

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

DARYANE GAULIK

**ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICA DE UM SISTEMA DE
ARMAZENAMENTO DE ENERGIA PARA INTEGRAÇÃO EM USINAS DE
GERAÇÃO FOTOVOLTAICA**

PATO BRANCO

2023

DARYANE GAULIK

**ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICA DE UM SISTEMA DE
ARMAZENAMENTO DE ENERGIA PARA INTEGRAÇÃO EM USINAS DE
GERAÇÃO FOTOVOLTAICA**

**Study of the technical feasibility of an energy storage system for integration
in photovoltaic generation plants**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Elétrica
do Curso de Bacharelado em Engenharia
Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do
Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Jean Patric da Costa

Coorientador: Paulo Roberto Cagnini

PATO BRANCO

2023



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

DARYANE GAULIK

**ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICA DE UM SISTEMA DE
ARMAZENAMENTO DE ENERGIA PARA INTEGRAÇÃO EM USINAS DE
GERAÇÃO FOTOVOLTAICA**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Elétrica
do Curso de Bacharelado em Engenharia
Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do
Paraná.

Data de aprovação: 23/06/2023

Jean Patric da Costa
Doutorado em Engenharia Elétrica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Paulo Roberto Cagnini
Mestrado em Engenharia Elétrica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Rafael Cardoso
Doutorado em Engenharia Elétrica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Juliano de Pelegrini Lopes
Doutorado em Engenharia Elétrica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

PATO BRANCO

2023

AGRADECIMENTOS

Chegada do final de um ciclo e abertura para novos. É um filme que passa na cabeça de tudo que aconteceu durante esses anos, muitas risadas, choro, ansiedade, felicidades, saudades e frustrações.

Meu agradecimento primeiramente é a Deus, por sempre estar iluminando meu caminho para alcançar aos meus objetivos. E muita coragem e sabedoria para nunca deixar as oportunidades passarem.

Aos meus pais, por desde criança me mostrarem o caminho certo e que mesmo com as dificuldades, nunca largaram minha mão.

Agradecimento especial ao meu irmão e ao meu namorado, por muitas vezes terem me ouvido, por toda compreensão e paciência. E pela torcida por mim.

Agradeço também, ao meu professor e orientador Dr. Jean, por todos conhecimentos e ensinamentos durante essa trajetória, foram de muita importância. Ao meu coorientador Paulo, por durante esse período salientar os conhecimentos necessários para este trabalho.

Agradeço a todas pessoas que no decorrer desta caminhada estiveram comigo, me ajudaram a atravessar as dificuldades que surgiram, desde momentos de incertezas aos mais árduos desafios técnicos.

Obrigada família, obrigada professores, obrigada amigos por todo suporte e estímulo de ânimo e perseverança para encerrar esta jornada.

Não é o mais forte que sobrevive, nem o mais
inteligente, mas o que melhor se adapta às
mudanças”
– Charles Darwin

RESUMO

Neste trabalho foi realizado o estudo de um projeto de armazenamento para uma usina fotovoltaica com sobredimensionamento. Usina fotovoltaica sobredimensionada é aquela em que a capacidade de geração de energia dos painéis solares é maior que a capacidade do inversor utilizado. No presente estudo, a usina possui um sobredimensionamento de cerca de 22% a mais do limite do inversor, excedendo então a sua capacidade máxima. O armazenamento é fundamental para esse caso, pois ele permite capturar o excesso de potência produzida e armazená-lo para uso posterior. A metodologia adotada envolveu uma pesquisa bibliográfica para entendimento de todo processo de uma usina, sendo necessário juntamente a coleta dos dados disponíveis da usina sobredimensionada, incluindo informações de gerações como também *datasheets* utilizados dos componentes necessários. Posteriormente, os dados coletados foram importados para simulação. A utilização do *software* MATLAB e a ferramenta de simulação integrada Simulink permitiu a realização de simulações para avaliar o funcionamento da usina estudada e também realizar o gerenciamento estratégico responsável pela detecção da potência excessiva através do controle do MPPT, maximizando assim a potência. Foi desenvolvido também o gerenciamento proposto para o carregamento e descarregamento do armazenamento. A partir dos resultados da validação da usina, verificou-se que a usina possui uma potência de 127,767 kWp, onde o inversor utilizado possui um limite nominal de 100 kWp. Com modelos matemáticos foi possível selecionar o tipo e o tamanho do armazenamento necessário para o sobredimensionamento existente. Em específico, neste trabalho foi utilizado a bateria íon-lítio, em que seu funcionamento e suas especificidades foram detalhados ao longo do trabalho. Por fim, foi desenvolvido os dados necessários para o armazenamento de modo a guardar a potência excessiva para uso em horários que não possui irradiância solar, aproveitando toda potência disponível no sistema.

