

Otimização da operação do sistema de armazenamento por baterias para usina solar Padre Furusawa

Optimization of the battery storage system operation for the Padre Furusawa solar power plant

Bruna de Almeida Fernandes¹, Christian Jeremi Rodriguez Coronado², Eduardo Crestana Guardia³

1 - Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI. E-mail: brunaalmeida@unifei.edu.br

2 - Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI. E-mail: christian@unifei.edu.br

3 - Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI. E-mail: eduardo.guardia@unifei.edu.br

Resumo: O estudo proposto neste artigo tem como objetivo, o desenvolvimento de um programa de otimização com a finalidade de calcular a profundidade de descarga ideal para as baterias do sistema de armazenamento, que será implementado na Usina Solar Padre Furusawa. Baseado em otimização não linear e não inteira, o programa busca maximizar o Valor Presente Líquido (VPL) do projeto, considerando a vida útil das baterias e seu impacto financeiro no investimento. Os resultados obtidos com o sistema de otimização, validam a eficácia do método proposto, identificando uma profundidade de descarga ideal de 96,58%, que resulta em um VPL de R\$539.802,21 e uma Taxa Interna de Retorno (TIR) de 13%. A estratégia adotada apresentou melhorias significativas no desempenho e na rentabilidade do sistema de armazenamento, confirmando a importância da otimização dos parâmetros de operação, para projetos de usinas solares fotovoltaicas. Com a implementação da profundidade de descarga otimizada, obteve-se um ganho de 4,61% no VPL, reforçando assim a viabilidade e o impacto positivo da abordagem proposta.

Palavras-chave: Sistema fotovoltaico. Energia renovável. Armazenamento de energia. Profundidade de descarga.

Abstract: The proposed study in this article aims to develop an optimization program to calculate the ideal depth of discharge for the batteries in the storage system, which will be implemented in the Padre Furusawa Solar Plant. Based on non-linear and non-integer optimization, the program seeks to maximize the Net Present Value (NPV) of the project, considering the battery's lifespan and its financial impact on the investment. The results obtained with the optimization system validate the effectiveness of the proposed method, identifying an optimal depth of discharge of 96.58%, resulting in an NPV of R\$539,802.21 and an Internal Rate of Return (IRR) of 13%. The adopted strategy showed significant improvements in the performance and profitability of the storage system, confirming the importance of optimizing operational parameters for photovoltaic solar projects. With the implementation of the optimized depth of discharge, there was a 4.61% gain in NPV, reinforcing the feasibility and positive impact of the proposed approach.

Keywords: Photovoltaic system. Renewable energy. Energy storage. Depth of discharge.

Introdução

De acordo com o relatório da Agência Internacional de Energia (IEA, 2023) de julho de 2023, tem-se observado um crescimento contínuo da demanda global de energia, com um acréscimo de 2,3% em 2022, e projeções de 2% para 2023 e 3,3% para 2024 (IEA, 2023). Esse aumento da demanda tem sido acompanhado predominantemente pelo uso de fontes tradicionais de geração de energia, tais como combustíveis fósseis. Essas fontes têm sido associadas à emissão de poluentes, contribuindo com a degradação do meio ambiente, o agravamento do efeito estufa e o fenômeno do aquecimento global. Diante deste cenário, tem crescido a busca por alternativas geração de energia sustentáveis, renováveis e limpas, como é o caso da energia solar (Si et al., 2022).

Com a popularização do uso da energia fotovoltaica, diversas estratégias têm sido adotadas com objetivo de potencializar seus benefícios, como por exemplo, o uso dos sistemas de armazenamento por baterias. Através de sua implementação é possível realizar o armazenamento do excedente da energia gerada, quando a produção supera o consumo, conferindo uma maior versatilidade aos sistemas fotovoltaicos. No entanto, para otimizar seu desempenho, é fundamental realizar o dimensionamento adequado do sistema de armazenamento,

levando em consideração a correta definição de seus critérios de operação.

A determinação precisa dos parâmetros da bateria têm impacto direto na preservação de sua vida útil (Assis et al., 2022). Portanto, o dimensionamento do sistema deve contemplar informações sobre as características, os parâmetros e as condições de operação das baterias, visando garantir sua longevidade. Tal como a definição de sua profundidade de descarga, onde a escolha de um valor muito baixo impacta diretamente na capacidade de armazenamento do banco, enquanto um valor muito alto influencia no número de ciclos de carga e descarga. Portanto, o cálculo assertivo deste parâmetro determinará a vida útil da bateria, que por sua vez representa uma parcela expressiva do valor investido no sistema. Sendo assim, ao considerar a relação entre a definição da profundidade de descarga e o impacto no retorno financeiro do investimento, é possível utilizar a bateria de forma mais otimizada.

Neste cenário, estudos recentes têm ressaltado a importância de se considerar as informações da bateria, a fim de prolongar sua vida útil e de otimizar o uso dos sistemas de armazenamento. Nesse contexto, Liu et al. (2023) propõe uma abordagem baseada em um modelo de programação linear unidimensional para

analisar a degradação de baterias empregadas no armazenamento de energia.

Diversas pesquisas no segmento de veículos elétricos também têm explorado o impacto da definição da profundidade de descarga da bateria, no seu desempenho. De acordo com Li et al. (2021), a substituição dos veículos tradicionais com motores a combustão, por carros elétricos, é uma alternativa que favorece a sustentabilidade ambiental. No entanto, o custo do envelhecimento da bateria tem sido apontado como o principal obstáculo para a disseminação do uso de veículos elétricos. Desta forma, com o objetivo de otimizar os retornos financeiros, o autor propõe uma estratégia de gerenciamento de energia que visa reduzir simultaneamente o consumo de energia e o custo de degradação da bateria no veículo.

Já Xie et al. (2019) enfatiza a importância de desenvolver uma estratégia de gerenciamento de energia eficiente para os veículos elétricos, que seja capaz de coordenar a distribuição de potência entre diferentes fontes de energia. O autor propõe uma estratégia de gerenciamento baseada na profundidade de descarga ideal da bateria e utiliza o controle preditivo para otimizar o desempenho do sistema. De forma similar, Xie et al. (2020) aborda a otimização do tamanho da bateria e o gerenciamento de energia em veículos

elétricos, levando em consideração o impacto da profundidade de descarga na degradação da bateria. Através da aplicação de programação convexa, o método proposto identifica a profundidade de descarga ideal, analisando a curva de custo total em relação ao estado de carga final.

Já Zhou et al. (2023) destaca a importância da integração das fontes de energia renováveis, dos sistemas de armazenamento e dos veículos elétricos, como uma forma de promover o desenvolvimento sustentável. Neste contexto, o autor propõe uma solução para a integração dessas estratégias por meio de um sistema de otimização desenvolvido através do método de Amostragem por Hipercubo Latino. O método proposto gera uma variedade de cenários, levando em consideração a incerteza relacionada à energia renovável e à demanda de carga.

Em seu estudo, Hlal et al. (2019) propõe uma nova abordagem de dimensionamento otimizado para sistemas fotovoltaicos com armazenamento por baterias, com foco em áreas isoladas. O autor emprega a técnica de modelos de fluxo de energia, considerando variáveis como irradiação solar, temperatura ambiente e demanda de carga, para identificar a combinação ideal entre a energia solar e a capacidade das baterias,

com o intuito de maximizar a confiabilidade e reduzir os custos do sistema.

