NREL, 2022).

A ferramenta web *REopt*, é uma plataforma poderosa que permite aos usuários otimizar o design e o dimensionamento de sistemas de energia renovável e armazenamento de energia para uma variedade de aplicações, incluindo edifícios comerciais, instalações industriais, instalações militares, e muito mais. Esta ferramenta foi projetada para ajudar os usuários a identificar as melhores combinações de tecnologias de energia para atender às suas necessidades específicas, considerando fatores como custo, disponibilidade de recursos naturais, metas de sustentabilidade e confiabilidade do sistema.

A tela inicial da ferramenta web de análise de projetos de energia limpa, *REopt*, é apresentada na Figura 13.

Figura 13 – Tela inicial da ferramenta web *REopt*.



Fonte: NREL (2024).

Uma das principais funcionalidades da *REopt* é a capacidade de realizar análises de viabilidade econômica. Os usuários podem inserir dados sobre os custos de instalação e operação dos sistemas de energia renovável e armazenamento, bem como informações sobre as taxas de energia e incentivos financeiros disponíveis. Com base nesses dados, a *REopt* pode realizar análises detalhadas para determinar a viabilidade financeira de diferentes cenários de energia.

Além disso, a ferramenta também permite que os usuários realizem análises de desempenho energético. Eles podem inserir dados sobre o consumo de energia do edifício ou sistema e a *REopt* calculará a quantidade de energia que pode ser fornecida pelas fontes renováveis selecionadas, bem como a quantidade de energia que pode ser armazenada e utilizada quando necessário.

Outra funcionalidade importante da *REopt* é a capacidade de otimizar os sistemas de energia renovável e armazenamento. Com base nos dados inseridos pelos usuários, a ferramenta web pode determinar a melhor combinação de fontes de energia renovável e

sistemas de armazenamento para maximizar a produção de energia, minimizar os custos operacionais e atender às necessidades energéticas específicas.

A ferramenta oferece algumas funcionalidades adicionais que são essenciais para ajudar os usuários a tomar decisões informadas e a implementar soluções de energia renovável de forma eficaz.

Aqui estão algumas das capacidades e recursos que a ferramenta oferece aos usuários:

1. **Análise de custo-benefício:** permite aos usuários realizar análises detalhadas de custo-benefício para diferentes configurações de sistemas de energia, levando em consideração os custos iniciais de instalação, os custos operacionais e de manutenção, os incentivos fiscais e financeiros disponíveis, e os benefícios associados, como economias de energia e reduções nas emissões de gases de efeito estufa.
2. **Modelagem flexível:** os usuários podem modelar uma ampla gama de tecnologias de energia renovável e armazenamento de energia, incluindo painéis solares fotovoltaicos, turbinas eólicas, sistemas de armazenamento de bateria, sistemas de armazenamento térmico e muito mais. A ferramenta permite ajustar diversos parâmetros, como a capacidade do sistema, a eficiência, o perfil de carga e as condições climáticas locais.
3. **Otimização:** a ferramenta web *REopt* utiliza algoritmos avançados de otimização para identificar as configurações de sistema mais eficientes e econômicas para atender às necessidades de energia dos usuários. Isso inclui dimensionar adequadamente os componentes do sistema, como o tamanho dos painéis solares e das baterias, para maximizar o retorno do investimento e minimizar os custos operacionais ao longo do tempo.
4. **Análise de sensibilidade:** os usuários podem realizar análises de sensibilidade para entender como diferentes variáveis, como mudanças nos preços da energia, taxas de juros ou políticas de incentivo, podem afetar a viabilidade econômica de suas soluções de energia renovável e armazenamento de energia.
5. **Avaliação de resiliência:** permite aos usuários avaliar a resiliência de seus sistemas de energia em face de eventos imprevistos, como interrupções na rede elétrica ou desastres naturais. Isso inclui a capacidade de dimensionar sistemas de armazenamento de energia para fornecer energia de backup durante cortes de energia e manter operações críticas.

6. **Relatórios e visualizações:** a ferramenta gera relatórios detalhados e visualizações gráficas que fornecem insights valiosos sobre o desempenho e a viabilidade econômica das soluções de energia propostas. Isso inclui análises de retorno do investimento, custos de ciclo de vida, fluxos de caixa projetados e muito mais.
7. **Integração com dados geoespaciais:** pode integrar dados geoespaciais, como mapas de radiação solar, velocidades do vento e padrões de uso de energia, para fornecer uma análise mais precisa e personalizada do potencial de energia renovável em uma determinada localização. Isso permite aos usuários tomar decisões mais bem informadas sobre o dimensionamento e a localização de seus sistemas de energia.
8. **Considerações de sustentabilidade:** permite aos usuários incorporar considerações de sustentabilidade em suas análises, como metas de redução de emissões de carbono e pegada de carbono associada às diferentes configurações de sistemas de energia. Isso ajuda as organizações a alinhar suas estratégias energéticas com objetivos ambientais e de responsabilidade social corporativa.
9. **Suporte a decisões de investimento:** com base nas análises de custo-benefício e nos relatórios gerados pela *REopt*, os usuários podem tomar decisões informadas sobre investimentos em tecnologias de energia renovável e armazenamento de energia. Isso inclui a avaliação de opções de financiamento, como contratos de compra de energia, arrendamentos e financiamento tradicional, para maximizar o retorno do investimento e minimizar os riscos financeiros.
10. **Planejamento de microrredes:** a *REopt* é especialmente útil para o planejamento e dimensionamento de microrredes, que são sistemas de energia autônomos ou conectados à rede elétrica principal, geralmente compostos por uma combinação de fontes de energia renovável, armazenamento de energia e geradores de backup. A ferramenta ajuda a otimizar o dimensionamento de cada componente da microrrede para maximizar a eficiência operacional e a resiliência do sistema.
11. **Atualizações e suporte contínuos:** o NREL continua aprimorando e atualizando a ferramenta *REopt* com base em feedback de usuários e avanços tecnológicos, garantindo que ela permaneça relevante e eficaz para as necessidades em evolução do setor de energia renovável e sustentabilidade.

Em resumo, a *REopt* é uma ferramenta poderosa e versátil que oferece aos usuários uma maneira poderosa e abrangente de projetar, otimizar e avaliar sistemas de energia

renovável e armazenamento de energia para uma ampla gama de aplicações, ajudando a acelerar a transição para um futuro energético mais sustentável e resiliente.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A análise de viabilidade técnica e econômica é fundamental para avaliar a possibilidade de implementação de um projeto, e isso não é diferente no caso do uso da tecnologia BESS em usinas de geração de energia solar no campus da UFERSA em Mossoró-RN. A ferramenta web *REopt* é amplamente utilizada para análises de viabilidade econômica em projetos de energia renovável, como exemplo, o Departamento de Imigração e Alfandega dos EUA (ICE) usaram a ferramenta web *REopt* para verificar a viabilidade econômica e as especificações de projeto da energia fotovoltaica planejada (PV) e sistemas de armazenamento de baterias em uma unidade da ICE em Vieques, Porto Rico (NREL, 2017). Esta será a ferramenta utilizada para a análise deste projeto.

A metodologia deste estudo envolve uma descrição do local de estudo, a coleta de dados relevantes, a análise dos dados e a modelagem do projeto utilizando a *REopt*. A seguir, são descritas cada uma dessas etapas em detalhes.

3.1 Descrição do local de estudo

O local de estudo deste trabalho é o campus Leste da UFERSA, localizado na cidade de Mossoró, Rio Grande do Norte. Com uma área total de aproximadamente de 104 hectares, a região é conhecida por sua alta incidência de luz solar, o que a torna propícia para a instalação de sistemas de energia solar fotovoltaica.

A Figura 14 apresenta uma vista aérea das usinas solares fotovoltaicas da UFERSA em Mossoró-RN.

Figura 14 – Vista aérea das usinas solares do campus de Mossoró.



Fonte: UFERSA (2017).

O sistema de geração de energia solar do campus é composto por painéis fotovoltaicos instalados em 16 usinas geradoras, com estimativa de produção anual de 2.117.584 kWh, com uma capacidade instalada de 1.280,59 kWp e uma economia anual de, aproximadamente, R\$ 914.372,00. A energia gerada é utilizada para abastecer as demandas do próprio campus e o excedente é injetado na rede elétrica local.

O Quadro 01 mostra a relação das usinas solares fotovoltaicas e suas principais características, como: potência (kWp), tipo, local e data de instalação.

Quadro 01– Usinas solares fotovoltaicas da UFERSA.

USINA	POTÊNCIA (kWp)	TIPO	LOCAL	DATA DE INSTALAÇÃO
Mossoró – Campus Leste	973,69			
Mossoró 01	3,43	Solo	CITED	02/2012
Mossoró 02	150,80	Solo	Campus Leste	11/2016
Mossoró 03	15,60	Telhado	Lab. Eng. I	03/2018
Mossoró 04	147,00	Telhado	CE I	03/2019
Mossoró 05	92,83	Telhado	Expocenter	08/2020
Mossoró 06	92,83	Telhado	Expocenter	08/2020
Mossoró 07	95,18	Telhado	CE II	08/2020
Mossoró 08	95,18	Telhado	CCEN	09/2020

Mossoró 09	95,18	Telhado	PROPPG	09/2020
Mossoró 10	92,83	Telhado	Rosadão	08/2020
Mossoró 11	92,83	Telhado	Garagem	09/2020
Mossoró – Campus Oeste	306,90			
Mossoró 12	69,66	Telhado	CCA II	09/2020
Mossoró 13	38,25	Telhado	CCBS Bioc. II	07/2021
Mossoró 14	38,25	Telhado	C. Aulas II	09/2021
Mossoró 15	80,37	Telhado	CCSAH II	06/2022
Mossoró 16	80,37	Telhado	HOVET GA	06/2022
TOTAL	1.280,59			

Fonte: UFERSA (2022).

A Figura 15 apresenta uma vista aérea da usina solar fotovoltaica Mossoró 02, com uma potência instalada de 150,8 kWp, 580 painéis fotovoltaicos, área de 933 m², geração de 18.000 kWh/mês de energia elétrica, representa um consumo de 5% do Campus.

Figura 15 – Vista aérea da usina fotovoltaica Mossoró 02.



Fonte: UFERSA (2017).

O Quadro 02 apresenta a estimativa de geração de energia e de economia correspondente, por usina geradora e por Campus.

Quadro 02 – Produção de energia fotovoltaica campus Leste e Oeste.

CAMPUS	POTÊNCIA (kWp)	PRODUÇÃO ANUAL		ECONOMIA ANUAL (R\$)
		(kWh)	% DO CONSUMO DO CAMPUS	
MOSSORÓ – CAMPUS LESTE	973,69	1.610.094	46,9%	758.354
Mossoró 01	3,43	5.672	0,2%	2.671
Mossoró 02	150,80	249.363	7,3%	117.450
Mossoró 03	15,60	25.796	0,8%	12.150
Mossoró 04	147,00	243.079	7,1%	114.490
Mossoró 05	92,83	153.504	4,5%	72.300
Mossoró 06	92,83	153.504	4,5%	72.300
Mossoró 07	95,18	157.390	4,6%	74.131
Mossoró 08	95,18	157.390	4,6%	74.131
Mossoró 09	95,18	157.390	4,6%	74.131
Mossoró 10	92,83	153.504	4,5%	72.300
Mossoró 11	92,83	153.504	4,5%	72.300
MOSSORÓ – CAMPUS OESTE	306,90	507.490	38,1%	239.028
Mossoró 12	69,66	115.190	8,6%	54.254
Mossoró 13	38,25	63.250	4,7%	29.791
Mossoró 14	38,25	63.250	4,7%	29.791
Mossoró 15	80,37	132.900	10,0%	62.596
Mossoró 16	80,37	132.900	10,0%	62.596

Fonte: UFERSA (2022).

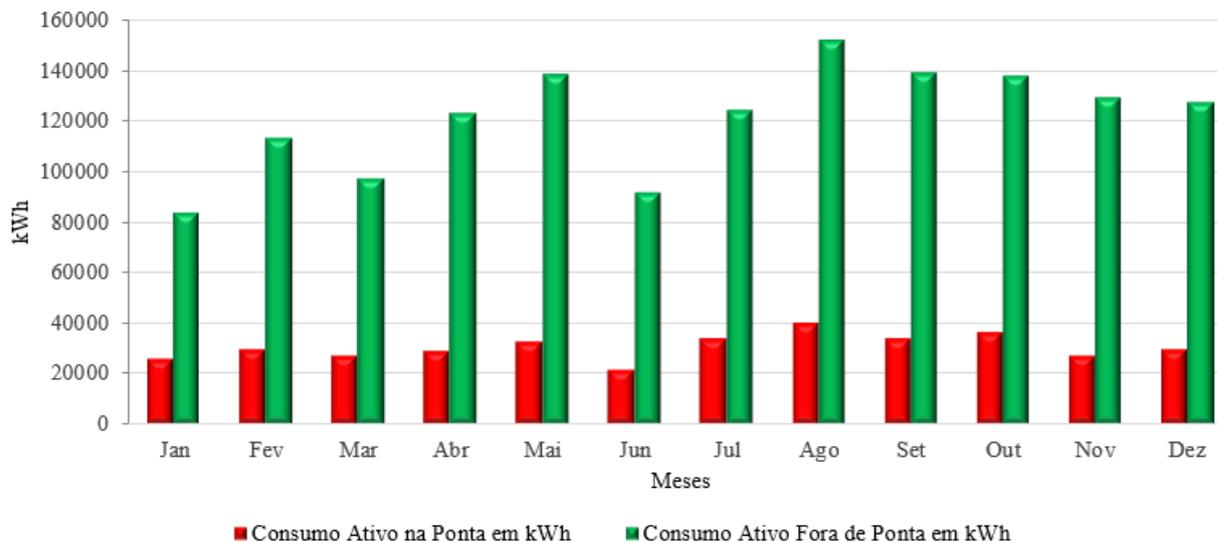
3.2 Coleta de dados

Para a realização deste estudo, foram coletados dados de radiação solar, temperatura, velocidade do vento e umidade relativa do ar na região do campus da UFERSA, no período de janeiro a dezembro de 2023. Os dados foram obtidos a partir de medições realizadas por sensores meteorológicos instalados no local.

Também foram coletados dados sobre a demanda de energia elétrica do campus, com informações sobre o consumo de energia elétrica em cada unidade consumidora, como prédios e laboratórios, o custo da energia elétrica fornecida pela concessionária local, a disponibilidade de radiação solar e a capacidade de armazenamento da tecnologia BESS.

A Figura 16 mostra o consumo de energia elétrica no horário de Ponta e Fora de Ponta do campus Leste da UFERSA referente ao período de janeiro a dezembro do ano de 2023 registrados em faturas de energia elétrica.

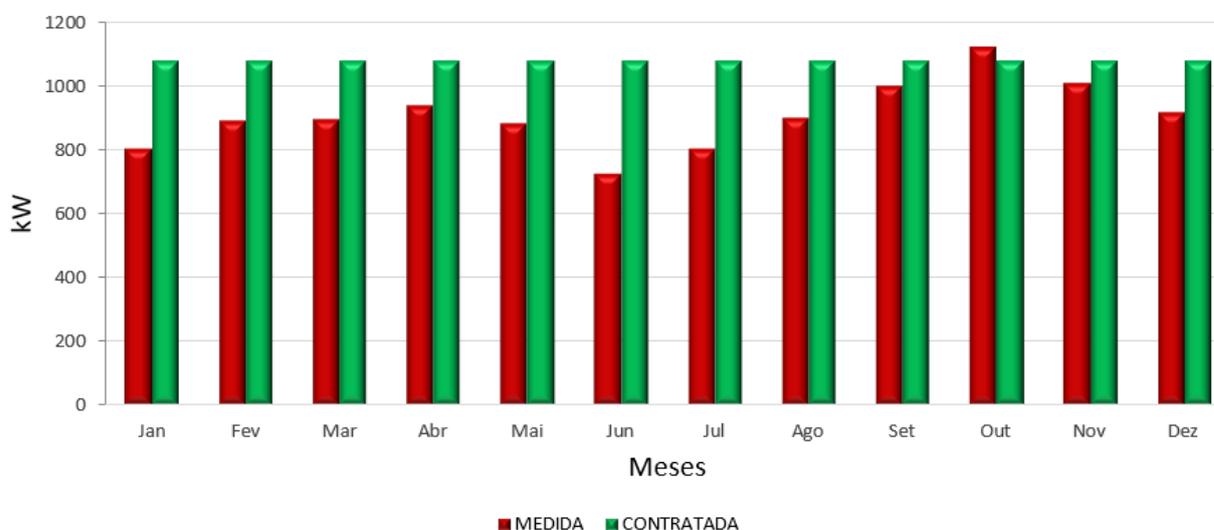
Figura 16 – Consumo na Ponta (kWh) e Fora de Ponta (kWh) Campus Leste.



Fonte: Autor (2024).

A Figura 17 apresenta o gráfico do consumo da demanda contratada e a demanda medida referente ao consumo de energia elétrica do campus Leste da UFERSA no período de janeiro a dezembro do ano de 2023 registrados em faturas de energia elétrica.

Figura 17 – Demanda Contratada e Medida.



Fonte: Autor (2024).

A coleta de dados sobre o consumo de energia do campus foi realizada por meio de registros de consumo da concessionária local de energia elétrica por meio de medidores de consumo instalados em cada edifício do campus Leste da UFERSA referente ao período de

janeiro a dezembro de 2023. Além disso, dados sobre a disponibilidade de radiação solar podem ser obtidos por meio de estações meteorológicas instaladas no local ou por meio de dados históricos de radiação solar na região.

3.3 Análise dos dados

Os dados coletados foram inseridos na ferramenta web *REopt* e analisados utilizando uma variedade de técnicas estatísticas para análise de dados, como médias, medianas, desvios padrão, regressão linear e análise de variância. Será utilizado a ferramenta web *REopt* para realizar as análises.

Com base nos dados de localização do projeto, radiação solar e demanda e consumo de energia elétrica, será possível determinar a capacidade necessária de armazenamento de energia para o sistema de energia solar do campus. Essa capacidade é calculada levando em consideração a necessidade de atender à demanda de energia em momentos de baixa geração solar, como à noite no horário de Ponta ou em dias nublados.

Além disso, é possível avaliar os custos do sistema, incluindo os custos de investimento e os custos operacionais, bem como as receitas geradas pela venda de energia excedente para a concessionária local de energia elétrica.

A ferramenta pode realizar uma análise de viabilidade financeira para determinar a atratividade econômica do sistema de energia renovável. Isso pode incluir métricas como *Payback*, Taxa Interna de Retorno (TIR) e Valor Presente Líquido (VPL).

3.4 Modelagem com a ferramenta *REopt*

A modelagem do sistema de armazenamento de energia da bateria (BESS) em conjunto com o sistema de geração de energia solar será realizada utilizando a ferramenta web *REopt*, que é uma plataforma para pesquisa gratuita utilizada para otimização e tomada de decisões em sistemas de energia e microrredes, permitindo o gerenciamento otimizado dos recursos energéticos em casos de falha no fornecimento de energia elétrica.

A plataforma permite que o usuário avalie o potencial de energia renovável em um local específico, como a quantidade de energia solar disponível, e modele sistemas de geração de energia renovável e tecnologias de armazenamento de energia. Ele também pode ser usado para avaliar o desempenho de sistemas existentes e projetados, fornecendo uma avaliação

precisa da economia de custos, das reduções de emissões de gases de efeito estufa e dos benefícios ambientais.

Essa ferramenta permite a realização de análises de viabilidade técnica e econômica ambiental para projetos de energia renovável e eficiência energética, incluindo a avaliação de diversos indicadores financeiros, como o *Payback*, Custos totais do ciclo de vida, Custos de O&M, a Taxa Interna de Retorno (TIR) e o Valor Presente Líquido (VPL).

Para modelar o sistema de geração do projeto, serão inseridas as informações referentes à localização geográfica, seleção de tecnologias, área disponível para instalação de painéis solares, demanda de energia, metas de sustentabilidade, entre outros. Já para definir os parâmetros do sistema deve-se especificar os parâmetros de cada componente do sistema, como capacidade, eficiência, custos de instalação e operação, vida útil, entre outros. Estes podem ser valores padrão ou personalizados de acordo com as especificidades do projeto.

Para utilizar a ferramenta *REopt*, é necessário coletar dados sobre as usinas de geração de energia solar existente no campus, bem como informações sobre a tecnologia BESS e os custos associados à sua implantação e operação. Esses dados podem incluir, por exemplo:

- Dados de produção de energia das usinas solar ao longo de um período (por exemplo, um ano);
- Dados de consumo de energia elétrica do campus ao longo do mesmo período;
- Dados técnicos sobre a tecnologia BESS (por exemplo, capacidade de armazenamento, eficiência, vida útil);
- Custo de aquisição, instalação e operação da tecnologia BESS;
- Custos de manutenção e substituição de componentes ao longo do tempo;
- Taxa de juros e tempo de vida útil da análise (neste exemplo, assumimos 20 anos).

Após a inserção de todas as informações, a ferramenta *REopt* realizará uma simulação do desempenho do sistema ao longo de um período de 20 anos, considerando dados históricos de irradiação solar e temperatura média para a região de Mossoró.

A tela para preenchimento de dados iniciais na ferramenta web *REopt* dos projetos a serem analisados, é apresentada na Figura 18.

Figura 18 – Tela inicial de dados na ferramenta web REopt.

The image shows the REopt web tool interface. It is divided into four main steps:

- Step 1: Select Single Site or Portfolio Analysis**
 - Single Site
 - Portfolio Analysis
- Step 2: Choose Your Energy Goals**
 - Cost Savings
 - Resilience
 - Clean Energy
- Step 3: Select Your Technologies**
 - PV
 - Battery
 - Grid
 - Wind
 - CHP
 - Prime Generator
 - Chilled Water Storage
 - Geothermal Heat Pump
- Step 4: Enter Your Site Data**
 - Site and Utility (required)**
 - Site location**: Input field with "Enter a location" placeholder and a "Use sample site" link.
 - Electricity rate**: Dropdown menu with "Use custom electricity rate" checkbox and "Optional inputs" link.
 - "Reset to default values" link.
 - Load Profiles (required)**: Expandable section with a plus icon.
 - Financial**: Expandable section with a plus icon.
 - Renewable Energy & Emissions**: Expandable section with a plus icon.
 - PV**: Expandable section with a plus icon.
 - Battery**: Expandable section with a plus icon.

Fonte: Autor (2024).

Serão inseridos na ferramenta web os dados coletados sobre o consumo de energia elétrica referente ao ano de 2023, custo anual de energia e demanda, custo de capital do sistema fotovoltaico \$/kW-DC e o custo da capacidade de energia da bateria \$/kWh. A partir desses dados, a ferramenta realiza a simulação do desempenho do sistema de armazenamento de energia e o cálculo dos indicadores de viabilidade econômica, como o Valor Presente Líquido (VPL), a Taxa Interna de Retorno (TIR) e o *Payback*. Além de realizar uma análise de sensibilidade para avaliar o impacto de variações nos parâmetros do projeto sobre a viabilidade econômica.

Os resultados obtidos com a modelagem serão utilizados para avaliar a viabilidade econômica do uso de um sistema de armazenamento de energia em conjunto com o sistema de geração de energia solar do campus Leste da UFERSA.

3.4.1 Etapas e configuração inicial da ferramenta web *REopt*

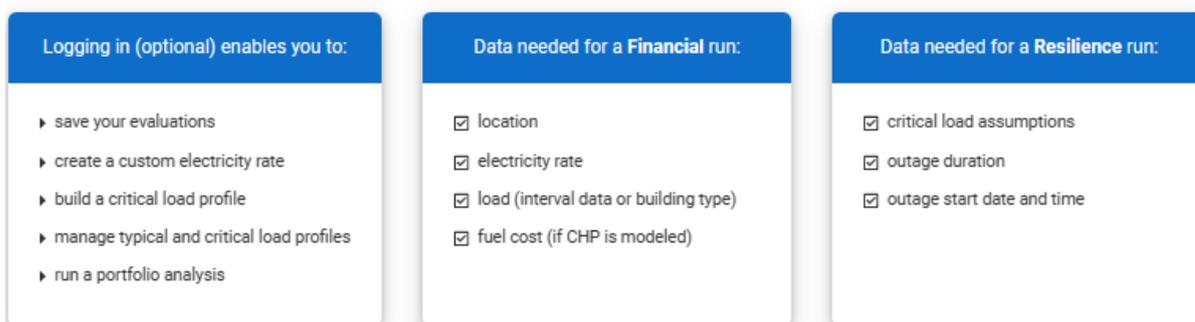
Para utilizar a ferramenta web *REopt* de forma eficaz, os usuários devem seguir uma série de etapas que abrangem desde a configuração inicial até a análise dos resultados. A seguir temos uma descrição detalhada sobre cada etapa do processo:

1. Configuração Inicial:

- **Acesso à Ferramenta:** Acesse o site oficial da *REopt* fornecido pelo Laboratório Nacional de Energia Renovável (NREL).
- **Cadastro/Login:** Crie uma conta de usuário ou faça login na plataforma. Antes de começar a usar a ferramenta, a *REopt* oferece instruções para fazer login e coleta dados, Figura 19.

Figura 19 – Tela de instruções login e coleta de dados.

Step 0: Login and Gather Data



Fonte: Autor (2024).

- **Escolha um único site ou análise de portfólio:** a escolha do recurso de análise de portfólio permite que os usuários examinem várias instalações de uma só vez ou que seja analisado um único site. Os usuários devem estar conectados para acessar os recursos de análise de portfólio. A Figura 20 mostra a tela para escolha do recurso.

Figura 20 – Tela de dados escolha do recurso.

Step 1: Select Single Site or Portfolio Analysis ?



Fonte: Autor (2024).

- **Escolha um dos objetivos do estudo:** Uma análise financeira identificará o sistema que minimiza o seu custo de energia. Uma análise de resiliência também identificará um sistema que minimize o custo de energia, mas com a

restrição adicional de que o sistema deve ser capaz de sustentar a carga crítica do seu local durante uma interrupção. A Figura 21 apresenta a tela de dados para escolha do objetivo do estudo.

Figura 21 – Tela de dados escolha do objetivo do estudo.

Step 2: Choose Your Energy Goals



The interface shows three toggle buttons for selecting energy goals:

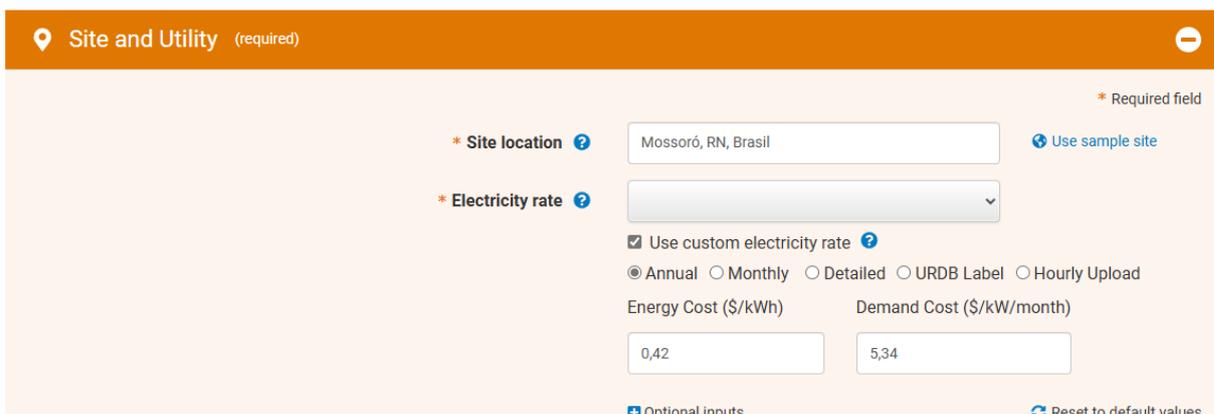
- Cost Savings \$
- Resilience
- Clean Energy

Fonte: Autor (2024).

- **Seleção da Localização e Tarifa de eletricidade:** Especifique a localização geográfica onde o sistema de energia será instalado, pode-se inserir um endereço específico ou uma cidade e estado, mas em ambos os casos a escolha deve ser selecionada no menu suspenso. O usuário pode optar por modelar uma tarifa de serviços públicos personalizada marcando a caixa ao lado de “Usar tarifa de eletricidade personalizada” e alternando entre Anual, Mensal ou Detalhado, com base no nível de detalhe com o qual deseja modelar a tarifa do seu site. Para a tarifa anual personalizada, você pode inserir uma tarifa de energia por quilowatt-hora (kWh) que será aplicada a todas as compras de eletricidade ao longo do ano. A tarifa de demanda por kW será aplicada à demanda de pico mensal de cada mês do ano. A Figura 22 apresentada a tela para preenchimento dos dados referente a localização do site e informações referentes a tarifa de energia.

Figura 22 – Tela de dados localização do Site e tarifa de energia.

Step 4: Enter Your Site Data



The interface shows the following fields and options:

- Site location:** Mossoró, RN, Brasil (with a "Use sample site" link).
- Electricity rate:** (dropdown menu).
- Use custom electricity rate
- Radio buttons for: Annual, Monthly, Detailed, URDB Label, Hourly Upload
- Energy Cost (\$/kWh):** 0,42
- Demand Cost (\$/kW/month):** 5,34
- Optional inputs (plus icon)
- Reset to default values (refresh icon)

Fonte: Autor (2024).

- **Configuração do Projeto:** Forneça informações básicas sobre o projeto, como tipo de edifício, área disponível para instalação de painéis solares, demanda de

energia, metas de sustentabilidade, entre outros. Ao selecionar a opção Perfil Simulado, você selecionará um tipo de construção entre 17 opções baseadas nos Edifícios de Referência Comercial do Departamento de Energia dos EUA (DOE), além de uma opção de carga plana para a situação incomum em que a carga elétrica é constante em todas as horas do dia. O consumo anual de energia padrão que preenche automaticamente esse campo de entrada quando você escolhe um edifício é um consumo médio para um edifício do tipo que você está simulando na zona climática do seu local. O consumo estimado muda dependendo do tipo de edifício e da parte do país que você inseriu, e é baseado em tamanhos de edifícios típicos e zonas climáticas listadas no pop-up “Detalhes do edifício”. Você obterá uma aproximação mais precisa se substituir o consumo padrão pelo consumo anual real do seu edifício. Nesse caso, o perfil simulado será dimensionado para corresponder ao consumo do seu edifício. A Figura 23 mostra a tela para seleção do perfil de carga a ser analisado no projeto e local para carregamento do arquivo do perfil de carga referente aos meses de setembro, outubro e novembro 2022 no formato .csv.

Figura 23 – Tela de dados perfil de carga.

* Typical electrical load ?

How would you like to enter the typical energy load profile?

Simulate Building Simulate Campus Upload

* Custom load profile Perfil de Carga nov 2022 (2022)

Sample custom load profile

Upload typical load profile

Upload and manage your typical load profiles

Chart uploaded load data

Fonte: Autor (2024).