Há evidências crescentes na literatura recente que tem enfatizado a importância de se projetar sistemas de maneira eficiente. No estudo realizado por Emad, El-Hameed e El-Fergany (2021), foi proposto o dimensionamento otimizado de um sistema híbrido, que integra energia solar fotovoltaica, energia eólica e armazenamento por baterias, visando sua aplicação em áreas remotas do Egito. O sistema proposto tem como principal objetivo atender a demanda de carga, minimizando o custo da energia em diferentes cenários de probabilidade de perda de fornecimento. Para isso, os autores propõem um modelo matemático que utiliza o método Otimizador do Lobo Cinzento, a fim de definir o dimensionamento ideal dos painéis solares, das turbinas eólicas e das baterias, buscando alcançar a solução com o menor custo possível.

De forma similar, Swathika et al. (2023) propõe um método destinado a analisar a viabilidade da implementação de usinas fotovoltaicas em telhados, em conjunto com sistemas de armazenamento de energia por baterias, no contexto específico do Sri Lanka. O principal objetivo do método consiste em identificar a solução energética mais adequada aos consumidores, considerando fatores como o

esquema tarifário, a localização e a área disponível no telhado.

Os sistemas de otimização têm sido amplamente empregados para aprimorar o desempenho de sistemas fotovoltaicos (Veliz et al., 2022). Neste contexto, o objetivo deste artigo é propor um método otimizado para o dimensionamento do sistema de armazenamento a ser implementado na Usina Solar Padre Furusawa, com a finalidade de definir a profundidade de descarga ótima que maximize o retorno financeiro do investimento. Através do desenvolvimento do método de otimização proposto, este artigo busca aprimorar a eficiência e o desempenho dos sistemas de armazenamento, evidenciando informações essenciais que contribuem para a melhoria da viabilidade desses sistemas. O estudo apresentado neste artigo trará contribuições relevantes sobre a definição dos parâmetros de operação das baterias e suas implicações técnicas e econômicas. Esta contribuição será alcançada por meio da correlação de duas variáveis até então não diretamente relacionadas na literatura – o VPL e a profundidade de descarga - resultando na formulação de hipóteses que possam orientar futuras pesquisas. Além disso, os resultados obtidos poderão embasar a tomada de decisão em projetos de usinas solares, contribuindo para o

desenvolvimento de políticas públicas voltadas à promoção das energias renováveis. Utilizando os dados coletados da usina em operação, será possível dimensionar o sistema com base em informações reais de consumo. Tais contribuições são de grande relevância para o setor de energias renováveis, tendo o potencial para impulsionar o avanço tecnológico e científico nessa área.

Material e Métodos

Apresentação do local de estudo

O sistema de armazenamento proposto neste artigo, será implementado em conjunto com a Usina Fotovoltaica Padre Furusawa, que é o local de estudo desta pesquisa. A energia gerada pela usina beneficia quatro centros de aprendizagem da Rede Jesuíta de Educação, localizados no estado de Minas Gerais. Os créditos de geração são compartilhados entre a Escola Técnica de Eletrônica “Francisco Moreira da Costa” (ETE “FMC”) em Santa Rita do Sapucaí, o Colégio Loyola em Belo Horizonte, o Centro de Educação Infantil Nhá Chica em Montes Claros e o Colégio Jesuítas em Juiz de Fora.

A usina foi construída no campus da ETE "FMC", situado em Santa Rita do Sapucaí, com latitude de 22° 14' 60" sul e longitude de 45° 43' 11" oeste, ocupando

uma área de aproximadamente 15 mil m². Em sua implantação, foram utilizados um total de 4.200 painéis de 265 Wp cada, resultando em uma potência instalada de 1,113 MWp. Esses painéis foram posicionados com orientação para o norte geográfico e inclinação de 25°. Para a conversão da energia gerada pelos módulos fotovoltaicos, foram instalados 15 inversores com potência de 60 kWp cada. A Figura 1 apresenta a geração total nos últimos anos.

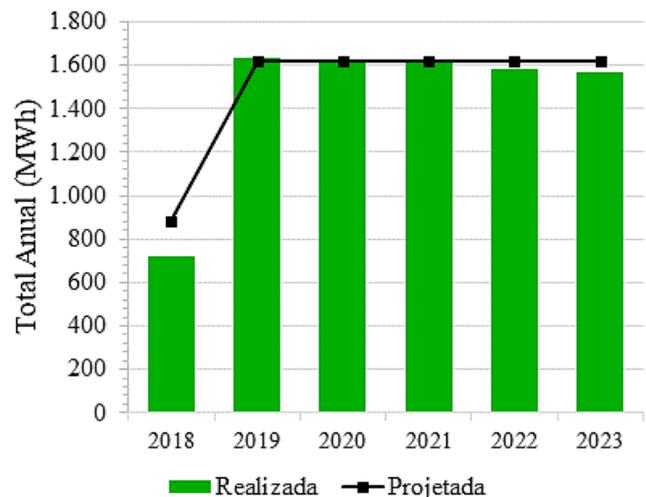


Figura 1 - Geração anual da Usina Solar Padre Furusawa

A usina está conectada à rede elétrica de distribuição da Cemig, sendo enquadrada na Classe Comercial, subgrupo A4, com tensão primária de 13,8 kV. A unidade consumidora é classificada na modalidade horosazonal verde, sendo a fatura composta pela parcela de energia no horário de ponta (HP) e horário fora de ponta (HFP), além da demanda contratada. A demanda de potência ativa contratada pela ETE "FMC"

é de 900 kW, correspondente à potência instalada da usina, fornecida pelos inversores. O valor da potência ativa consumida é de 70 kW.

Sistema de armazenamento por baterias

Os sistemas de armazenamento de energia vêm sendo utilizado em diversas aplicações, tornando-se uma tendência global. Seu conjunto de baterias armazena uma parcela da energia durante o período em que há geração excedente, sendo posteriormente descarregada para suprir à demanda em momentos oportunos. Uma das principais aplicações do sistema de armazenamento é a arbitragem de energia, que consiste em armazenar energia durante períodos de tarifas reduzidas (hora fora ponta - HFP) para ser consumida nos horários de tarifas mais elevadas (hora ponta - HP). Em síntese, o sistema aproveita as flutuações de preços ao longo do dia, resultando em economia na fatura de energia elétrica. Portanto, quanto maior for a diferença entre as tarifas por período, mais atrativa será a solução e maior será a economia obtida.

Este artigo propõe a implementação de um sistema de armazenamento por baterias na Usina Solar Padre Furusawa, com o objetivo de viabilizar a arbitragem da tarifa de energia, através da gestão do horário de consumo. Com a instalação desse sistema,

pretende-se reduzir o consumo durante o período de ponta (HP), resultando em economia na fatura de energia. A solução foi dimensionada para compensar o consumo da ETE "FMC", que é a unidade consumidora vinculada a usina. A Figura 2 demonstra o consumo HP e HFP, da ETE "FMC".

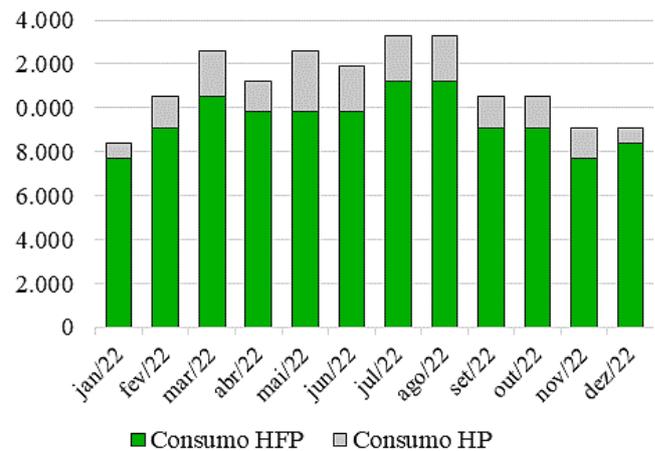


Figura 2 - Parcela de consumo HP e HFP no ano de 2022

Através da análise da Figura 2, observa-se que o consumo durante o período HP corresponde a aproximadamente 20% do consumo total, variando entre 2000 e 3000 kWh/mês. Neste contexto, a implementação do sistema proposto tem como objetivo reduzir o consumo de energia proveniente da rede elétrica durante esse período, utilizando o sistema de armazenamento para realizar a arbitragem da tarifa de energia.

Desta forma, o banco de baterias foi projetado para atender a demanda de 3000 kWh/mês, correspondente ao valor máximo

de consumo em horário de ponta da ETE" FMC", ao longo de um mês. O valor do consumo HP por dia ($C_{TOTAL\ DIA}$) é obtido através da divisão do consumo total mensal ($C_{TOTAL\ MÊS}$), pela quantidade de dias úteis do mês, conforme apresenta a equação (1). Considerando uma média de 21 dias úteis por mês, o resultado do $C_{TOTAL\ DIA}$ é de 142,86 kWh/dia.

$$C_{TOTAL\ DIA} = \frac{C_{TOTAL\ MÊS}}{\text{dias uteis}} \quad (1)$$

Com base no resultado obtido, a energia armazenada (E_A) pode ser determinada por meio da equação (2), que leva em consideração o consumo diário em HP ($C_{TOTAL\ DIA}$), o número de dias de autonomia (N_A), o fator de correção da bateria (f_c), a profundidade de descarga (P_D) e a eficiência da bateria (R_E) (Baloyi, Chowdhury, 2021).

$$E_A = \frac{C_{TOTAL\ DIA} \times N_A \times f_c}{P_D \times R_E} \quad (2)$$

A profundidade de descarga da bateria, é um parâmetro que indica sua porcentagem de descarregamento em relação à sua capacidade total. Esse parâmetro está diretamente relacionado à vida útil da bateria, pois quanto maior for a descarga, menor será sua durabilidade. Por outro lado, a eficiência da bateria, também conhecida como Roundtrip Efficiency (R_E) é um indicador que estabelece a relação entre a energia armazenada durante os ciclos de

recarga e a energia fornecida pela bateria (Cantú, 2022).

O fator de correção da bateria (f_c) pode ser calculado pela equação (3). Segundo Tsewg (2008) e Fathima e Palanisamy (2015), alguns parâmetros devem ser levados em consideração para que o dimensionamento da bateria seja condizente ao cenário real. À medida que a bateria se aproxima do término de sua vida útil, ela passa por um processo de degradação que impacta diretamente em seu desempenho, sendo este parâmetro denominado fator de envelhecimento da bateria (f_e). Outro parâmetro relevante no dimensionamento é o fator de temperatura da bateria (f_{temp}), que influencia diretamente em sua longevidade. O fabricante estabelece o desempenho da bateria a uma temperatura de referência de 25°C. Portanto, a variação da temperatura de operação resulta em uma alteração na capacidade da bateria. Assim, considerando o fator de temperatura (f_{temp}) de 0,94 (32°C), e o fator de envelhecimento (f_e) de 1,15 o resultado do fator de correção é de 1,081 (Cantú, 2022; Baloyi, Chowdhury, 2021).

$$f_c = f_e \times f_{temp} \quad (3)$$

Análise de viabilidade econômica

A análise de viabilidade econômica de um sistema fotovoltaico é uma das etapas mais relevantes na tomada de decisão pelo

investimento. No entanto, a definição das premissas econômicas, impacta de maneira direta na confiabilidade dos resultados, tornando-os mais ou menos representativos do cenário real. Nesse sentido, diversos fatores técnicos e econômicos devem ser considerados, com o objetivo de garantir que os resultados da análise reproduzam, de forma precisa, a realidade do projeto. Algumas das variáveis definidas para análise econômica do sistema proposto, são apresentadas na tabela 1.

O crescimento anual do valor da tarifa de energia elétrica, impacta diretamente no cálculo da receita do investimento. Com base em dados históricos, estima-se que a variação dos preços da tarifa de energia seja de 2% a 6%, ao ano (SILVA, 2023). Para o desenvolvimento da análise econômica deste estudo, será considerado o valor de 6% ao ano, que mais se aproxima do reajuste médio da Cemig dos últimos dez anos (6,05% ¹) (CEMIG, 2022).

Tabela 1 - Premissas para Análise Econômica

Variável	Valor
Crescimento da tarifa	2 ~ 6 (% a. a.)
Perda de eficiência módulos	0,6 ~ 0,8 (% a. a.)
Degradação da bateria	3 e 0,5 (% a. a.)
Taxa Mínima de Atratividade	6,17%
Pagamento do investimento	Capital próprio
Regime tributário	Isento

Fonte: Elaboração própria

A perda de eficiência dos módulos devido à degradação ao longo dos anos de

operação da usina, também deve ser considerada na análise financeira. Para o primeiro ano de funcionamento do sistema, a perda, é em média, de 2%. Nos anos seguintes - até o fim da vida útil da usina - o valor varia de 0,6% a 0,8% ao ano. Portanto, a média definida para a perda de eficiência dos módulos é de 0,7% ao ano, sendo sua vida útil de 25 anos (Valerio, 2018). Da mesma forma, as perdas decorrentes da degradação das baterias que compõem o sistema de armazenamento, também devem ser consideradas. Durante o primeiro ano de operação do sistema, a perda é, em média, de 3%. Nos anos subsequentes, a perda é de 0,5% ao ano (Valerio, 2018). Os valores estipulados neste estudo podem variar de acordo com o fabricante, modelo, e as condições de operação da bateria.

O valor da Taxa Mínima de Atratividade (TMA) corresponde à taxa de retorno sobre o capital aplicado. Para que o investimento seja considerado atrativo, seu valor deve refletir o custo de oportunidade do capital próprio do investidor, ajustado ao risco do projeto. Considerando que o sistema proposto neste estudo é um empreendimento da Associação Nóbrega de Educação e Assistência Social (ANEAS) - uma instituição de direito privado sem fins

¹ O valor médio do reajuste da tarifa da Cemig de 2012 a 2022, é de 6,05%.

lucrativos, filantrópica, de natureza educativa, cultural, assistencial e beneficente - justifica-se a utilização da taxa de rendimento da poupança², que é de 6,17%³, como TMA.