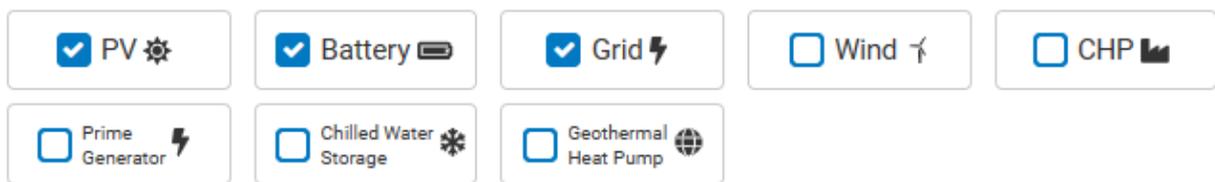
2. Definição dos Parâmetros do Sistema:

- **Seleção de Tecnologias:** Escolha as tecnologias de energia renovável e armazenamento que serão consideradas na análise. Isso pode incluir painéis solares fotovoltaicos, turbinas eólicas, sistemas de armazenamento de bateria, entre outros. Em cada seção de tecnologia o usuário pode ajustar as suposições específicas da tecnologia. Por exemplo, se o usuário expandir a seção PV, verá premissas de custos e incentivos. Existe também a opção de incluir um sistema fotovoltaico já existente na otimização. Se desejar modelar um novo sistema

fotovoltaico com um tamanho específico, insira-o como tamanho mínimo e máximo. Se não houver espaço suficiente disponível ou se houver um limite de interconexão que não acomode o tamanho mínimo do sistema especificado, você receberá uma mensagem informando que o sistema é inviável. A Figura 24 mostra a tela para seleção da tecnologia.

Figura 24 – Tela seleção da tecnologia.

Step 3: Select Your Technologies



Fonte: Autor (2024).

- **Configuração dos Parâmetros:** Especifique os parâmetros de cada componente do sistema, como capacidade, eficiência, custos de instalação e operação, vida útil, entre outros. Estes podem ser valores padrão ou personalizados de acordo com as especificidades do projeto.

3. Análise e Otimização:

- **Execução da Análise:** Inicie o processo de análise, onde a ferramenta *REopt* utilizará algoritmos de otimização para encontrar a configuração de sistema mais eficiente e econômica com base nos parâmetros fornecidos.
- **Avaliação de Cenários:** Explore diferentes cenários e configurações de sistema para entender como variáveis como tamanho do sistema, mix de tecnologias e políticas de incentivo podem afetar os resultados.
- **Refinamento dos Resultados:** Faça ajustes nos parâmetros do sistema, se necessário, com base nos resultados preliminares da análise para refinar a solução proposta.

4. Análise de Resultados:

- **Interpretação dos Relatórios:** Analise os relatórios e visualizações gerados pela *REopt*, que podem incluir informações sobre custo-benefício, retorno do investimento, economia de energia, pegada de carbono, entre outros.
- **Avaliação da Viabilidade:** Avalie a viabilidade econômica, técnica e ambiental da solução proposta com base nos resultados da análise.

5. Tomada de Decisão e Implementação:

- **Tomada de Decisão:** Com base na análise dos resultados, tome decisões informadas sobre a implementação do sistema de energia renovável e armazenamento.
- **Planejamento de Implementação:** Elabore um plano de implementação detalhado, incluindo cronograma, orçamento, recursos necessários e etapas de execução.
- **Implementação do Sistema:** Prossiga com a implementação do sistema de acordo com o plano elaborado, garantindo que todas as etapas sejam executadas de forma eficiente e segura.

6. Monitoramento e Manutenção:

- **Monitoramento do Desempenho:** Estabeleça um sistema de monitoramento para acompanhar o desempenho do sistema de energia ao longo do tempo, incluindo a produção de energia, o consumo, a eficiência e a resiliência.
- **Manutenção Regular:** Realize manutenção preventiva e corretiva conforme necessário para garantir o funcionamento adequado e a longevidade do sistema.

Ao seguir essas etapas de forma diligente e sistemática, os usuários podem aproveitar ao máximo a ferramenta web *REopt* para projetar, otimizar e implementar sistemas de energia renovável e armazenamento de energia de forma eficaz, ajudando a alcançar metas de sustentabilidade e resiliência energética.

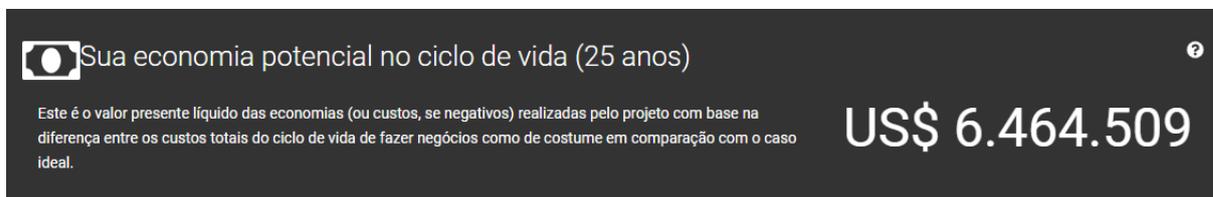
3.5 Análise financeira

Com as informações sobre a produção de energia da usina solar e o desempenho do sistema BESS modelados, é possível realizar uma análise financeira para avaliar a viabilidade econômica da implantação do sistema BESS. Isso envolve a estimativa dos custos e benefícios do sistema BESS ao longo do período de análise (por exemplo, 20 anos).

A *REopt* pode ser utilizado para realizar essa análise, fornecendo informações sobre o custo de aquisição e instalação do sistema BESS, o custo de operação e manutenção, a economia gerada pela utilização do BESS em termos de redução da demanda de energia da rede elétrica, a economia gerada pela utilização de energia armazenada durante horários de pico, e outros fatores relevantes. Serão utilizados dois cenários para simulação com a ferramenta.

A Figura 25 mostra a tela do resultado da economia potencial no ciclo de vida (25 anos), o apresentado corresponde ao valor presente líquido das economias realizadas pelo projeto com base na diferença entre os custos totais do ciclo de vida de fazer negócios como de costume em comparação com o caso ideal.

Figura 25 – Tela do resultado da análise financeira.



Fonte: Autor (2024).

Para analisar a viabilidade econômica do uso da tecnologia BESS em usinas de geração de energia solar no campus Leste da UFERSA em Mossoró-RN, é necessária uma análise detalhada de custo-benefício.

A análise custo-benefício deve incluir os seguintes fatores:

- **Custos de capital:** O custo de instalação da tecnologia BESS nas usinas de geração de energia solar no campus deve ser calculado, incluindo o custo de baterias, inversores e outros equipamentos necessários.
- **Custos operacionais:** O custo de operação da tecnologia BESS, incluindo manutenção, substituição de baterias e outros custos, deve ser calculado.
- **Benefícios:** Os benefícios do uso da tecnologia BESS, como maior confiabilidade e estabilidade da fonte de alimentação, devem ser avaliados.
- **Retorno do investimento:** O retorno do investimento pela utilização da tecnologia BESS deve ser calculado com base nos custos de capital e de funcionamento e nos benefícios da tecnologia.
- **Impacto ambiental:** O impacto ambiental da utilização da tecnologia BESS também deve ser avaliado, incluindo qualquer redução das emissões de gases com efeito de estufa.
- **Incentivos governamentais:** Quaisquer incentivos ou subsídios governamentais disponíveis para o uso da tecnologia BESS em usinas de geração de energia solar devem ser considerados.

Com base nos resultados da análise de custo-benefício, pode-se determinar se o uso da tecnologia BESS em usinas de geração de energia solar no campus Leste da UFERSA em

Mossoró-RN é economicamente viável. Se os benefícios superam os custos, então pode ser um investimento que vale a pena para a universidade perseguir.

3.6 Análise de sensibilidade

Após a realização da análise financeira, é recomendável realizar uma análise de sensibilidade para avaliar o impacto de variações nos dados de entrada (por exemplo, variações nos custos de aquisição e operação do BESS, variações nos preços da energia elétrica) sobre os resultados da análise.

A ferramenta *REopt* pode ser utilizado para realizar essa análise, fornecendo informações sobre a sensibilidade dos resultados a variações nos parâmetros de entrada.

Ao discutir a importância da análise de sensibilidade em modelagem e otimização, Gürdal e Özdemir (2017) afirmam que "a análise de sensibilidade é uma ferramenta útil para identificar quais entradas têm o maior impacto nas saídas do modelo e, portanto, devem ser priorizadas em termos de precisão e disponibilidade de dados". Nesse sentido, a *REopt* permite aos usuários identificar os fatores mais influentes em suas decisões de investimento em energia renovável e priorizar a alocação de recursos para coletar dados mais precisos e relevantes.

Além disso, a análise de sensibilidade desempenha um papel crucial na avaliação e mitigação de riscos em projetos de energia renovável. Como observado por Gibbons e Li (2018) em "*Robust Design Optimization of Building Energy Systems Under Uncertainty*", "a análise de sensibilidade é uma ferramenta valiosa para entender a sensibilidade do desempenho do sistema a incertezas nos parâmetros do modelo". A *REopt*, ao permitir a análise de sensibilidade em relação a fatores como variações nos preços da energia ou nas condições climáticas, capacita os usuários a identificar estratégias de mitigação de riscos e desenvolver sistemas energéticos mais robustos e resilientes.

Em resumo, a análise de sensibilidade desempenha um papel fundamental na tomada de decisões em projetos de energia renovável, e a ferramenta web *REopt* oferece uma abordagem abrangente e baseada em dados para avaliar a influência de diferentes variáveis nas decisões de investimento e no desempenho de sistemas energéticos. Ao fornecer insights sobre a sensibilidade do modelo a diferentes parâmetros e incertezas, a *REopt* capacita os usuários a tomar decisões mais informadas e eficazes em um ambiente de energia em constante evolução.

3.7 Análise de risco

Além da análise de sensibilidade, é importante realizar uma análise de risco para avaliar a incerteza dos resultados da análise financeira. Isso envolve a identificação dos riscos associados à implantação e operação do sistema BESS, bem como a avaliação do impacto desses riscos sobre os resultados da análise financeira.

Ao abordar a importância da análise de risco em projetos de energia renovável, Michael Milligan e Brendan Kirby destacam em seu artigo "*Evaluating the Impacts of Renewable Portfolio Standards*" a necessidade de considerar a variabilidade e a intermitência das fontes renováveis de energia ao avaliar os riscos associados à sua integração na rede elétrica. A *REopt*, ao incorporar dados climáticos e de produção de energia, permite uma análise abrangente dos riscos relacionados à dependência de recursos renováveis.

Além disso, a incerteza em relação às políticas energéticas e regulatórias pode representar um risco significativo para investimentos em energia renovável. Como ressaltado por John Byrne et al. em "*Energy Security and Climate Change Mitigation: The Path to Renewable Energy in Small Island Developing States*", a estabilidade das políticas governamentais é essencial para atrair investimentos em energia limpa. Nesse sentido, a capacidade da *REopt* de avaliar o impacto de mudanças nas políticas energéticas em cenários futuros permite aos usuários mitigar os riscos associados a essas incertezas.

Dessa forma, a *REopt* pode ajudar a identificar estratégias de mitigação de riscos, como a diversificação de fontes de energia e a integração de sistemas de armazenamento de energia, que podem reduzir a vulnerabilidade a flutuações nos preços da energia e interrupções no fornecimento.

Em suma, a análise de risco desempenha um papel crucial na tomada de decisões em projetos de energia renovável, e a ferramenta web *REopt* oferece uma abordagem abrangente e baseada em dados para avaliar e mitigar esses riscos. Ao integrar dados climáticos, de mercado e tecnológicos, a *REopt* capacita os usuários a tomar decisões informadas e sustentáveis em um ambiente de energia em constante evolução.

3.8 Monitoramento e avaliação

Após a implantação do sistema BESS, é importante realizar um monitoramento e avaliação constante do desempenho do sistema. Isso envolve a coleta de dados sobre o

desempenho do sistema, a comparação dos resultados obtidos com os resultados previstos na análise financeira e a identificação de possíveis problemas e oportunidades de melhoria.

A *REopt* pode ser utilizado para realizar o monitoramento e avaliação do desempenho do sistema BESS, fornecendo informações sobre o consumo de energia, a geração de energia solar, a demanda de energia da rede elétrica e outros parâmetros relevantes. Com base nesses dados, é possível avaliar o desempenho do sistema e identificar possíveis oportunidades de melhoria.

3.9 Custo de Operação e Manutenção

O custo de Operação e Manutenção (O&M) é um fator crucial quando se trata de sistemas fotovoltaicos. Os sistemas fotovoltaicos são uma forma popular e sustentável de geração de energia, mas como qualquer outro sistema de energia, eles requerem monitoramento e manutenção contínuos para garantir um desempenho ideal.

O custo de O&M está diretamente relacionado à eficiência e durabilidade dos sistemas fotovoltaicos. Investir em manutenção regular e de qualidade pode ajudar a maximizar a vida útil dos componentes do sistema, reduzir o risco de falhas e garantir um desempenho consistente ao longo do tempo.

Com base em pesquisa realizada pelo Greener (2021), em um cenário plausível, foi identificado que o investimento destinado aos custos de Operação e Manutenção (O&M) é geralmente de aproximadamente 3% do total. Além disso, os valores mínimos e máximos para esses custos foram observados em torno de 1% e 6%, respectivamente.

A Figura 26 mostra a taxa de escalonamento de custos de O&M (%) que será utilizado nas simulações da ferramenta web *REopt*, serão utilizados os valores padrão da ferramenta com base na Linha de base tecnológica anual e cenários padrão de 2023 (NREL, 2023).

Figura 26 – Tela da taxa de escalonamento de custos de O&M.

The screenshot shows the 'Financial' settings page in the REopt software. The page has an orange header with a '\$' icon and the word 'Financial'. Below the header, there are several input fields and checkboxes. The 'Analysis period (years)' is set to 25. The 'Host discount rate, nominal (%)' is set to 6.38%. The 'Electricity cost escalation rate, nominal (%)' is set to 1.7%. There is a checkbox for 'Use third-party ownership model' which is unchecked. Below it is a checkbox for 'Show fewer inputs' which is checked. The 'Host effective tax rate (%)' is set to 26%. The 'O&M cost escalation rate (%)' is set to 2.5%. Each input field has a small blue question mark icon to its right.

Parameter	Value
Analysis period (years)	25
Host discount rate, nominal (%)	6.38%
Electricity cost escalation rate, nominal (%)	1.7%
Host effective tax rate (%)	26%
O&M cost escalation rate (%)	2.5%

Fonte: Autor (2024).

Existem várias atividades de O&M que são essenciais para o bom funcionamento de um sistema fotovoltaico. Isso inclui a limpeza regular dos painéis solares para remover a sujeira e detritos que podem afetar a eficiência da geração de energia. Além disso, é importante monitorar constantemente o desempenho do sistema, identificar e resolver quaisquer problemas que possam surgir.

O custo de O&M também inclui a substituição de componentes danificados ou desgastados ao longo do tempo. É importante realizar inspeções regulares para identificar qualquer desgaste ou danos nos módulos solares, inversores, cabos e outros componentes. Ao antecipar e substituir esses componentes antes que causem falhas no sistema, é possível reduzir os custos de reparo e minimizar o tempo de inatividade.

Além disso, o treinamento e capacitação adequados dos operadores de sistemas fotovoltaicos também são essenciais para minimizar os custos de O&M. Ao garantir que os operadores estejam bem informados sobre as melhores práticas de operação e manutenção, é possível evitar erros e reduzir o risco de danos aos componentes do sistema.

Em resumo, o custo de O&M é um aspecto crucial a ser considerado ao investir em sistemas fotovoltaicos. Ao realizar manutenção regular, substituir componentes danificados e capacitar adequadamente os operadores, é possível maximizar a eficiência e a vida útil do sistema, reduzindo assim os custos a longo prazo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, serão apresentados os resultados da análise técnica, econômica e ambiental do uso da tecnologia BESS em usina de geração de energia solar no campus Leste da UFERSA em Mossoró-RN. Além disso, será apresentado um estudo detalhado sobre a viabilidade técnica e econômica da utilização de sistema de armazenamento de energia em baterias dimensionado pela ferramenta web *REopt*.