Para o desenvolvimento desta análise econômica, também será considerada a utilização de capital próprio - sem financiamento - como forma de pagamento pelo investimento. Adicionalmente, em virtude da natureza filantrópica da instituição, justifica-se a isenção e a imunidade tributária. É importante ressaltar, que as premissas definidas neste estudo, devem ser reconsideradas para projetos financiados e nos casos que se enquadrem nos regimes tributários do Simples Nacional, Lucro Real e Lucro Presumido.

Por fim, o valor da tarifa de energia é uma variável crítica na análise de viabilidade econômica, de modo que quanto maior for a diferença entre valores HP e HFP, mais atrativo se torna o investimento. As tarifas HP e HFP apresentadas na Tabela 2, referem-se aos valores pagos pelos consumidores da Cemig pertencentes ao subgrupo A4, na modalidade horosazonal verde. O preço da tarifa varia conforme a bandeira tarifária vigente. No entanto, para a análise da viabilidade econômica do

sistema de armazenamento por baterias, deve-se considerar apenas a diferença entre as tarifas HP e HFP. Sendo assim, o valor definido será de R\$1,88374/ kWh para todas as bandeiras tarifárias (CEMIG, 2022).

O cálculo da receita do investimento no sistema de armazenamento é realizado considerando a diferença de valores entre as tarifas HP e HFP. Isso ocorre pois os sistemas fotovoltaicos geram energia predominantemente durante o posto tarifário HFP - quando as baterias são carregadas - e a energia armazenada é consumida posteriormente no período HP.

Tabela 2 - Valor das tarifas HP e HFP, com incidência de impostos

Bandeira Tarifária	HFP (R\$/kWh)	HP (R\$/kWh)	HP - HFP (R\$)
Verde	0,48560	2,36934	1,88374
Amarela	0,52713	2,41087	1,88374
Vermelha - patamar 1	0,57591	2,45965	1,88374
Vermelha - patamar 2	0,62169	2,50543	1,88374
Escassez hídrica	0,68289	2,56664	1,88374

Fonte: CEMIG

Desta forma, a receita é calculada em função da diferença entre as tarifas, uma vez que a energia gerada passa a ser armazenada ao invés de ser injetada na rede para geração créditos de consumo de HFP. Como resultado dessa compensação, há uma redução nos gastos relacionados à tarifa HP,

² O investimento na poupança é de renda fixa, e está atrelado a um baixo risco.

³ O rendimento de 6,17% refere-se à estimativa anual considerando o rendimento mensal fixo de 0,5%, sem o acréscimo da taxa referencial.

gerando economia para o consumidor. Assim, a receita do investimento pode ser calculada em função do consumo de energia durante o período HP por mês, multiplicado pela diferença entre as tarifas HP e HFP, conforme apresenta a equação (4).

$$\text{Receita} = \text{Consumo}_{\text{HP}} \times (\text{HP} - \text{HFP}) \quad (4)$$

Além disso, para calcular o valor da receita do investimento no sistema de armazenamento, também é necessário considerar o aumento da tarifa a cada ano ao longo dos 25 anos de vida útil da usina. As perdas nas placas e a degradação das baterias, também devem ser contabilizadas para se obter um cálculo mais preciso da receita total do investimento.

Desta forma, considerando as premissas definidas previamente, a Figura 3 apresenta os resultados da receita anual do investimento, ao longo da vida útil do sistema de armazenamento proposto.

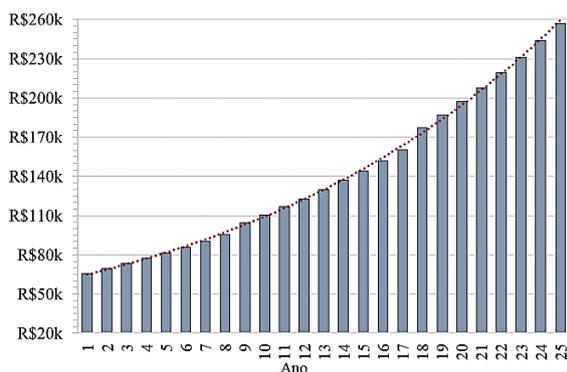


Figura 3 - Receita Anual do investimento

O CAPEX, ou Despesas de Capital, refere-se ao investimento destinado à aquisição e manutenção dos bens e ativos de

uma empresa. Para os empreendimentos fotovoltaicos, os gastos com CAPEX envolvem a construção da usina, incluindo a aquisição e instalação dos equipamentos, bem como a realização de serviços. Uma análise detalhada do CAPEX é essencial para avaliar com maior precisão o fluxo de caixa e o retorno do investimento ao longo do tempo. As principais premissas para o cálculo do CAPEX do sistema proposto neste estudo são apresentadas na Tabela 3.

Para determinar o valor do CAPEX inicial, foram consideradas as informações apresentadas no dimensionamento do sistema de armazenamento. O custo do investimento nas baterias foi calculado com base nos preços apresentados pela pesquisa de mercado realizada pela empresa Greener (2022). Os preços referem-se a estrutura de custo dos sistemas de armazenamento destinados a aplicações comerciais e industriais. Os valores foram obtidos através de pesquisa bibliográfica e coleta de informações com fornecedores de equipamentos. Com base nessas informações de custos e no tamanho do sistema dimensionado – para atender ao consumo de 142,86 kWh/dia – constatou-se que o valor do investimento inicial para implantação do sistema de armazenamento na ETE”FMC” será de R\$475.128,48 (Greener, 2022).

Ao longo dos anos de operação da usina, alguns equipamentos sofrem desgastes que comprometem o funcionamento do sistema. Por esta razão, ocasionalmente, torna-se necessário o reinvestimento para substituição de alguns dispositivos, como inversores e baterias. O valor aplicado ao RE-CAPEX do inversor é de aproximadamente 15% do CAPEX inicial (Greener, 2022).

Tabela 3 - Premissas para cálculo do CAPEX

Variável	Valor
CAPEX – Investimento inicial	R\$475.128,48
RE-CAPEX dos inversores (15% do CAPEX)	R\$71.269,27
RE-CAPEX das baterias (54% do CAPEX)	R\$256.569,38
Ano de troca do Inversor	10 anos
Ano de troca das Baterias ⁴	9 anos
Vida útil da planta	25 anos

Fonte: Elaboração própria

Assim, neste estudo, será aplicado o valor de R\$71.269,27 para instalação dos novos inversores, os quais serão substituídos a cada 10 anos de operação do sistema (Grenner, 2022). De maneira similar, as baterias estão sujeitas à degradação, que resultam em perdas no seu desempenho. Portanto, para assegurar que o sistema seja capaz de suprir a energia projetada, torna-se necessário a substituição

eventual das baterias. O valor aplicado ao RE-CAPEX das baterias é de aproximadamente 54% do CAPEX inicial (Greener, 2022). Desta forma, para este estudo, o valor aplicado será de R\$256.569,38. A substituição das baterias, pode ocorrer em média a cada 9 anos, desde que as condições de operação sejam respeitadas (Greener, 2022).

Portanto, é crucial assegurar que o sistema opere dentro dos limites estabelecidos, observando os parâmetros de recarregamento e a profundidade de descarga das baterias, garantindo assim a sua vida útil. Evitar a degradação precoce do equipamento assegura que o reinvestimento em baterias não ocorra antes do prazo pré-estabelecido na análise econômica.

Por fim, o OPEX, ou Despesas Operacionais, refere-se ao investimento gasto de forma recorrente na operação e a manutenção de um projeto ou empresa. Em um empreendimento fotovoltaico os gastos com OPEX incluem os custos com reparos e manutenção de equipamentos, limpeza dos painéis, segurança patrimonial, troca de dispositivos de proteção, visitas e inspeção na planta, dentre outras despesas de operação do sistema. Os custos de operação e manutenção tem influência direta na

⁴ Valor obtido considerando uma profundidade de descarga otimizada de 96,58%.

atratividade do sistema de armazenamento. Com base nos custos com operação e manutenção dos sistemas fotovoltaicos em operação no Brasil, estima-se que o valor do OPEX varie de 1% a 6% do CAPEX inicial (Silva, 2021). Para o estudo em questão será considerado o valor médio de 3% do CAPEX, correspondendo a um investimento anual de R\$14.253,85.

Sistema de otimização proposto

Ao longo dos anos de utilização, a capacidade de armazenamento das baterias diminui gradualmente, podendo resultar na redução do desempenho do sistema (Shahjalal et al. 2022). Nos casos em que a capacidade de energia armazenada não atende mais à demanda, torna-se necessária a substituição das baterias. No entanto, a durabilidade de sua vida útil influencia de forma expressiva nos custos e no desempenho do sistema de armazenamento. Portanto, preservar sua integridade tem um impacto técnico e econômico significativo.

Além do desgaste decorrente dos anos de utilização da bateria, alguns outros fatores também impactam diretamente sua capacidade de armazenamento de energia, podendo acelerar significativamente o seu processo de degradação. Assim, para assegurar um bom desempenho e durabilidade das baterias, é essencial considerar parâmetros como profundidade

de descarga, temperatura, ciclo de carga e descarga, condições de armazenamento, entre outros.

A profundidade de descarga refere-se à porcentagem de descarregamento da bateria em relação à sua capacidade de armazenamento, sendo um dos principais parâmetros que impactam na preservação de sua vida útil.

A

Figura 4 apresenta a curva de vida útil da bateria JH4 SR22 4P, do fabricante LG Chem, que foi utilizada no dimensionamento do sistema proposto neste artigo. Por meio de sua análise, é possível observar a correlação entre a profundidade de descarga e a quantidade de ciclos de carga e descarga da bateria.

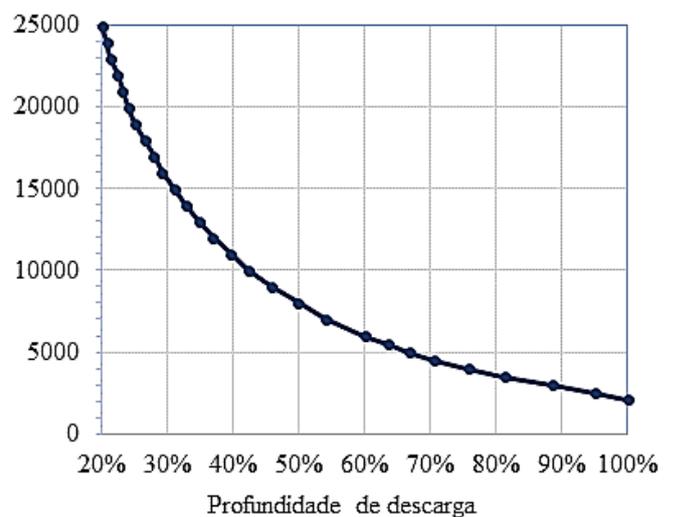


Figura 4 - Número de ciclos da bateria de acordo com a profundidade de descarga. Fonte: Adaptado do PVSyst - LG Chem

De modo geral, os fabricantes estimam a vida útil da bateria com base no número de ciclos de carga e descarga. Cada ciclo

envolve a recarga completa seguida pela descarga da energia armazenada, resultando em um desgaste gradual dos componentes internos e na degradação progressiva da capacidade de armazenamento de energia. O número de ciclos suportados pode variar conforme as condições de uso e parâmetros operacionais estabelecidos. A profundidade de descarga está diretamente relacionada ao número total de ciclos e, conseqüentemente, à vida útil da bateria.

Desta forma, através do ajuste da curva de vida útil fornecida pelo fabricante, é possível estabelecer a equação que relaciona a profundidade de descarga ao número de ciclos da bateria. A correlação entre estas variáveis, pode ser calculada através da equação (5), que foi obtida por meio da aplicação do método de regressão polinomial. Nessa equação, a variável y representa o número de ciclos de carga e descarga, e x representa a profundidade de descarga da bateria.

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 x^2 + \beta_3 x^3 + \beta_4 x^4 \quad (5)$$

Sendo os coeficientes:

$$\begin{aligned} \beta_0 &= 60611 \\ \beta_1 &= -265491 \\ \beta_2 &= 507415 \\ \beta_3 &= -451137 \\ \beta_4 &= 150629 \end{aligned} \quad (6)$$

A vida útil da bateria ($V_{\text{útil}}$), em anos, é determinada pela equação (7). Sendo

resultado da divisão do número de ciclos de carga e descarga (y), pela quantidade de dias de uso da bateria (N_D), durante o período de um ano.

$$V_{\text{útil}} = \frac{y}{N_D} \quad (7)$$

Tendo em vista que a utilização da bateria visa atender à demanda nos horários de ponta, que ocorrem durante os dias úteis, e considerando que o banco realizará um ciclo de carga e descarga por dia, o valor de N_D será de 252 dias, correspondendo à quantidade média de dias úteis ao longo de um ano.

De formar complementar, a Figura 5 estabelece a relação entre a definição da profundidade de descarga e seus possíveis impactos para o sistema. A escolha de uma profundidade de descarga mais alta, implica em uma redução nos ciclos suportados, resultando na diminuição de sua vida útil. Portanto, descarregar a bateria abaixo dos limites estabelecidos pelo fabricante pode acelerar seu processo de degradação, diminuindo sua vida útil.

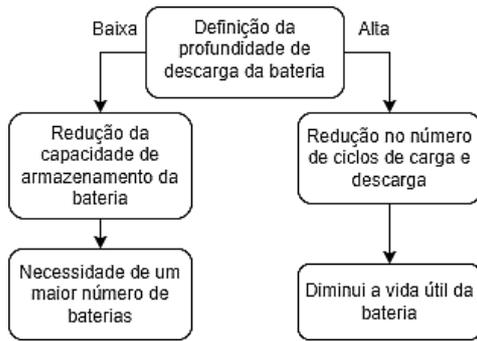


Figura 5 - Impactos da definição da profundidade de descarga

Por outro lado, ao optar por uma profundidade de descarga mais conservadora, limita-se a quantidade de energia disponível em cada ciclo de carga e descarga da bateria, resultando na utilização de apenas uma parcela de sua capacidade total de armazenamento. Isso implica na necessidade de adicionar um maior número de baterias para atender à demanda energética e compensar a restrição na capacidade de armazenamento. Essa condição afeta diretamente a viabilidade econômica do projeto, uma vez que o aumento no número de baterias tem um impacto significativo nos custos do sistema.