Os dados de consumo de energia elétrica durante os períodos de Ponta, Fora de Ponta e memória de massa serão empregados para simulação. Para o horário de Ponta, o valor do consumo de energia, em R\$/kWh Tarifa Unitária, será calculado com a soma da Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição (TUSD) na Ponta, R\$ 1,80501, e da Tarifa de Energia (TE) na Ponta, R\$ 0,46353, resultando em R\$ 2,26854 por kWh. Quanto à Demanda Ativa, o valor do consumo, em R\$/kW Tarifa Unitária, será R\$ 29,02000.

E no horário de Fora de Ponta, o cálculo do consumo de energia, em R\$/kWh Tarifa Unitária, baseia-se na adição da Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição (TUSD) Fora de Ponta, R\$ 0,07373, e da Tarifa de Energia (TE) Fora de Ponta, R\$ 0,27714, totalizando R\$ 0,35087 por kWh. Quanto à Demanda Ativa, o consumo, em R\$/kW Tarifa Unitária, mantém-se no mesmo valor de R\$ 29,02000.

O Quadro 03 apresenta os dados dos valores em R\$/kWh e R\$/kW relativos ao consumo de energia ativa nos horários de Ponta e Fora de Ponta, além do valor da demanda ativa para a simulação na ferramenta web *REopt*. Os valores de consumo de energia e demanda ativa foram convertidos para moeda americana tomando como o conversor de moedas do Banco Central do Brasil, utilizando a data de cotação do dia 21-06-2024, onde 1 Dólar dos Estados Unidos/USD (220) = 5,4416 Real/BRL (790) (BCB, 2024).

Quadro 03 – Dados de consumo de Energia Ativa e Demanda.

Horário	Consumo de energia (R\$/kWh)	Demanda Ativa (R\$/kW)
Consumo Ativo na Ponta		
Ponta	R\$ 2,26854	R\$ 29,02000
Consumo Ativo Fora de Ponta		
Fora Ponta	R\$ 0,35087	R\$ 29,02000

Fonte: Autor (2024).

Serão usados os valores de R\$ 4000,00, US\$ 735, para Custo de capital do sistema (\$/kW-DC) – Fotovoltaico e R\$ 2.275,00, US\$ 418, para Custo da capacidade de energia (\$/kWh) e R\$ 4.550,00, US\$ 836, para Custo da capacidade de potência (\$/kW) - Baterias como referência para sistema de armazenamento de energia em baterias íon lítion para operação de 3 horas, (EPE, 2021). Os valores foram convertidos para moeda americana tomando como o conversor de moedas do Banco Central do Brasil, data de cotação utilizada 21-06-2024, onde 1 Real/BRL (790) = 0,1837695 Dólar dos Estados Unidos/USD (220), 1 Dólar dos Estados Unidos/USD (220) = 5,4416 Real/BRL (790) (BCB, 2024).

As informações obtidas neste estudo servirão como base para a tomada de decisões em futuros projetos de geração de energia solar com a utilização de sistemas de armazenamento de energia, além de contribuir para o avanço da pesquisa na área de energia renovável.

4.1 Perfil de consumo da Unidade Consumidora

O campus da UFERSA em Mossoró é dividido em duas partes: campus leste e campus oeste. A Companhia Energética do Rio Grande do Norte (COSERN) é responsável pelo fornecimento de energia elétrica, a tensão de fornecimento é de 13,8 kV. Dessa forma, o fornecimento está enquadrado no subgrupo A4 e a tarifa aplicada é a Tarifa Verde.

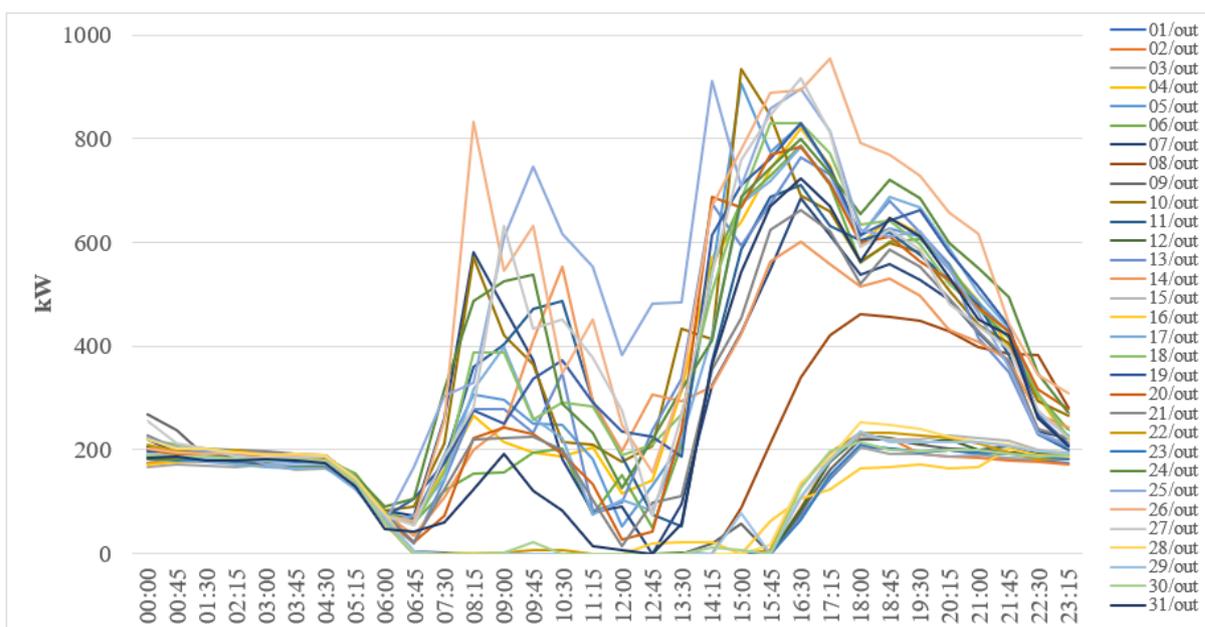
Com base na análise das faturas de energia elétrica de 2023 do Campus Leste da UFERSA, constata-se um maior consumo de energia elétrica no horário Fora de Ponta (FP). A proposta de implementação do sistema de armazenamento de energia em baterias visa sua utilização em conjunto com outras usinas solares já em operação no campus, priorizando especialmente o horário de Ponta.

Este período é estratégico, uma vez que, conforme resultados esperados, atividades são desenvolvidas nesse intervalo e o excedente gerado por essa geração será refletido nas próximas faturas, representando a energia já compensada pela geração solar dos sistemas fotovoltaicos em funcionamento.

A curva de carga de dias letivos e dias não úteis da UFERSA foi elaborada com base nos dados de memória de massa do mês de outubro de 2022 do campus Leste. A Figura 27 apresenta a curva de carga de energia elétrica de todo mês de outubro 2022. Conforme observado durante todo período analisado na Figura 27, há uma redução no consumo para aproximadamente 100 kW entre 06h00 e 07h00 devido ao desligamento da iluminação no campus. Após as 07h30, o consumo aumenta alcançando um pico de 600 kW. A partir das

10h30, o consumo cai devido ao fim das aulas matutinas. Às 13h00, o consumo aumenta novamente, registrando os maiores valores fora do horário de pico às 15h00 (780 kW), 15h30 (916 kW) e 16h00 (865 kW). Nos dias letivos o consumo começa a diminuir gradualmente a partir das 18h00 devido às aulas noturnas. Nos dias não letivos e não úteis entre 23h00 e 06h00, o consumo de energia elétrica no campus leste se mantém estável em torno de 200 kW devido a iluminação no campus. Essa tendência é consistente, refletindo um uso mínimo durante a madrugada.

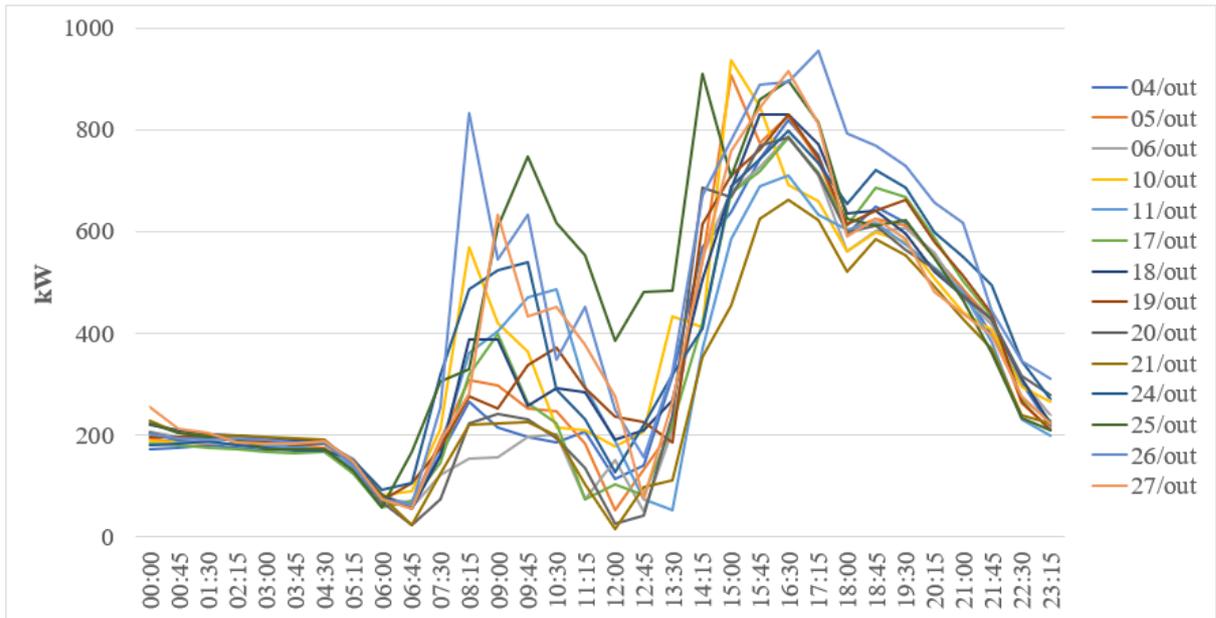
Figura 27 – Curva de Carga de energia elétrica mês de outubro de 2022.



Fonte: Autor (2024).

Na Figura 28, observamos a curva de carga de energia elétrica em dias letivos do mês de outubro 2022. O consumo inicia uma redução durante o horário de almoço, antes de retomar o crescimento por volta das 13h00. Durante a tarde, observa-se um pico de consumo, atingindo seu ápice de 916 kW por volta das 15h45, onde é perceptível que os valores de consumo de energia elétrica são bem maiores entre 14h00 e 18h00. A partir das 18h00, o consumo começa a declinar novamente, diminuindo consideravelmente por volta das 22h00.

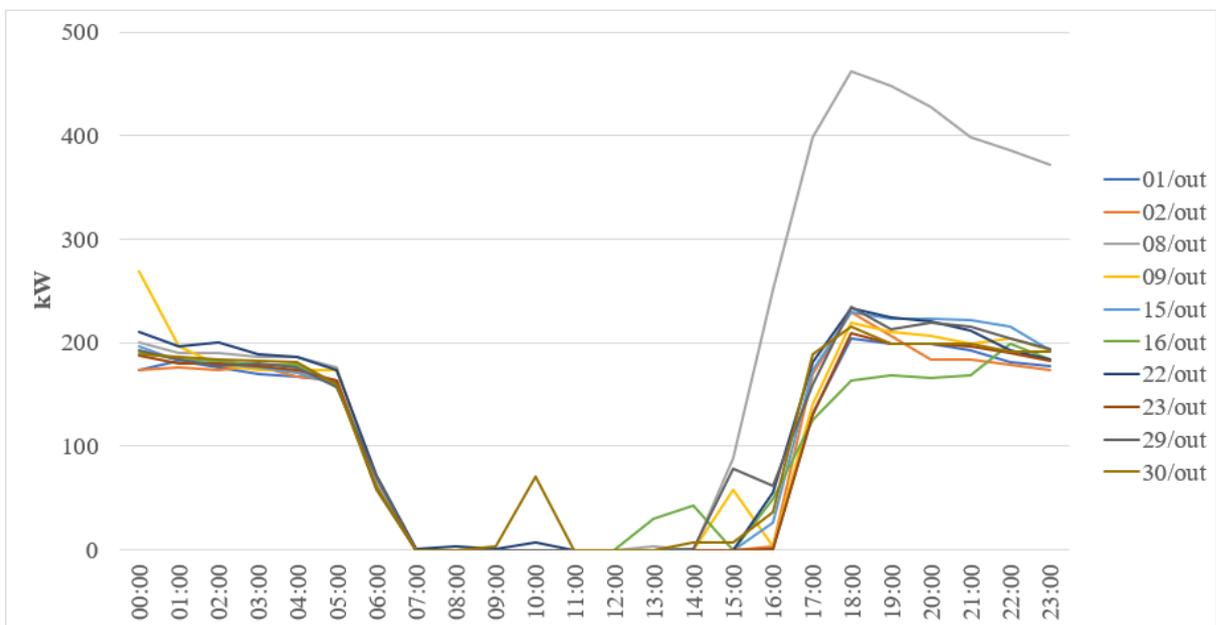
Figura 28 – Curva de Carga de energia elétrica em dias letivos de outubro de 2022.



Fonte: Autor (2024).

Na Figura 29, observamos a curva de carga de energia elétrica em dias não úteis do mês de outubro 2022 no campus Leste da UFERSA. Nos fins de semana, como mostra a Figura 29, o consumo de energia é reduzido a partir das 06h00, com um máximo de 71 kW. Apenas após as 15h00, o consumo volta a subir, atingindo um pico de 235 kW às 18h00. No dia 08/10, um sábado atípico, houve um grande consumo de energia entre 16h00 e 22h45, alcançando um máximo de 462 kW às 18h00.

Figura 29 – Curva de Carga de energia elétrica em dias não úteis de outubro de 2022.



Fonte: Autor (2024).

Ao analisar a demanda energética do Campus Leste da UFERSA, é crucial considerar os padrões de consumo como parte integrante desse processo. Compreender como a energia elétrica é utilizada nos diferentes setores da universidade pode fornecer informações valiosas para o desenvolvimento de estratégias eficientes de gestão energética.

Os padrões de consumo referem-se aos hábitos e comportamentos dos usuários finais em relação ao uso da energia elétrica. Isso inclui informações sobre os horários de pico de demanda, as áreas de maior consumo, as atividades específicas que requerem mais energia, entre outros fatores. Ao analisar esses padrões, é possível identificar oportunidades de redução de consumo, otimização de recursos e implementação de medidas de eficiência energética.

4.2 Dimensionamento de sistemas de armazenamento de energia

Para realizar um dimensionamento completo e detalhado de sistemas de armazenamento de energia usando a tecnologia BESS (*Battery Energy Storage System*), é necessário considerar diversos fatores e aplicar técnicas de otimização (SILVA; BORTONI, 2016). Vejamos os principais aspectos envolvidos nesse processo:

1. Aplicação:

- **Perfil de potência:** Ao analisar o perfil de potência, é possível identificar os momentos de pico de demanda e os períodos de menor utilização de energia. Isso permite dimensionar o sistema de armazenamento de energia de forma a suprir essas variações e garantir um fornecimento estável e confiável.
- **Requisitos de potência e energia:** Com base no perfil de potência, é possível calcular os requisitos de potência (kW) e energia (kWh) necessários para atender às necessidades do sistema.

2. Baterias:

- **Capacidade e sua variação:** Determinar a capacidade de armazenamento das baterias é essencial para atender às necessidades de energia do sistema. Além disso, é importante considerar a variação dessa capacidade ao longo do tempo devido à degradação natural das células das baterias. Isso ajuda a determinar a vida útil e a eficiência do sistema.
- **Taxa de descarga:** Avaliar a taxa máxima de descarga das baterias, levando em consideração a capacidade de fornecer energia de forma contínua e eficiente.

- **Efeito da temperatura:** O desempenho das baterias é influenciado pela temperatura ambiente. É necessário entender como a temperatura afeta a capacidade de armazenamento, a eficiência e a vida útil das baterias. Isso permitirá tomar medidas adequadas para mitigar os impactos negativos da temperatura.
- **Vida útil (calendário e ciclos):** As baterias têm uma vida útil limitada, tanto em termos de tempo (calendário) quanto em termos de ciclos de carga e descarga. Considerar esses dois aspectos é crucial para determinar a durabilidade das baterias e o momento adequado para substituí-las.
- **Variação de tensão:** As baterias possuem uma faixa de variação de tensão dentro da qual funcionam de maneira ideal. É importante garantir que essa faixa esteja alinhada com as necessidades e especificações do sistema, evitando problemas de compatibilidade e desempenho.

3. Sistema de conversão de energia:

- **Eficiência:** Avaliar a eficiência do sistema de conversão de energia é essencial para maximizar a utilização da energia armazenada. Um sistema eficiente garantirá que a energia seja convertida e fornecida de maneira adequada, minimizando perdas e maximizando a eficiência energética do sistema.
- **Tensão mínima:** Determinar a tensão mínima requerida pelo sistema de armazenamento de energia é importante para garantir seu funcionamento adequado. Isso evita problemas de operação e garante que a energia armazenada seja entregue de forma consistente e confiável.
- **Volume:** Considerar o espaço físico necessário para a instalação do sistema de armazenamento de energia é crucial para garantir uma implementação adequada. O volume ocupado pelo sistema deve ser levado em conta durante o dimensionamento, garantindo sua integração eficiente no local escolhido.

Ao levar em consideração todos esses aspectos e aplicar técnicas de otimização, é possível realizar um dimensionamento completo e detalhado de sistemas de armazenamento de energia usando a tecnologia BESS. Essa abordagem garante a eficiência e a compatibilidade do sistema, levando em conta as necessidades específicas de cada aplicação.

4.3 Entradas padrão ferramenta web *REopt*

A entrada de dados padrão *Site and Utility* é apresentada na Figura 30. Esta entrada abrange informações sobre o local do projeto, como coordenadas geográficas, altitude e dados climáticos locais. Além disso, inclui detalhes sobre as tarifas de eletricidade do utilitário local, como os custos de energia e demanda, horários de pico e outros fatores relevantes para a análise financeira.

Figura 30 – *Site and Utility*.

Site and Utility	
Limite de tamanho do sistema de medição líquida (kW)	N/A
Tarifa de atacado (\$/kWh)	N/A
Tolerância de otimalidade do solucionador (%)	0.1%
Nome do Solver	Altos
Tempo limite de otimização (segundos)	600

Fonte: Autor (2024).

A Figura 31 apresentada o *Load Profile*. Essa entrada envolve dados detalhados sobre o perfil de carga de energia do local, incluindo padrões de consumo ao longo do dia, da semana e do ano. Essas informações são essenciais para dimensionar adequadamente os sistemas de energia renovável e armazenamento, garantindo que atendam à demanda de energia do local de forma eficiente.

Figura 31 – *Load Profile*.

Load Profile	
Ajuste de carga (%)	100%
Consumo anual de energia elétrica (kWh)	3.727,994

Fonte: Autor (2024).

A Figura 32 mostra o *Financial*. Aqui são inseridos os parâmetros financeiros do projeto, como taxas de desconto, custos de capital, taxas de inflação e horizontes de análise. Esses dados são cruciais para avaliar a viabilidade financeira do projeto e calcular métricas como o valor presente líquido (VPL), a taxa interna de retorno (TIR) e o período de *Payback*.

Figura 32 – Financeiro.

Financeiro	
Período de análise (anos)	25
Taxa de desconto do anfitrião, nominal (%)	6.38%
Alíquota efetiva de imposto do host (%)	26%
Taxa de escalonamento do custo da eletricidade, nominal (%)	1.7%
Taxa de escalonamento de custos de O&M (%)	2.5%
Taxa de desconto de terceiros, nominal (%)	6.38%
Alíquota efetiva de imposto de terceiros (%)	26%

Fonte: Autor (2024).

A Entrada de dados padrão *Renewable Energy & Emissions* é apresentado na Figura 33. Nesta seção, são fornecidas informações sobre os recursos de energia renovável disponíveis no local, como irradiação solar, velocidade do vento e potencial de energia hidrelétrica. Além disso, podem ser inseridos dados sobre emissões de gases de efeito estufa associadas ao uso de combustíveis fósseis, permitindo uma análise comparativa entre fontes de energia limpa e convencional.

Figura 33 – *Renewable Energy & Emissions*.

Renewable Energy & Emissions	
Redução percentual anual projetada nos fatores de emissões de CO₂e da rede (%/ano)	2.16%
Redução percentual anual projetada nos fatores de emissões de saúde da rede (%/ano)	2163%
Incluir o clima no objetivo	FALSO
Incluir a saúde no objetivo	FALSO
Contar a eletricidade renovável exportada para as metas de energia renovável?	VERDADEIRO
Contabilizar a eletricidade exportada para compensações de emissões?	VERDADEIRO
Custo do CO₂ (\$/t CO₂)	51.0
Taxa de aumento do custo do CO₂, nominal (%)	4.22%

Fonte: Autor (2024).

As entradas de dados padrão PV e Battery estão apresentadas nas Figuras 34 e 35. Essas entradas concentram-se especificamente na tecnologia fotovoltaica (PV) e no armazenamento de bateria. Aqui, são inseridos detalhes sobre os sistemas solares fotovoltaicos planejados, como capacidade instalada, eficiência dos painéis, custos e vida útil. Da mesma forma, são fornecidos dados sobre os sistemas de armazenamento de bateria, incluindo capacidade, eficiência de carga e descarga, e custos associados.

Figura 34 – PV.

PV	
Custo de O&M (\$/kW-DC por ano)	\$18
Tamanho mínimo novo PV (kW-DC)	0
Tamanho máximo novo PV (kW-DC)	Ilimitado
Tipo de módulo	Padrão
Tipo de matriz	Montagem no solo, fixa
Azimute de matriz (graus)	0
Inclinação do array (graus)	20
Relação de tamanho DC para CA	1.2
Perdas do sistema (%)	14%
Perfil de geração fotovoltaica	N/A
Perfil de geração fotovoltaica	Nome do arquivo Prod Factor
Incentivo federal baseado em percentuais (%)	30%
Incentivo máximo federal (%)	Ilimitado
Desconto federal (\$/kW-DC)	\$0
Desconto máximo federal (\$)	Ilimitado
Incentivo estadual baseado em porcentagem (%)	0%
Incentivo máximo estadual (\$)	Ilimitado
Desconto estadual (\$/kW-DC)	\$0
Desconto máximo do estado (\$)	Ilimitado
Incentivo baseado em porcentagem de utilidade (%)	0%
Incentivo máximo de utilidade (\$)	Ilimitado
Desconto de utilitário (\$/kW-DC)	\$0
Desconto máximo do utilitário (\$)	Ilimitado
Incentivo à produção (\$/kWh)	\$0
Duração do incentivo (anos)	1
Incentivo máximo (\$)	Ilimitado
Limite de tamanho do sistema (kW-DC)	Ilimitado
Depreciação do bônus MACRS	60%
Horários do MACRS	5 anos
Raio de pesquisa da estação fotovoltaica (mi)	Ilimitado
Medidor de rede de latas	Sim

Fonte: Autor (2024).

Figura 35 – Bateria.

Battery	
Permitir que a rede carregue a bateria	Sim
Custo de reposição da capacidade de energia (\$/kWh)	\$318
Ano de substituição da capacidade de energia	10
Custo de substituição da capacidade de energia (\$/kW)	\$715
Ano de substituição da capacidade de energia	10
Capacidade energética mínima (kWh)	0
Capacidade máxima de energia (kWh)	Ilimitado
Capacidade de potência mínima (kW)	0
Capacidade máxima de potência (kW)	Ilimitado
Eficiência do retificador (%)	96%
Eficiência de ida e volta (%)	97.5%
Eficiência do inversor (%)	96%
Estado mínimo de carga (%)	20%
Estado inicial da carga (%)	50%
Total de incentivos baseados em percentuais (%)	30%
Desconto na capacidade total de energia (\$/kW)	\$0
Depreciação do bônus MACRS	60%
Horários do MACRS	7 anos

Fonte: Autor (2024).

4.4 Análise técnica

A análise técnica foi realizada com base em dados coletados sobre o consumo de energia elétrica da universidade. Utilizando a ferramenta web *REopt*, amplamente utilizada para análise de projetos de energia renovável, foi feita uma simulação para avaliar a viabilidade técnica do uso de um sistema de armazenamento de energia em bateria (BESS) para minimizar os custos para integração de energia renovável em um determinado local.

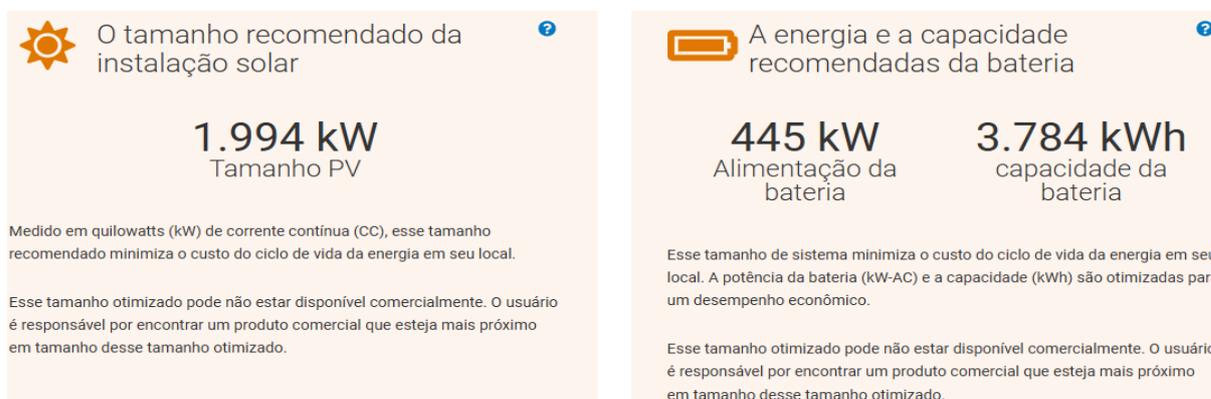
O objetivo principal dessa análise foi avaliar a viabilidade técnica do uso de um sistema de armazenamento de energia em bateria (BESS) para suavizar a geração de energia solar. Com a simulação realizada através da *REopt*, podemos obter informações valiosas sobre a eficiência desse sistema e sua capacidade de suprir as necessidades de energia da universidade.

Ao utilizar a análise técnica, pudemos identificar os benefícios potenciais do sistema de armazenamento de energia em bateria, como a capacidade de armazenar o excesso de energia gerado durante o dia e utilizá-lo durante os períodos de baixa geração solar. Isso não

apenas aumenta a eficiência do sistema, mas também reduz a dependência da universidade em relação à rede elétrica convencional.

A Figura 36 exibe o resultado do dimensionamento do sistema de armazenamento conforme os parâmetros mencionados anteriormente da simulação I sem considerar a existência de um sistema FV já existente no campus Leste.

Figura 36 – Resultado da análise técnica simulação I.



Fonte: Autor (2024).

Para minimizar os custos ao longo do ciclo de vida do sistema, a *REopt* fornece recomendações para o tamanho das instalações solares, energia da bateria e capacidade. Esta simulação sugere como resultado ótimo um sistema fotovoltaico de 1.994 kW como uma escolha ideal, um sistema de armazenamento de energia em baterias com 445 kW de potência de alimentação das baterias com uma capacidade de 3.784 kWh.

Na Figura 37 temos o resultado do dimensionamento do sistema de armazenamento de energia em baterias de acordo parâmetros informados da simulação II considerando agora o sistema de geração fotovoltaico existente no campus Leste da UFERSA.

Figura 37 – Resultado da análise técnica simulação II.



Fonte: Autor (2024).

Com o objetivo de minimizar os custos ao longo do ciclo de vida do sistema, a *REopt* recomenda como resultado ótimo a instalação de um sistema solar com capacidade de geração

de 3.016 kW de energia, nesta simulação o tamanho do PV é a soma do novo sistema mais existentes, assim temos, 2.042 kW novos mais 974 kW existentes, acompanhado por um banco de baterias de 445 kW, proporcionando uma capacidade de 3.784 kWh. Para esta simulação foi considerado os valores de faturamento de energia durante o ano de 2023 nos horários de Ponta e Fora de Ponta.

A energia fotovoltaica é frequentemente recomendada para reduzir os custos de energia ao longo do tempo. Ela costuma ser econômica em locais onde a tarifa de energia elétrica é elevada, há alta taxa de escalonamento de serviços públicos, o custo dos sistemas fotovoltaicos é baixo, existem bons incentivos e/ou há abundância de recursos solares, o que tornam a energia gerada por energia fotovoltaica mais barata do que a energia comprada da concessionária.

A potência e a capacidade da bateria são otimizadas independentemente para desempenho econômico. A relação potência/energia não é pré-definida.

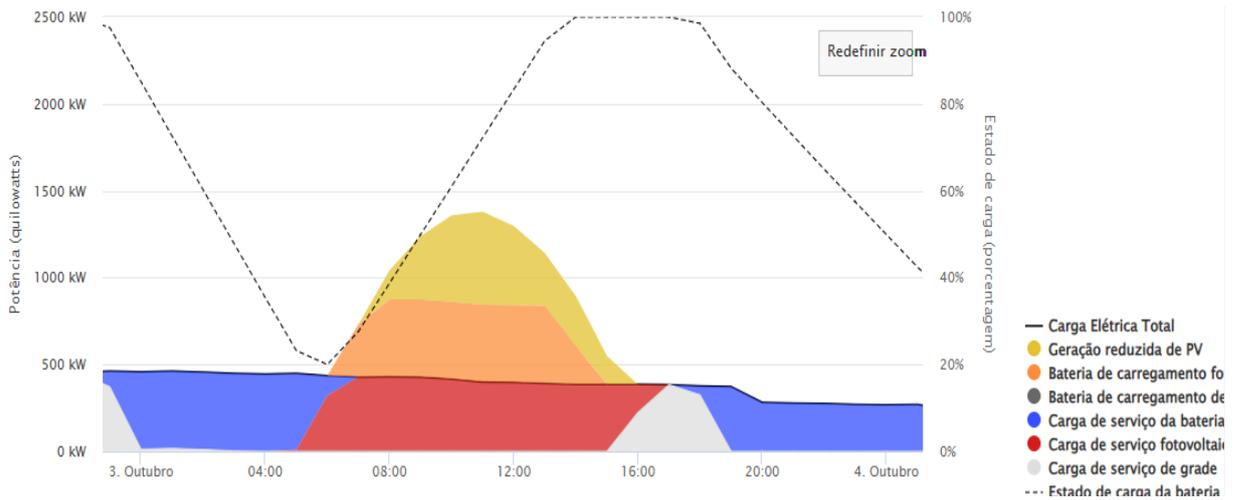
4.4.1 Desempenho do sistema primeiro ano

O gráfico apresenta de forma visual a estratégia otimizada pela *REopt* para a operação típica do sistema recomendado a cada hora ao longo do ano. Essa representação dinâmica oferece uma compreensão detalhada de como a otimização ocorre em diferentes momentos, permitindo uma análise precisa das decisões tomadas pelo sistema. O modelo otimiza a estratégia de cada tecnologia para atender a carga com vida útil mínima custo do ciclo de energia.