Portanto, é essencial que a definição da profundidade de descarga seja feita de maneira otimizada, assegurando que o valor estabelecido seja adequado para promover uma maior durabilidade da vida útil das baterias e uma menor restrição de capacidade das mesmas.

De forma geral, a Figura 6 ilustra a relação entre a definição da profundidade de

descarga da bateria e os indicadores financeiros: Taxa Interna de Retorno (TIR) e Valor Presente Líquido (VPL).

A escolha da profundidade de descarga tem um impacto direto no tamanho do banco de baterias, podendo aumentar ou diminuir sua capacidade de armazenamento. Consequentemente, a variação no tamanho do banco influenciará no valor do investimento inicial do sistema, sendo que uma maior capacidade implicará em um custo mais elevado.

Além disso, a escolha da profundidade de descarga também afetará o número de ciclos de carga e descarga, podendo aumentar ou reduzir a vida útil das baterias. Tanto o investimento inicial quanto a durabilidade da vida útil das baterias influenciam diretamente nos custos do CAPEX, RECAPEX e OPEX.

Por fim, a combinação de todos esses fatores resulta em variações no fluxo de caixa do projeto, alterando assim os valores obtidos para os indicadores TIR e VPL.

Diante disso, o programa de otimização proposto tem como objetivo determinar a profundidade de descarga ideal, que maximize os retornos financeiros do investimento. Assim, busca-se garantir que a profundidade escolhida não seja tão elevada, evitando a necessidade frequente de substituição das baterias, e nem muito baixa, exigindo o uso de um maior número

de baterias para suprir à demanda necessária.

Os programas de otimização são ferramentas computacionais, que visam encontrar soluções ótimas para problemas variados, utilizando metodologias como programação linear, meta-heurística e algoritmos genéticos. Para este estudo, optou-se pela utilização de um programa de otimização com objetivo único de maximizar o VPL do projeto, considerando as restrições estabelecidas. A variável de decisão para a otimização do VPL é a profundidade de descarga da bateria, permitindo ao programa determinar o valor ideal dessa variável com base na estimativa de vida útil da bateria e seu impacto no retorno financeiro do projeto.

O programa de otimização proposto é categorizado como não linear devido à natureza da variável de restrição TIR, que não pode ser expressa por uma relação linear simples. O programa também é classificado como não inteiro, conferindo maior flexibilidade na busca pela solução ótima, especialmente em problemas que envolvem variáveis contínuas, como a profundidade de descarga da bateria, permitindo resultados mais precisos e adaptados às condições específicas do sistema. Por meio da análise do indicador financeiro VPL, torna-se viável a comparação entre distintos projetos ou

cenários, com a escolha da alternativa que apresenta o maior valor, indicando, desse modo, a opção mais lucrativa e rentável. A função objetivo do programa de otimização é apresentada na equação (8).

$$\text{Maximizar: } f(x) = \text{VPL}(x) \quad (8)$$

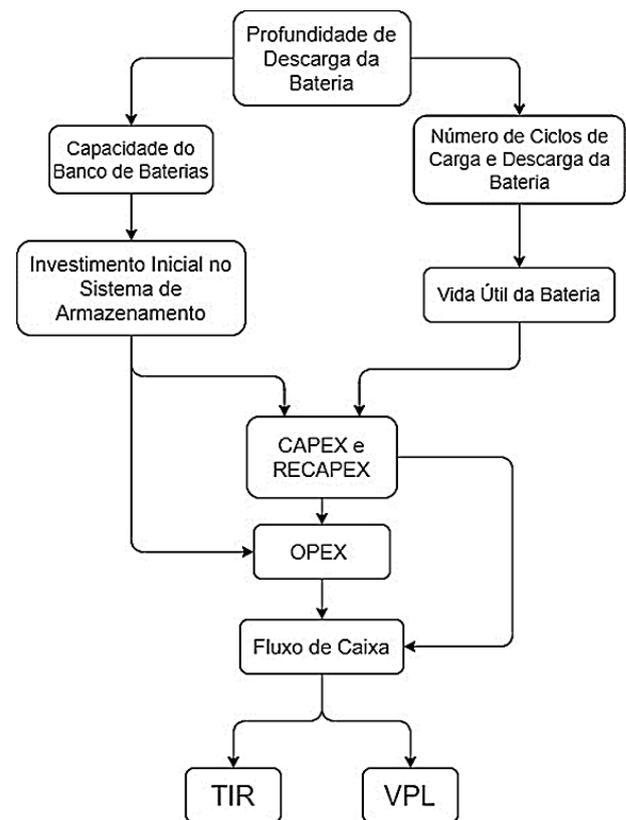


Figura 6 - Relação entre a profundidade de descarga da bateria e os indicadores financeiros TIR e VPL

O VPL pode ser calculado através da equação (9), onde $FC(x)_t$ é o fluxo de caixa para um período de 25 anos, e TMA é a taxa mínima de atratividade.

$$\text{VPL}(x) = \sum_{t=0}^{25} \frac{FC(x)_t}{(1 + \text{TMA})^t} \quad (9)$$

A otimização da função objetivo é realizada com base na variável de decisão

determinada - profundidade de descarga - conforme demonstrado na equação (10). Em virtude da classificação como programa de otimização não inteira, os valores obtidos para a profundidade de descarga são contínuos, pertencentes ao conjunto dos números reais

$$x = P_D \quad \text{onde } P_D \in \mathbb{R} \quad (10)$$

Por fim, as restrições para a resolução do problema de otimização são apresentadas na equação (11). Essas restrições impõem que a solução deve considerar que a TIR seja maior que a TMA e que a profundidade de descarga esteja compreendida entre 0% e 100%. Tais restrições são definidas para garantir que o projeto seja viável e atenda aos critérios de retorno financeiro estabelecidos. A TIR maior que a TMA assegura a atratividade financeira do projeto, enquanto a limitação da profundidade de descarga evita a sobrecarga ou subutilização do sistema de armazenamento. Ao considerar essas restrições, o programa de otimização busca identificar o valor da profundidade de descarga que maximize o VPL e atenda às condições específicas do projeto, garantindo sua viabilidade econômica.

$$\begin{aligned} \text{Sujeito a:} \quad & TIR \geq TMA \\ & P_D > 0\% \\ & P_D \leq 100\% \end{aligned} \quad (11)$$

Resultados e Discussão

Após a definição das premissas do problema de otimização, que incluem a função objetivo, a variável de decisão e as restrições, o programa foi implementado por meio do Solver GRG Não Linear do Excel - uma ferramenta amplamente utilizada para otimização não linear de variáveis contínuas. Esse método, baseado no Gradiente Reduzido Generalizado (GRG), é adequado para resolução de problemas complexos, sendo apropriado para o programa desenvolvido neste estudo, que busca maximizar o VPL em relação à profundidade de descarga.

Como resultado da implementação do programa proposto, foi possível encontrar a profundidade de descarga ótima, que alcançou o valor de 96,58%. Nessa configuração, o valor obtido para o VPL foi de R\$539.802,21, enquanto a TIR foi de 13%.