Através deste recurso, os usuários podem examinar de perto como a estratégia é adaptada para atender às demandas específicas de energia em diferentes momentos do ano. Isso inclui a alocação de recursos energéticos, como painéis solares, turbinas eólicas, baterias, entre outros, de acordo com as condições de demanda, disponibilidade e custo.

A Figura 38 mostra a estratégia otimizada pela ferramenta *REopt* para operação típica do sistema recomendado para cada hora do ano, o período apresentado compreende as horas entre os dias 03 e 04 de setembro do primeiro ano, para a simulação I.

Figura 38 – Resultado do Desempenho do sistema simulação I.



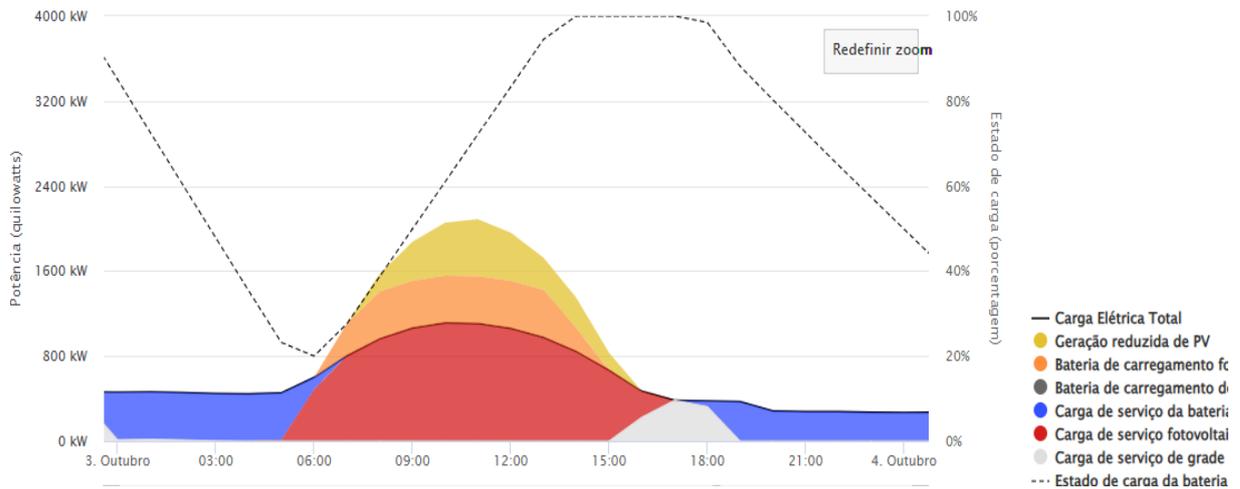
Fonte: Autor (2024).

O gráfico mostra o desempenho do sistema no primeiro ano, oferece uma representação visual da operação e do funcionamento do sistema de energia recomendado pela *REopt* ao longo de um período de um ano. Este gráfico interativo exibe como o sistema respondeu às variações na geração de energia renovável, na demanda de carga e em outras variáveis ao longo das diferentes horas do ano.

De acordo com dados apresentados no gráfico da simulação I para um sistema fotovoltaico de 1.994 kW, banco de baterias com 445 kW de potência e capacidade de 3.784 kWh, o estado de carga da bateria atinge um percentual de 100% entre 14h00 e 17h00, iniciando o ciclo de descarga a partir das 17h05 seguindo neste ciclo até as 05h00 atingindo um percentual de 20% do total de carga 3.784 kWh com uma carga de serviço entorno de 400 kW, a partir desse horário inicia o ciclo de carregamento fotovoltaico do sistema de baterias. Nesta simulação, o sistema de geração PV atinge um valor máximo de geração de 1400kW por volta das 11h00, neste horário o sistema de baterias está com aproximadamente 75% de seu carregamento. A carga de serviço fotovoltaico entre 07h00 e 15h00 fica entorno de 450 kW, a partir das 15h00 começa a diminuir até as 17h00 e neste período a carga de serviço da rede começa a ser fornecida para o campus, a partir das 17h00 inicia a carga de serviço fornecida pelo banco de baterias.

A Figura 39 apresenta a estratégia de despacho otimizada para simulação II do sistema recomendado para cada hora do ano, o período apresentado compreende as horas entre os dias 03 e 04 de outubro do primeiro ano do sistema.

Figura 39 – Resultado do Desempenho do sistema simulação II.



Fonte: Autor (2024).

A capacidade de visualizar o desempenho do sistema no primeiro ano permite aos usuários entender como o sistema operou em termos de eficiência, custos, utilização da bateria, resposta a interrupções e outras métricas relevantes. A análise do desempenho ao longo do tempo é essencial para avaliar a eficácia do sistema de energia recomendado e identificar áreas de melhoria ou otimização.

Na simulação II, com um sistema de banco de baterias de 445 kW de potência, 3.784 kWh de capacidade e um sistema fotovoltaico de 3.016 Kw, sendo 2.042 kW novos mais 974 kW existente no campus Leste da UFERSA, o estado de carga da bateria atinge um percentual de 100% entre 14h00 e 17h20, iniciando o ciclo de descarga a partir das 17h25 seguindo neste ciclo até as 05h00 atingindo um percentual de 20% do total de carga 3.784 kWh com uma carga de serviço entorno de 400 kW, a partir desse horário inicia o ciclo de carregamento fotovoltaico do sistema de baterias. O sistema de geração PV atinge um valor máximo de geração de 2000kW por volta das 11h00, neste horário o sistema de baterias está com aproximadamente 80% de seu carregamento. A carga de serviço fotovoltaico entre 07h00 e 15h00 fica entorno de 450 kW, a partir das 15h00 começa a diminuir até as 17h00 e neste período inicia a carga de serviço da rede elétrica fornecida pela concessionária para o campus, a partir das 17h00 inicia a carga de serviço fornecida pelo banco de baterias.

Para cada hora do ano, o gráfico mostra a carga elétrica como uma linha preta. A carga deve ser atendida em cada hora por qualquer energia comprada da rede, fotovoltaica, eólica, bateria, CHP. A energia fotovoltaica gera energia de acordo com quando o recurso está disponível e servem a carga, carregam a bateria ou exportam para a rede. A carga não atendida pela energia fotovoltaica é atendida pela descarga da bateria ou pela rede.

O modelo de otimização decide se deve carregar, descarregar ou não fazer nada com a bateria em cada hora. Se carrega ou descarrega, também decide por quanto. O estado de carga da bateria é mostrado como uma linha preta pontilhada. A bateria é dimensionada e despachada para minimizar o custo do ciclo de vida da energia no local. Não há meta de demanda. Em vez disso, os níveis de demanda são determinados pelo modelo de otimização.

Uma abordagem interativa e detalhada oferece aos usuários insights valiosos sobre a eficiência operacional e a resiliência do sistema de energia, auxiliando na tomada de decisões informadas e na implementação de estratégias que visam otimizar o desempenho e garantir uma operação confiável e sustentável ao longo do tempo.

As informações apresentadas no gráfico incluem diversas variáveis importantes para a gestão eficiente do sistema de energia, tais como: Carga Elétrica Total, Geração Reduzida de Energia, PV Bateria de carregamento, Bateria de carregamento, Carga de serviço da bateria, Carga de serviço fotovoltaico, Carga de serviço da rede e Estado de carga da bateria. Estes dados são essenciais para entender como os recursos energéticos estão sendo alocados e como o sistema está respondendo às demandas de energia em tempo real.

Os resultados da simulação mostram que o BESS é capaz de reduzir as flutuações na geração de energia solar e garantir que a energia esteja disponível quando necessário. Além disso, a simulação permitiu avaliar o tamanho adequado do BESS necessário para atender à demanda de energia da universidade.

4.5 Análise econômica

A análise econômica foi realizada para avaliar a viabilidade financeira do uso do BESS em comparação com a compra de energia elétrica da rede. Serão considerados os custos de instalação e manutenção do BESS, bem como os benefícios financeiros da redução da demanda de energia da rede e dos créditos de energia renovável gerados pela geração de energia solar.

Os resultados esperados deverão indicar que o uso do BESS é economicamente viável e pode levar a economias significativas nos custos de energia a longo prazo. Além disso, a simulação com a ferramenta *REopt* permitirá avaliar o período de retorno do investimento em um BESS, o que pode ser usado para tomar decisões informadas sobre o investimento em tecnologia de armazenamento de energia.

Os dados métricos financeiros da simulação I usados para avaliar a viabilidade econômica de um projeto, especialmente no contexto de investimentos em energia ou infraestrutura, estão apresentados na Figura 42.

Figura 42 – Resumo dos dados financeiros simulação I.

	Business As Usual	Financial	Difference
Resumo das métricas financeiras			
Custo total de capital inicial antes dos incentivos	N/A	US\$ 3.419.985	US\$ 3.419.985
Ano 1 Custo de O&M, Antes de Impostos	\$0	US\$ 35.901	US\$ 35.901
Custos totais do ciclo de vida	US\$ 11.451.872	US\$ 5.371.750	-\$ 6.080.122
Valor Presente Líquido	\$0	US\$ 6.080.122	US\$ 6.080.122
Período de Payback	N/A	2,93 anos	2,93 anos
Taxa Interna de Retorno	N/A	28.0%	28.0%
Custo de energia nivelado PV	N/A	\$0.030/kWh	\$0.030/kWh

Fonte: Autor (2024).

O Custo total de capital inicial antes dos incentivos é o custo total de investimento inicial necessário para iniciar o projeto, excluindo qualquer incentivo financeiro recebido. O custo total de capital inicial antes dos incentivos é relativamente baixo, em US\$ 3.419.985.

O Custo de O&M no primeiro ano refere-se aos custos de operação e manutenção no primeiro ano do projeto. Os custos operacionais (O&M) no primeiro ano também são baixos, em US\$ 35.901.

Os Custos totais do ciclo de vida representam o custo total estimado do projeto ao longo de sua vida útil. Pode incluir custos de investimento inicial, operação, manutenção e possíveis custos de desativação. No caso dado, é de US\$ 5.371.750, indicando um baixo custo durante o ciclo de vida do projeto, indicam que os custos de manutenção e operação ao longo da vida útil do projeto são relativamente contidos.

O Valor Presente Líquido (VPL) que é uma medida do valor presente de todos os fluxos de caixa futuros esperados do projeto, descontados à taxa de retorno exigida. Um VPL positivo indica que o projeto deve gerar retorno sobre o investimento, enquanto um VPL negativo indica que o projeto provavelmente resultará em perda financeira. Aqui, o VPL é de US\$ 6.088.122, indicando um retorno positivo do investimento e demonstra que o projeto deve gerar retorno sobre o investimento.

O Período de *Payback* é o período de tempo necessário para que o projeto gere fluxos de caixa suficientes para recuperar o investimento inicial. Neste caso, é de 2,93 anos, é considerado um prazo relativamente curto, o que significa que levará 2,93 anos para recuperar o investimento inicial.

A Taxa Interna de Retorno (TIR) é a taxa de desconto na qual o valor presente dos fluxos de caixa futuros do projeto se iguala ao investimento inicial. Uma TIR mais alta é geralmente preferível, pois indica uma maior rentabilidade do projeto. Aqui, a TIR é de 28.0%, o que sugere uma taxa de retorno relativamente alta e muito satisfatória, bem acima do custo de capital típico de projetos desse tipo.

O Custo de energia nivelado (*Levelized Cost of Energy* - LCOE) representa o custo médio por unidade de eletricidade gerada ao longo da vida útil do projeto. No caso apresentado, é de US\$0,030 por quilowatt-hora (kWh). Esses fatores indicam que o projeto apresentado na simulação I é economicamente atrativo e vale a pena ser considerado.

A Figura 43 exibe os dados métricos financeiros da simulação II, os quais são utilizados para avaliar a viabilidade econômica de um projeto, especialmente em investimentos relacionados à energia ou infraestrutura.

Figura 43 – Resumo dos dados financeiros simulação II.

	Business As Usual	Financial	Difference
Resumo das métricas financeiras			
Custo total de capital inicial antes dos incentivos	N/A	US\$ 3.455.214	US\$ 3.455.214
Ano 1 Custo de O&M, Antes de Impostos	US\$ 17.526	US\$ 54.290	US\$ 36.763
Custos totais do ciclo de vida	US\$ 12.072.006	US\$ 5.607.497	-\$ 6.464.509
Valor Presente Líquido	\$0	US\$ 6.464.509	US\$ 6.464.509
Período de Payback	N/A	2,84 anos	2,84 anos
Taxa Interna de Retorno	N/A	29.0%	29.0%
Custo de energia nivelado PV	N/A	\$0.020/kWh	\$0.020/kWh

Fonte: Autor (2024).

Na simulação II, o Custo total de capital inicial antes dos incentivos teve como resultado apresentado, US\$ 3.455.214, pode ser considerado um valor razoável para um projeto desse porte.

O Custo de O&M no primeiro ano foi de US\$ 54.290, enquanto os Custos Totais do Ciclo de Vida totalizaram US\$ 5.607.497. O custo de Operação e Manutenção é consideravelmente maior do que o apresentado na simulação I, porém ainda é relativamente baixo em comparação com o custo total de capital e os Custos Totais do Ciclo de Vida é ligeiramente maior do que o apresentado na simulação anterior, mas ainda indica que os custos durante a vida útil do projeto são contidos.

O Valor Presente Líquido (VPL) esperado do projeto, foi de US\$ 6.464.509, indicando um retorno positivo do investimento demonstrando um retorno positivo ainda mais atrativo sobre o investimento, enquanto o Período de *Payback* foi de 2,84 anos, o que significa que levará 2,84 anos para recuperar o investimento inicial, este valor é ligeiramente menor do que

o apresentado na simulação anterior, o que significa que o investimento inicial será recuperado em um prazo ainda mais curto. O cálculo do *Payback* é baseado nas descrições de *Payback* simples em Short W et al, 1995. "Manual de Avaliação Econômica de Eficiência Energética e Tecnologias de Energias Renováveis". (NREL, 1995).

A Taxa Interna de Retorno (TIR) para este projeto foi de 29,0%, este valor é ligeiramente maior do que o apresentado na simulação anterior (28,0%), o que indica uma taxa de retorno relativamente mais alta e atrativa, enquanto o Custo de energia nivelado (*Levelized Cost of Energy - LCOE*) foi de \$0,020 por quilowatt-hora (kWh). Esses resultados sugerem que o projeto apresentado na simulação II ser viável e atrativo do ponto de vista econômico-financeiro apresentando viabilidade econômica.

Ao realizar essa análise, é essencial considerar os custos de instalação e manutenção do BESS. Esses custos incluem a aquisição das baterias, inversores e demais equipamentos necessários, além das despesas com a instalação e a garantia de que o sistema esteja em conformidade com as normas e regulamentos aplicáveis.

Além disso, é importante considerar os benefícios financeiros decorrentes da redução da demanda de energia da rede. O BESS permite armazenar energia em momentos de baixa demanda e fornecê-la durante períodos de pico, reduzindo assim a necessidade de compra de energia da rede. Isso pode resultar em economias significativas nos custos de eletricidade ao longo do tempo.

Outro aspecto a ser considerado são os créditos de energia renovável gerados pela geração de energia solar. O BESS pode ser combinado com sistemas de geração de energia solar fotovoltaica, permitindo o armazenamento da energia excedente gerada durante o dia e sua utilização durante a noite ou em momentos de baixa geração solar. Essa geração de energia renovável pode gerar créditos que podem ser comercializados ou utilizados para reduzir os custos de eletricidade.

Em resumo, a análise econômica com a ferramenta web *REopt* constitui uma ferramenta robusta para avaliar a viabilidade financeira da integração do BESS nos sistemas energéticos. Ao ponderar os custos de instalação e manutenção, juntamente com os benefícios financeiros provenientes da redução da demanda de energia da rede e dos créditos de energia renovável, as organizações podem tomar decisões embasadas que estejam em consonância com suas metas e objetivos financeiros.