A Figura 7 apresenta os resultados obtidos para o VPL em diferentes profundidades de descarga. A partir da análise do gráfico, torna-se evidente o impacto da definição da profundidade de descarga no desempenho econômico do projeto. A Figura 7 demonstra que, à medida que aumentamos a profundidade de descarga da bateria, o valor do VPL também aumenta.

A análise do gráfico revela dois pontos de inflexão, indicando reduções no valor do VPL nas profundidades de descarga de 84,77% e 96,58%. Isso se deve ao fato de que, para profundidades de descarga de até 84,77%, o tempo de vida útil da bateria é estimado em 13 anos, resultando em apenas uma substituição ao longo dos 25 anos de operação da planta e um VPL de R\$527.746,29. Por outro lado, para profundidades de descarga entre 84,78% e 96,57%, a substituição das baterias deve ocorrer em até 12 anos. Já para a profundidade de descarga otimizada de 96,58%, é necessária uma substituição a cada 9 anos, totalizando duas trocas durante a vida útil da planta, e resultando no VPL máximo de R\$539.802,21. Por fim, para valores acima da profundidade de descarga ótima, são requeridas substituições a cada 8 anos, totalizando três trocas ao longo dos 25 anos de operação do sistema. Portanto, conclui-se que o ponto de máximo VPL do gráfico, ocorre em 96,58%, assegurando, dessa forma, a melhor relação entre a profundidade de descarga e a vida útil da bateria.

Dessa maneira, destaca-se a importância de uma seleção criteriosa da profundidade de descarga para otimizar o retorno financeiro do sistema de armazenamento. A escolha da profundidade, neste contexto, resultou em

um VPL maximizado, representando uma vantagem significativa para a viabilidade econômica do projeto.

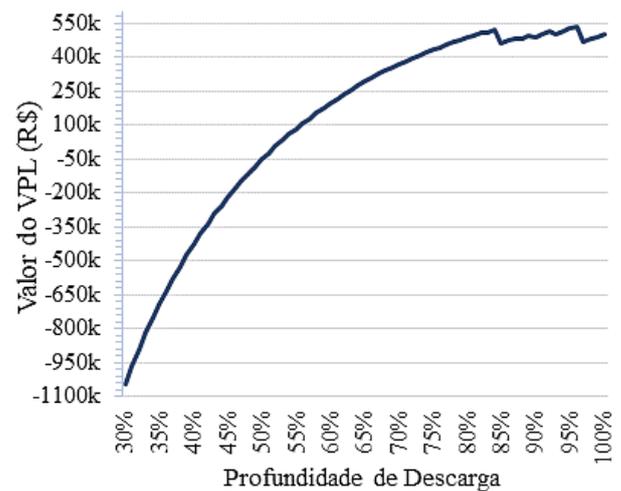


Figura 7 - Valores obtidos para o VPL em diferentes profundidades de descarga

De forma complementar, a Tabela 4 apresenta os resultados dos principais indicadores da análise econômica, obtidos com base nas premissas estabelecidas previamente. A implantação do sistema de armazenamento para compensação integral do consumo hora ponta da ETE" FMC" resultará em uma economia mensal de R\$5.651,22, totalizando R\$67.814,64 por ano. Esses valores correspondem à economia obtida durante o primeiro ano de operação do sistema. Em virtude do crescimento anual da tarifa de energia, há uma perspectiva de aumento na receita para os próximos anos. O resultado obtido para a TIR foi de 13%, sendo superior aos 6,17% da TMA, comprovando que o investimento

no projeto é vantajoso. Por fim, o valor obtido para o VPL foi de R\$539.802,21, confirmando assim a viabilidade do projeto proposto.

Tabela 4 - Resultado dos principais indicadores da análise econômica

Indicador	Resultado
Economia Mensal com HP	R\$5.651,22
Economia Anual com HP	R\$67.814,64
TIR	13%
VPL	R\$539.802,21

Fonte: Elaboração própria

A Figura 8 apresenta o diagrama do fluxo de caixa do sistema proposto, considerando os resultados obtidos com profundidade de descarga otimizada de 96,58%. O gráfico demonstra as entradas e saídas de capital, ao longo da vida útil do projeto.

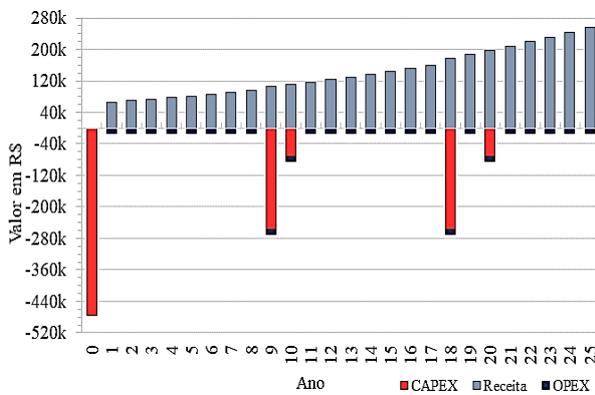


Figura 8 - Diagrama de fluxo de caixa do sistema proposto

A Figura 9 demonstra o fluxo de caixa acumulado ao longo da vida útil do sistema de armazenamento proposto. Observa-se que no 11º ano de operação, o fluxo de caixa acumulado torna-se positivo. A partir daí o projeto opera gerando economia para a unidade consumidora. A linha tracejada do

gráfico, representa a tendência de crescimento do valor total acumulado.

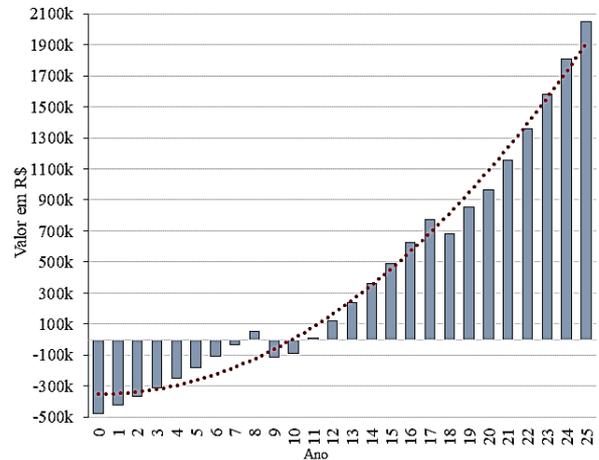


Figura 9 - Fluxo de caixa acumulado

Neste contexto, fica evidente que a profundidade de descarga é um dos principais parâmetros que influenciam a preservação da vida útil da bateria. Diante disso, um cuidado adequado com esse parâmetro é fundamental para evitar o desgaste acelerado da bateria, garantindo uma utilização eficiente do sistema de armazenamento ao longo dos anos. Ao selecionar a profundidade de descarga ótima, o programa de otimização proposto buscou conciliar o melhor desempenho econômico com a preservação da integridade das baterias, proporcionando vantagens significativas com a implantação do sistema.