4.6 Análise ambiental

Por fim, a análise ambiental será realizada para avaliar os benefícios ambientais do uso de um sistema de armazenamento de energia da bateria em uma usina de geração de energia solar. Serão considerados os impactos na redução de emissões de gases de efeito estufa e na redução do consumo de combustíveis fósseis.

Os resultados esperados deverão mostrar que o uso do BESS pode levar a uma redução significativa na emissão de gases de efeito estufa e no consumo de combustíveis fósseis em comparação com a compra de energia elétrica da rede. Esses benefícios ambientais podem ser usados como um incentivo adicional para o uso de tecnologias de armazenamento de energia em usinas de geração de energia solar.

A análise ambiental desempenha um papel crucial na avaliação dos benefícios ambientais proporcionados pelo uso de um sistema de armazenamento de energia em bateria (BESS) em uma usina de geração de energia solar.

Ao considerar os impactos ambientais, dois aspectos principais foram analisados: a redução das emissões de gases de efeito estufa e a diminuição do consumo de combustíveis fósseis.

Os dados relacionados às emissões climáticas e de saúde associadas do projeto simulação I estão apresentados na Figura 44.

Figura 44 – Emissões Climáticas e de Saúde simulação I.

	Business As Usual	Financial	Difference
Emissões Climáticas			
CO evitado ² e Emissões ao longo do período de análise	N/A	551 toneladas	551 toneladas
Emissões de Saúde			
Evitado OS ² Emissões ao longo do período de análise	N/A	2.011,96 toneladas	2.011,96 toneladas

Fonte: Autor (2024).

A Figura 45 mostra os dados relacionados às emissões climáticas e de saúde associadas ao projeto da simulação II.

Figura 45 – Emissões Climáticas e de Saúde simulação II.

	Business As Usual	Financial	Difference
Emissões Climáticas			
CO evitado ² e Emissões ao longo do período de análise	N/A	576 toneladas	576 toneladas
Emissões de Saúde			
Evitado OS ² Emissões ao longo do período de análise	N/A	2.105,70 toneladas	2.105,70 toneladas

Fonte: Autor (2024).

O CO₂ evitado e Emissões ao longo do período de análise indica a quantidade de dióxido de carbono (CO₂) que foi evitada de ser liberada na atmosfera devido ao projeto. Nos

cenários apresentados, 551 e 576 toneladas de CO₂ foram evitadas ao longo do período de análise, respectivamente. Isso sugere que o projeto teve um impacto positivo na redução das emissões de gases de efeito estufa, contribuindo para mitigar as mudanças climáticas.

As Emissões de Saúde Evitadas - NO_x e SO₂ ao longo do período de análise representam as emissões de óxidos de nitrogênio (NO_x) e dióxido de enxofre (SO₂) que foram evitadas de serem emitidas devido ao projeto. Nos casos apresentados, não foram emitidas toneladas de NO_x e 2.011,96 e 2.105,70 toneladas de SO₂ ao longo do período de análise, respectivamente. A redução dessas emissões é benéfica para a saúde humana e ambiental, já que esses poluentes podem causar problemas respiratórios e contribuir para a formação de chuva ácida.

O PM_{2.5} evitado e Emissões ao longo do período de análise indica a quantidade de material particulado (PM_{2.5}) que foi evitada de ser liberada na atmosfera devido ao projeto. Nos cenários apresentados, não foram emitidas toneladas de PM_{2.5} ao longo do período de análise. O PM_{2.5} é um tipo de poluente atmosférico fino que pode ser prejudicial à saúde quando inalado, causando problemas respiratórios e cardiovasculares.

Essas métricas fornecem uma visão abrangente do impacto ambiental e de saúde de um projeto ou atividade, permitindo avaliar seus benefícios em termos de redução de emissões e melhoria da qualidade do ar.

Os resultados demonstram que a utilização do BESS pode resultar em uma redução significativa nas emissões de gases de efeito estufa, quando comparado à aquisição de energia elétrica proveniente da rede convencional. Isso ocorre porque a energia solar é uma fonte limpa e renovável, que não libera gases poluentes durante a sua geração. Além disso, o uso do BESS permite um melhor gerenciamento do fluxo de energia, evitando desperdícios e maximizando o aproveitamento da energia solar disponível.

5 INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

Os resultados esperados na análise técnica, econômica e ambiental permitiu concluir que a utilização da tecnologia BESS em usinas de geração de energia solar no campus Leste da UFERSA em Mossoró-RN é uma alternativa viável e interessante para a promoção do uso de fontes de energia renovável.

A partir dos dados coletados e da modelagem realizada na *REopt*, foi possível verificar que a tecnologia BESS apresenta vantagens significativas em termos de otimização do uso da energia gerada pela usina solar. Com o uso da tecnologia BESS, será possível aumentar a eficiência da usina, reduzindo as perdas de energia e aumentando a disponibilidade da energia para uso em momentos de menor geração solar.

A comparação de resultados para duas simulações é apresentada na Figura 46. Observa-se que o VPL da Simulação I é maior do que o da Simulação II, indicando uma viabilidade econômica ligeiramente mais atrativa para a Simulação I. Avaliação do Tamanho do sistema fotovoltaico, na simulação I temos um sistema fotovoltaico significativamente maior, com quase 50% a mais de capacidade instalada em comparação com a Simulação II, isso porque foi inserido nos dados de entrada da simulação um sistema PV de 974 kW existente no campus Leste da UFERSA. A capacidade do bando de baterias e a potência das baterias em ambas simulações são a mesma com 3784 kWh e 445 kW.

Figura 46 – Comparação de Resultados.

Avaliação Comparação Financeira	Mossoró RN Brasil Simulação I 27/06/2024 - 08:51 ID: 10b2	Mossoró RN Brasil Simulação II 27/06/2024 - 09:28 ID: 1a2a
Valor Presente Líquido	Preço: \$6,464,509.13	Preço: \$6,080,122.3
Tamanho PV	3016 kW	1994 kW
Capacidade da bateria	3784 kWh	3784 kWh
Energia da bateria	445 kW	445 kW

Fonte: Autor (2024).

Analisando esses dados podemos considerar sobre a viabilidade econômica que a simulação I apresenta um VPL maior, indicando uma viabilidade econômica ligeiramente mais atrativa. No entanto, a diferença de VPL entre as duas simulações não é muito significativa. A simulação I possui um sistema fotovoltaico maior, pois foi inserido na entrada de dados o sistema PV de 974 kW existente no campus, o que pode significar um custo de capital inicial mais elevado, mas também uma maior geração de energia e, conseqüentemente,

maior retorno financeiro e as capacidades e potências do banco de baterias são iguais nas duas simulações, então esse fator não interfere na comparação da viabilidade econômica.

A simulação II apresentou indicadores financeiros ligeiramente melhores do que a simulação I, com exceção dos custos de operação (O&M) uma diferença de US\$ 18.389, significativamente maior na simulação II. O Valor Presente Líquido, Taxa Interna de Retorno e o Período de *Payback* são mais favoráveis na simulação II, sugerindo uma viabilidade econômica ainda mais atrativa para esse projeto.

A análise econômica demonstrou a viabilidade de investir na tecnologia BESS. O período de retorno relativamente curto e os benefícios econômicos substanciais a longo prazo apoiam ainda mais a decisão de adotar o BESS. Isto indica que a implementação de um sistema de armazenamento de energia em baterias não só trará vantagens ambientais, mas também trará ganhos financeiros para a universidade no longo prazo.

Por último, a análise ambiental confirmou que a utilização da tecnologia BESS contribuirá para a redução das emissões de gases com efeito de estufa e apoiará a sustentabilidade ambiental. Ao armazenar energia solar em baterias, a dependência de fontes de energia não renováveis pode ser diminuída, mitigando assim os impactos negativos associados ao consumo de combustíveis fósseis.

Levando em conta essas conclusões abrangentes das análises técnicas, econômicas e ambientais, é possível observar que a implementação da tecnologia BESS em usinas de energia solar na UFERSA, em Mossoró, é uma escolha altamente favorável e promissora. Não só promoverá a utilização de fontes de energia renováveis, mas também produzirá benefícios técnicos, econômicos e ambientais, reforçando assim os esforços de sustentabilidade e reduzindo os impactos ambientais negativos.

5.1 Análise *REopt*

A *REopt* é uma ferramenta web projetada com o propósito de avaliar a viabilidade de implementação de projetos com ênfase na eficiência energética. Seu objetivo principal é oferecer uma análise abrangente que leve em consideração diversos parâmetros, desde custos iniciais até benefícios a longo prazo, para orientar decisões relacionadas a investimentos em energia.

Uma das principais vantagens da análise *REopt* é sua capacidade de reduzir os custos ao longo do ciclo de vida do projeto. Ao considerar não apenas os custos iniciais de

implementação, mas também os custos operacionais e de manutenção ao longo do tempo, a ferramenta fornece uma visão holística dos benefícios financeiros associados a um determinado projeto de eficiência energética. Isso permite que os tomadores de decisão avaliem não apenas o retorno sobre o investimento inicial, mas também o impacto financeiro a longo prazo.

Além disso, a análise *REopt* também aborda a questão das emissões de gases de efeito estufa. Ao identificar e promover projetos que reduzem o consumo de energia e incentivam o uso de fontes renováveis, a ferramenta contribui para a mitigação das mudanças climáticas, auxiliando na redução das emissões de carbono e outros gases causadores do efeito estufa.

Outro aspecto importante da análise *REopt* é sua capacidade de agilizar o processo de identificação e acesso a potenciais projetos energéticos. Ao fornecer uma análise detalhada e personalizada com base nos dados específicos de cada projeto, a ferramenta ajuda a eliminar a necessidade de avaliações demoradas e dispendiosas, permitindo que os interessados identifiquem rapidamente as melhores oportunidades de investimento em eficiência energética.

Em resumo, a *REopt* é uma ferramenta valiosa para promover a eficiência energética e a sustentabilidade ambiental. Ao fornecer uma análise abrangente dos custos e benefícios associados a projetos de energia, a ferramenta ajuda a orientar decisões informadas e a maximizar o retorno sobre o investimento, ao mesmo tempo em que contribui para a redução das emissões de gases de efeito estufa e para a proteção do meio ambiente.

5.2 Limitações do estudo

Primeiramente, para realizar simulações na ferramenta web *REopt* é essencial utilizar dados de carga elétrica reais do local de estudo em vez dos perfis de carga simulados da ferramenta. Isso garante que a análise seja baseada em informações precisas sobre o consumo de energia, permitindo uma avaliação mais realista da viabilidade do projeto. Da mesma forma, é importante considerar adequadamente os custos e incentivos específicos para a localização em questão, incluindo elementos como tarifas de interconexão e outros incentivos financeiros disponíveis.

Ao lidar com a falta de dados específicos, é necessário fazer suposições embasadas em informações disponíveis, o que pode introduzir uma margem de erro nas análises realizadas. A precisão dos resultados depende, em grande parte, da qualidade dos dados utilizados.

Essas limitações são inerentes ao escopo e à disponibilidade de dados no momento da realização do estudo. É importante reconhecer que estudos futuros em escala mais ampla e com dados mais específicos podem ser necessários para validar e generalizar os resultados obtidos neste estudo.

Apesar dessas limitações, os resultados deste estudo ainda fornecem insights valiosos sobre a viabilidade e os benefícios potenciais da utilização da tecnologia BESS em usinas de geração de energia solar. Eles servem como um ponto de partida para futuras pesquisas e projetos relacionados, incentivando a exploração de fontes de energia renovável e sustentável em diferentes contextos.

As decisões de investimento em sistemas de energia renovável não devem ser baseadas exclusivamente nos resultados fornecidos pela ferramenta de otimização *REopt*. Embora essa ferramenta ofereça projeções valiosas sobre economia de energia e resiliência do sistema, é crucial reconhecer suas limitações.

Outro ponto importante é que os resultados da *REopt* são baseados em um modelo horário que pode não capturar totalmente a variabilidade intra-hora dos recursos fotovoltaicos. Isso pode levar a uma estimativa exagerada da economia esperada, especialmente quando a demanda é normalmente determinada com base no pico máximo de 15 minutos.

Além disso, as simulações horárias utilizam dados de carga e recursos solares e eólicos de apenas um ano, o que pode não refletir as variações reais que ocorrem ao longo do tempo.

As decisões operacionais resultantes do modelo de despacho de ativos podem não se alinhar perfeitamente com a infraestrutura existente ou seguir as práticas recomendadas. Por exemplo, o despacho da caldeira em sistemas de geração de energia que combinam o calor e energia (CHP) pode levar a ciclos curtos ou ao uso periódico da caldeira, o que pode não ser viável sem o modo de espera a quente. Portanto, é essencial revisar os resultados do despacho considerando essas limitações.

Em resumo, embora a ferramenta web de análise *REopt* forneça informações valiosas para tomadas de decisão em investimentos em energia renovável, é crucial reconhecer suas limitações e considerar uma análise mais abrangente que leve em conta as complexidades e incertezas do mundo real.

5.3 Contribuições do estudo

Este estudo contribui para a promoção da utilização de fontes de energia renovável e para a adoção de tecnologias mais eficientes e sustentáveis. Ao verificar a viabilidade da utilização da tecnologia BESS em usinas de geração de energia solar, o estudo contribui para a promoção da utilização de fontes de energia limpa e para a redução da dependência de fontes de energia não renovável.

Além disso, o estudo contribui para a disseminação do uso da ferramenta web *REopt*, que é uma ferramenta importante para a modelagem e análise da viabilidade de projetos de energia renovável. Com a utilização da *REopt*, é possível avaliar a viabilidade técnica, econômica e ambiental de projetos de energia renovável de forma eficiente.

Por fim, este estudo pode servir de base para estudos futuros sobre a utilização da tecnologia BESS em usinas de geração de energia solar em diferentes regiões do país e do mundo. A análise realizada neste estudo pode ser adaptada e utilizada como referência para outros estudos e projetos relacionados à energia renovável e à tecnologia BESS.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo principal analisar a viabilidade técnica e econômica para implantação de sistema de armazenamento de energia em baterias em um campus de uma Universidade Federal localizada na região do semiárido do estado do Rio Grande do Norte, e esse objetivo foi atendido.

A análise técnica consistiu na avaliação dos resultados obtidos pela ferramenta de otimização *REopt* através da solução ótima para redução de custos para o uso de tecnologias e estratégias na integração de energias renováveis.

A análise econômica da implantação do sistema BESS foi realizada considerando os custos de instalação, manutenção, custo total do ciclo de vida, a taxa interna de retorno (TIR) e o retorno financeiro, bem como os benefícios financeiros da redução da demanda de energia da rede e dos créditos de energia renovável gerados pela geração de energia solar.

A ferramenta web *REopt* é uma plataforma valiosa que pode ser utilizada para realizar esses estudos de viabilidade, integrando diversas dessas considerações em sua análise. Permite a avaliação da viabilidade técnico-econômica não apenas de armazenamento de energia em baterias, mas também de outras fontes de energia renovável, como solar e eólica. Ela oferece uma abordagem integrada para dimensionar e otimizar sistemas de energia renovável e armazenamento de energia, levando em consideração fatores como demanda de energia, perfil de carga e tarifas de serviço público.

A ferramenta fornece uma estimativa da viabilidade técnica e econômica de projetos de armazenamento de energia em baterias, integrando uma série de considerações importantes, conforme destacado. Ao fornecer uma abordagem abrangente e integrada, a *REopt* ajuda os usuários a tomar decisões informadas e maximizar o potencial de sucesso de seus projetos de energia renovável.

Em última análise, a adoção bem sucedida do BESS e de outras tecnologias de energia renovável depende de uma abordagem holística e cuidadosa, que leve em consideração não apenas os aspectos técnicos e econômicos, mas também as questões regulatórias, ambientais e sociais envolvidas. Ao adotar uma abordagem prudente e informada, os investidores podem maximizar os benefícios econômicos e ambientais dos projetos de energia renovável, contribuindo para um futuro mais sustentável e resiliente.

REFERÊNCIAS

ALOTTO, PIERGIORGIO; GUARNIERI, MASSIMO; MORO, FEDERICO. **Redox flow batteries for the storage of Renewable energy: A review.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 29, p. 325-335, 2014.

AMIRYAR, M.; PULLEN, K.A. **Review of Flywheel Energy Storage System Technologies and Their Applications.** Appl. Sci., 7, 286, 2017. doi: 10.3390/app7030286.

AZIZ, M. A., KAMARUDIN, S. K., & SAHARI, K. S. M. (2018). **Recent advances in lithium-ion batteries for energy storage systems.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, 82, 1970-1978.

BASTOS, M. F. **Análise de Viabilidade Econômica de Projetos.** 2ª ed. São Paulo: Atlas, 2019.

BAUMANN, M., DE DONCKER, R. W., & SURIYAH, M. R. (2015). **Battery energy storage systems for stand-alone and grid-connected applications.** IEEE Transactions on Industrial Electronics, 62(4), 2424-2433.

BET, BATTERY AND ENERGY TECHNOLOGIES. Disponível em: https://www.mpoweruk.com/grid_storage.htm. Acesso em: 18 abr. 2023.

BODIE, Z., KANE, A. e MARCUS, A. J. **Investimentos.** 10ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2014.

BREALEY, R., MYERS, S. C., & ALLEN, F. (2011). **Princípios de finanças corporativas.** Porto Alegre: Bookman.

BYRNE, JOHN, et al. (2018). **Energy Security and Climate Change Mitigation: The Path to Renewable Energy in Small Island Developing States.** Renewable Energy, 129(Part A), 417-430.

CANAL SOLAR. **Sistemas BMS para baterias de lítio.** Disponível em: <https://canalsolar.com.br/sistemas-bms-para-baterias-de-litio/>. Acesso em: 25 mar. 2023.

CANTANE, D. A.; HIDEO, O.; JUNIOR, A. **Tecnologias de Armazenamento de Energia Aplicadas ao Setor Elétrico Brasileiro.** SCIENZA ed. São Carlos/SP. 2020.

CAVALCANTE, R. M., FERNANDES, J. L. R., & FREIRE, E. L. (2018). **Potencial de uso de baterias de lítio-íon em sistemas de armazenamento de energia elétrica**. Anais do Congresso Brasileiro de Energia Solar, 6, 1-9.

CBIE. **Como funciona a geração solar**. Disponível em: <<https://cbie.com.br/como-funciona-a-geracao-solar/>>. Acesso em: 10 mar. 2023.

CEPEL, 2001, **Atlas Solarimétrico do Brasil**. Brasília. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=publicacoes&task=livro&cid=2>>. Acesso em: 01 jun. 2023.

EATON. **Supercapacitores**. Disponível em: <<https://www.eaton.com/br/pt-br/products/electronic-components/supercapacitors.html>>. Acesso em: 18 mar. 2023.

EGBUE, O., & LONG, S. (2012). **Barriers to widespread adoption of renewable energy technologies**. Renewable Energy, 39(1), 52-58.

EHSANI, M., GAO, Y., EMADI, A., & GAY, S. (2018). **Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design**. Boca Raton, FL: CRC Press.

ELLABBAN, O., ABU-RUB, H., & BLAABJERG, F. (2014). **Recursos energéticos renováveis: situação actual, perspectivas futuras e respectiva tecnologia**. Revisões de Energia Renovável e Sustentável, 39, 748-764.

ENERGYSAGE. **Behind-the-meter: what you need to know**, 2019. Disponível em: <<https://news.energysage.com/behindthe-meter-overview/>>. Acesso em: 17 nov. 2023.

ENEPAQ. **Módulos de bateria**. Disponível em: <<https://enepaq.com/product-category/battery-modules/>>. Acesso em: 26 mai. 2024.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Parâmetros de Custos – Geração e Transmissão**. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-607/topico-591/Caderno%20de%20Par%C3%A2metros%20de%20Custos%20-%20PDE2031.pdf>>. Acesso em: 02 mai. 2024.

FIALHO, L. P. **Análise de Viabilidade Econômica de Projetos: Uma Proposta para Avaliação de Projetos Sociais**. Revista de Administração da UNIMEP, v. 16, n. 1, 2018.

FROESE, MICHELLE (2018). **Hawaiian Electric launches four-hour kinetic energy storage system**. Disponível em: <<https://www.windpowerengineering.com/hawaiian-electric-launches-four-hour-kinetic-energy-storage-system/>>. Acesso em: 03 de jan. 2024.

GIBBONS, P. B., & LI, W. (2018). **Robust design optimization of building energy systems under uncertainty**. Energy and Buildings, 177, 204-216.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. **Energia, meio ambiente e desenvolvimento**. 3. ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2012.

GREEN, M. A., et al. (2019). **Tabelas de eficiência de células solares** (versão 54). Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 27(1), 3-12.

GREENER. **Estudo Estratégico: Mercado de Armazenamento, Aplicações, Tecnologias e Análises Financeiras**. 2021. Disponível em: <<https://greener.greener.com.br/pagina-de-agradecimento-mercado-armazenamento-de-energia-2021>>. Acesso em: 10 dez. 2023.

GREENER. **Estudo Estratégico: Mercado Fotovoltaico de Geração Distribuída**. 2020. Disponível em: <<https://www.greener.com.br/estudo/estudo-estrategico-mercado-fotovoltaico-de-geracao-distribuida-2-semester-de-2020/>>. Acesso em: 03 dez. 2023.

GÜRDAL, Z., & ÖZDEMİR, Z. D. (2017). **Sensitivity analysis in multi-criteria decision-making process**. Procedia Computer Science, 120, 771-778.

HOCKADAY, R. G., & COHN, A. P. (2018). **Energy storage for the electricity grid: Benefits and market potential assessment guide**. Technical report, US Department of Energy.

INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2017. Atlas Brasileiro de Energia Solar, 2a edição. Disponível em: <https://www.inpe.br/webi/solares/atlas_brasileiro_energia_solar.pdf>. Acesso em: 26 mai. de 2024.

IEA. International Energy Agency. **Global Energy Review 2021**. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2021>>. Acesso em: 01 de mar. de 2023.

IEA. International Energy Agency. **Energy Storage**. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/energy-storage>>, 2022. Acesso em: 17 fev. 2024.

IEA. International Energy Agency. **Energy storage: Tracking progress 2020**. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/energy-storage/tracking-progress-2020>>. Acesso em: 09 fev. 2023.

IRENA. International Renewable Energy Agency. **Renewable energy statistics 2019**. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2019.

IRENA. International Renewable Energy Agency. **Renewable Power Generation Costs in 2018**. Disponível em: <<https://www.irena.org/publications/2019/May/Renewable-power-generation-costs-in-2018>>. Acesso em: 02 fev. de 2023.

IRENA. International Renewable Energy Agency. **Electricity Storage Valuation Framework: Assessing system value and ensuring project viability**. 2020. Disponível em: <<https://irena.org/publications/2020/Mar/Electricity-Storage-Valuation-Framework-2020>>. Acesso em: 18 nov. 2023.

IRENA. International Renewable Energy Agency. **Renewable Power Generation Costs in 2020**. Abu Dhabi: IRENA, 2021. Disponível em: <<https://www.irena.org/publications/2021/Jun/Renewable-Power-Costs-in-2020>>. Acesso em: 27 mai. de 2024.

JAIN, P. K., et al. (2016). **Tecnologias de armazenamento de energia para integração renovável: uma revisão**. Revisões de Energia Renovável e Sustentável, 60, 1113-1123.

KANG, Y., KIM, J., LEE, D., & PARK, M. (2020). **Tecnologias e aplicações de supercapacitores: uma revisão**. Revista de Química Industrial e de Engenharia, 83, 14-28.

KAVALA, O. S., VATANI, A., & DENIZ, U. (2018). **Flywheel energy storage systems for renewable energy applications: a review**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 89, 205-217. doi: 10.1016/j.rser.2018.03.017

KHARE, A., YADAY, A., & YADAY, S. (2019). **Performance evaluation of Li-ion battery storage system for grid connected solar power plant**. International Journal of Renewable Energy (IJRER), 9(4), 1849-1854.

KIM, S., SHIN, S., & CHO, B. (2019). **Supercapacitors for electric vehicles: A review**. Applied Energy, 233, 307-338.

KÜHN, M., AUCKENTHALER, T., & KOLAR, J. W. (2018). **Sistemas de armazenamento de energia do volante para aplicações de energia renovável**. IEEE Transações em Eletrônica Industrial, 65 (2), 1714-1723.

LI, Y., GAO, Y., XIE, C., & HE, X. (2017). **Battery energy storage system: Control methods and applications**. Energy Storage Materials, 9, 45-58.

LUTHANDER, R. et al, 2015. **Photovoltaic self-consumption in buildings: A review**. Applied Energy, v. 142, p. 80–94.

MILLIGAN, MICHAEL, & KIRBY, BRENDAN. (2018). **Evaluating the Impacts of Renewable Portfolio Standards**. IEEE Power & Energy Magazine, 16(1), 57-66.

MOURA. **Baterias Energy Storage System (BESS)**. Disponível em: <<https://www.moura.com.br/bess/>>. Acesso em: 10 fev. 2023.

NREL. 2017. **O REopt verifica o projeto do sistema fotovoltaico e da bateria em um site de comunicações da ICE em Porto Rico**. Disponível em: <<https://www.nrel.gov/reopt/projects/case-study-ice-puerto-rico.html>>. Acesso em: 27 mai. 2024.

NREL. 2024. **"REopt Resultados da Avaliação Financeira de Mossoró, RN, Brasil"**. Ferramenta Web REopt. Disponível em: <<https://reopt.nrel.gov/tool>>. Acesso em: 02 de mai. de 2024.

OLIVEIRA, L. B.; PEREIRA JR., A. O. **Potencial de armazenamento de energia elétrica no Brasil**. Revista Brasileira de Energia, v. 18, n. 1, p. 7-26, 2012.

PUCCINI, ERNESTO COUTINHO. **Matemática financeira e análise de investimentos**. Florianópolis: CAPES, 2011. 204 p.

QIAN, XIANG; HUANG, YULONG; LI, HUI; et al. **A review of flywheel energy storage system technologies and their applications**. Applied Sciences, v. 7, n. 3, p. 233, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app7030286>. Acesso em: 02 mar. 2023.

ROSS, S. A., WESTERFIELD, R. W. e JAFFE, J. F. **Administração Financeira: Corporate Finance**. 11ª ed. São Paulo: Atlas, 2015.

SAFARIAN, S., ASIF, M., & QU, X. (2021). **Uma revisão sobre os recentes avanços nas tecnologias de baterias de íons de lítio e suas aplicações.** *Jornal de Armazenamento de Energia*, 41, 102912.

SAHA, T. K., ISLAM, S. M. R., & BALA, B. K. (2015). **An assessment of energy and economic potential of grid-connected photovoltaic systems for Bangladesh.** *Energy for Sustainable Development*, 25, 31-42.

SANTERNO S.p.A. (17 de October de 2011). **Global Energy World.** Disponível em: <http://www.globalenergyworld.com/news/2137/innovative_energy_storage_solutions_by_santerno_and_fiamm.htm>. Acesso em: 02 out. 2023.

SATHIAMOORTHY, D., SWEET, C., & WOOD, L. (2016). **Battery energy storage systems: assessment of the application and market potential in New Zealand.** *Renewable Energy*, 91, 210-217.

SHEN, J., YUAN, Y., SONG, H., LIU, D., & WANG, J. (2020). **Feasibility study of battery energy storage system providing backup power supply for hospitals during blackouts.** *Energy Procedia*, 158, 1915-1920.

SILVA, J. (2023). **Energia solar: uma fonte renovável em ascensão.** *Revista de Energia Sustentável*, 15(2), 45-52.

SILVA, RUTELLY MARQUES DA. **Energia Solar no Brasil: dos incentivos aos desafios.** Brasília: Núcleo de Estudos e Pesquisas/CONLEG/Senado, fevereiro/2015 (Texto para Discussão nº 166). Disponível em: www.senado.leg.br/estudos. Acesso em: 28 mai. 2024.

SILVA, SUZANA MOREIRA. **Energia Solar Fotovoltaica: evolução e perspectivas no Brasil.** Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2016.

SILVA, Y. F. F. C. E; BORTONI, E. C. **Sistemas de armazenamento de energia elétrica em redes inteligentes: características, oportunidades e barreiras.** *Revista Brasileira de Energia*, v. 22, n. 1, p. 48–73, 2016.

SISKEL, KATE (2018). **CONVERGENT ENERGY + POWER ACQUIRES 40 MW OF FLYWHEEL PROJECTS.** Disponível em: <<https://beaconpower.com/wp-content/uploads/2018/05/Convergent-Energy-Power-Acquires-40-MW-of-Flywheel-Projects-%E2%80%93-Convergent-Energy-Power.pdf>>. Acesso em: 02 dez. 2023.

- SOLAR, CANAL. (2021). **Sistemas híbridos integrando energia solar e diesel**. Disponível em: <<https://canalsolar.com.br/sistemas-hibridos-solar-diesel/>>. Acesso em 26 mai. 2024.
- SOLOVEV, ANDREY (2021). **BESS**: Uma solução para gerenciar energia proativamente. Disponível em: <<https://www.digikey.com.br/pt/articles/bess-a-solution-to-manage-energy-proactively>>. Acesso em: 28 mai. 2024.
- SOUZA, R. A. et al. (2018). **Análise de viabilidade econômico-financeira de projetos de investimento**: um estudo de caso em uma empresa de tecnologia. *Revista de Administração e Contabilidade*, 10(1), 23-42.
- TOLMASQUIM, M. T. **Fontes renováveis de energia no Brasil**. Rio de Janeiro: Interciência, 2003. 516 p.
- TORRES-FLORES, L. (2011). **Energía solar fotovoltaica**: manual práctico de diseño, dimensionado y montaje de instalaciones solares fotovoltaicas. Editex.
- VARGAS, LEONARDO; VALENTE, LUIZ GUILHERME; OLIVEIRA, WAGNER ALVES DE (2019). **Energy storage systems for integration of renewable energy in microgrids**: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 101, p. 786-797, 2019.
- VERMA, D.; MIDTGARD, O.-M.; SATRE, T. O. **Review of photovoltaic status in a European (EU) perspective**. In: 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC). p. 3292-3297, 2011.
- WANG, L., XU, M., & CHENG, S. (2019). **A review of battery life cycle management for large-scale stationary energy storage systems**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 112, 781-792.
- WANG, Y., ZHANG, L., HOU, H., XU, W., DUAN, G., He, S., LIU, K., & JIANG, S. (2020). **Recent progress in carbon-based materials for supercapacitor electrodes**: a review. *Journal of Materials Science*, 56, 173-200.
- XING, Y., MA, E. W., TSUI, K. L., & PECHT, M. (2011). **Battery management systems in electric and hybrid vehicles**. *Energies*, 1840-1857.
- ZHANG, C., ZHANG, L., & GU, Y. (2018). **Battery energy storage system**: a distributed energy resource for alleviating distribution network congestions. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 9(1), 115-125.

ZHANG, J., LI, Q., LIU, Z., LI, B., & XU, Q. (2018). **Research on energy storage performance of supercapacitor in fuel cell vehicles.** Journal of Power Sources, 399, 115-121.

ZHANG, Z., WANG, Z., ZENG, Y., & CHEN, Z. (2018). **Sustainable energy storage: Challenges and progress.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, 82, 4179-4193. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.030>

ZHONG, L., HU, Y., ZHANG, X., PENG, L., & SHI, L. (2017). **A hybrid solar power system with supercapacitor storage for the DC power supply of remote BTS.** Journal of Energy Storage, 12, 192-201.