Conclusão

Com o propósito de apresentar método de dimensionamento otimizado do sistema de armazenamento para a Usina Solar Padre Furusawa, realizou-se uma investigação sobre o impacto da profundidade de descarga das baterias na viabilidade econômica dos sistemas. O principal objetivo desta análise consistia em compreender de que maneira esse parâmetro influencia os indicadores financeiros do sistema, visando uma definição mais precisa e vantajosa dessa variável. O estudo proposto comprovou a importância da definição adequada da profundidade de descarga da bateria para preservar sua vida útil, o que reflete diretamente no retorno financeiro do sistema. Assim, por meio do desenvolvimento do método de otimização, foram estabelecidas relações significativas entre a definição da profundidade de descarga e os indicadores financeiros TIR e VPL.

O programa de otimização mostrou-se eficaz ao identificar a profundidade de descarga ideal que maximiza o VPL, tornando o projeto mais atrativo financeiramente.

O VPL obtido para a profundidade de descarga otimizada (96,58%) foi de R\$ 539.801,95, enquanto para a profundidade de descarga média (92,5%⁵) foi de R\$ 515.986,88, representando um ganho de 4,61%. Portanto, esta abordagem possibilitou a tomada de decisões estratégicas que beneficiaram a viabilidade econômica do sistema de armazenamento proposto. Os dados aqui apresentados evidenciam a importância da otimização da profundidade de descarga das baterias para alcançar melhorias expressivas no desempenho e na rentabilidade de sistemas de armazenamento, aplicados a usinas solares fotovoltaicas.

Referências

- ASSIS, L. O.; RAMOS, E. P. P. S.; MENOS, R. S.; TRIVINO, P. G.; RIVERA, E. G.; SAINZ, H. S.; IBORRA, F. L.; RAMIREZ, L. M. F. Simplified model of battery energy-stored quasi-Z-source inverterbased photovoltaic power plant with Twofold energy management system. *Energy Oxford*. v. 244, p. 11, 2022.
- BALOYI, T.; CHOWDHURY, S. Sizing and Selection of Battery Energy Storage System for Time of Use Arbitrage in a Commercial Building in South Africa. *2021 IEEE PES/IAS PowerAfrica*. p. 1-5, 2021.
- CANTÚ, V. Z.; OLIVEIRA, A. K. V.; BRAGA, M.; HOHMANN, M.; GOMES, A. M. F.; SANTOS, D. O.; RUTHER, R. Comparativo técnico entre bancos de baterias de primeira e segunda vida para aplicação On-grid de porte comercial. *IX Congresso Brasileiro de Energia Solar*. p. 1-9, 2022.
- CEMIG. Valores de Tarifas e Serviços. Companhia Energética de Minas Gerais. Disponível em: www.cemig.com.br/atendimento/valores-de-tarifas-e-servicos. Acesso em: 4 set. 2022.
- EMAD, D.; EL-HAMEED, M. A.; EL-FERGANY, A. A. Optimal techno-economic design of hybrid PV/wind system comprising battery energy storage: Case study for a remote area. *Energy Conversion and Management*. v. 246, 2021.

⁵ Valores obtido através de pesquisa bibliográfica e coleta de informações com fornecedores de equipamentos, pela (GREENER, 2022).

- FATHIMA, H.; PALANISAMY, K. Optimized Sizing, Selection, and Economic Analysis of Battery Energy Storage for Grid-Connected Wind-PV Hybrid System. Hindawi Publishing Corporation - Modelling and Simulation in Engineering. p. 1-16, 2015.
- GREENER. Versão Premium: Estudo Estratégico do Mercado de Armazenamento de Energia no Brasil. São Paulo: GREENER, 2022.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA. Electricity Market Report Update. Paris, 2023. P. 6. Disponível em: https://iea.blob.core.windows.net/assets/15172a8d-a515-42d7-88a4-edc27c3696d3/ElectricityMarketReport_Update2023.pdf. Acesso em: 06 nov. 2023.
- HLAL, M. I.; RAMACHANDARA, V. K.; SARHAN, A.; POURYEKTA, A.; SUBRAMANIAM, U. Optimum battery depth of discharge for off-grid solar PV/battery system. Journal of Energy Storage. v. 26, p. 1-9, 2019.
- LI, S.; GU, G.; ZHAO, P.; CHENG, S. Adaptive energy management for hybrid power system considering fuel economy and battery longevity. Energy Conversion and Management. v. 235, p. 1-10, 2021.
- LIU, C.; MA, H.; ZHANG, H.; SHI, X.; SHI, F. A MILP-Based battery degradation model for economic scheduling of power system. IEEE Transactions on Sustainable Energy. v. 14, p. 1000-1009, 2023.
- SI, R.; WANG, R.; ZHANG, S.; ZHOU, W.; LIN, A.; ZENG, G. Configuration optimization and energy management of hybrid energy system for marine using quantum computing. Energy Oxford. v. 253, p. 15, 2022.
- SILVA, T. C. Estudo da implantação de uma miniusina solar fotovoltaica na UNIFEI: aspectos técnicos, econômicos e exergéticos. 2021. 220 f. (Doutorado em Mecânica) - Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI, Itajubá, Minas Gerais.
- SHAHJALAL, M.; ROY, P. K.; SHAMS, T.; FLY, A.; CHOWDHURRY, J. I.; AHMED, M. R.; LIU, K. A review on second-life of Li-ion batteries: prospects, challenges, and issues. Energy Oxford. v. 241, p. 19, 2022.
- SWATHIKA, O. V. G.; PRAVEESH, Y.; THUDUWAGE, T. D. A. V.; WEESINGHE, W. M. P.; HEMAPALA, K. T. M. U.; JEEWANDARA, J. M. D. S. Techno-Economic Analysis on Grid Connected Solar Photovoltaic System with Battery Energy Storage for Domestic and Bulk Customers in Sri Lanka. 2022 IEEE 2nd International Symposium on Sustainable Energy, Signal Processing and Cyber Security (iSSSC). p. 1-5, 2023.
- TRI-SERVICE ELECTRICAL WORKING GROUP (TSEWG). TSEWG TP-4: Stationary Battery and Charger Sizing. 2008.
- VALERIO, V. E. M. Proposta para Dimensionamento ótimo de miniusinas fotovoltaicas no contexto da geração distribuída. 2018. 137 f. (Doutorado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI, Itajubá, Minas Gerais.
- VELIZ, M. T.; KAMEL, S.; AYMEN, F.; JURADO, F. A novel hybrid lexicographic-IGDT methodology for robust multi-objective solution of home energy management systems. Energy Oxford. v. 253, p. 13, 2022.
- XIE, S.; HU, X.; QI, S.; TANG, X.; LANG, K.; XIN, Z.; BRIGHTON, J. Model predictive energy management for plug-in hybrid electric vehicles considering optimal battery depth of discharge. Energy Oxford. v. 173, p. 667-678, 2019.
- XIE, S.; HU, X.; ZHANG, Q.; LIN, X.; MU, B.; JI, H. Aging-aware co-optimization of battery size, depth of discharge, and energy management for plug-in hybrid electric vehicles. Journal of Power Sources. v. 450, p. 1-11, 2020.
- ZHOU, S.; HANA, Y.; MAHMOUD, K.; DARWISH, M. M.; LEHTONEN, M.; YANG, P.; ZALHARF, A. S. A novel unified planning model for distributed generation and electric vehicle charging station considering multi-uncertainties and battery degradation. Applied Energy. v. 348, p. 1-8, 2023.