Palavras-chave: armazenamento; bateria; fotovoltaica; usina; dimensionamento.

ABSTRACT

In this work, a study of a storage project for a photo-processing plant was carried out. voltage with oversizing. An oversized photovoltaic plant is one in which the Power generation capacity of solar panels is greater than inverter capacity used. In the present study, the plant is oversized by about 22% more than the inverter limit, thus exceeding its maximum capacity. the storage is fundamental for this case, as it allows capturing the excess power produced and store it for later use. The methodology adopted involved a bibliographical research for understanding the entire process of a plant, being necessary together with the collection available data from the oversized plant, including generational information such as also used technical sheets of the necessary components. later, the collected data data were imported for simulation. The use of MATLAB software and the integrated simulation Simulink allows you to carry out simulations to evaluate the operation of the trained plant and also carry out the strategic management responsible for the detection excess power through MPPT control, thus maximizing power. he was also developed the planner planned for the loading and unloading of the processing. From the results of the validation of the plant, it was deserved that the plant has a power of 127,767 kWp, where the inverter used has a nominal limit of 100 kWp. With mathematical models it was possible to select the type and size of storage necessary for the existing oversizing. Specifically, in this work we used the lithium-ion battery, in which its functioning and its specificities were detailed along throughout the work. Finally, the necessary data for the storage of in order to save the excessive power for use at times when there is no solar radiation, taking advantage of all the power available in the system.

Keywords: storage; battery; photovoltaic; power plant; oversizing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama de um sistema fotovoltaico	13
Figura 2 – <i>Clipping</i> de um inversor com sobredimensionamento nos painéis	14
Figura 3 – Diagrama do projeto de instalação do armazenamento	15
Figura 4 – Irradiação direta do Brasil em kWh/m ²	18
Figura 5 – Junção P-N	19
Figura 6 – Painéis solares do tipo silício	20
Figura 7 – Classificação da junção eletrônica das células	21
Figura 8 – Camadas de um módulo fotovoltaico	21
Figura 9 – Curva característica P-V	22
Figura 10 – Fluxograma para método Perturbe e Observe	24
Figura 11 – Fluxograma para método condutância	25
Figura 12 – Usina fotovoltaica localizada na Bahia	26
Figura 13 – Ciclos de vida em função da profundidade de descarga	30
Figura 14 – Estágios de carga	31
Figura 15 – Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica	34
Figura 16 – Curva I-V para diferentes irradiações solares	35
Figura 17 – Curva P-V para diferentes irradiações solares	36
Figura 18 – Diagrama do controle MPPT	37
Figura 19 – Fluxograma do algoritmo MPPT	38
Figura 20 – Curva de máxima potência da <i>string</i> 01	39
Figura 21 – Potência, tensão e corrente de saída da <i>string</i> 01	39
Figura 22 – Potência de todo o sistema fotovoltaico	41
Figura 23 – Curva da potência pelo tempo em horas de um dia	42
Figura 24 – Diagrama do controle de limite do inversor	42
Figura 25 – Diagrama unifilar do controle da chave seccionadora.	43
Figura 26 – Controle implantado no <i>Stateflow</i>	44
Figura 27 – Curva da potência de limite do inversor	44
Figura 28 – Curva da potência ceifada pelo efeito clipping	45
Figura 29 – Diagrama de entrada de carregamento e descarregamento	46
Figura 30 – Controle de carregamento e descarregamento	46

Figura 31 – Curva da descarregamento proposto	47
Figura 32 – Bateria de íon lítio	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Datasheet módulo CanadianSolar BiHiKu7	33
Tabela 2 – <i>Datasheet</i> do inversor Huawei SUN2000-100KTL-M1	40
Tabela 3 – Parâmetros propostos para o sistema de armazenamento	50

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Siglas

BESS	<i>Battery Energy Storage Systems</i>
CA	corrente alternada
CC	corrente contínua
DoD	<i>Depth of Discharge</i>
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
P&O	Perturbe e Observe
PMP	Ponto de Máxima Potência
SAE	Sistemas de Armazenamento de Energia
SoC	<i>State of Charge</i>
STC	Standard Test Conditions

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Apresentação do tema	13
1.2	Objetivos	16
1.2.1	Objetivo geral	16
1.2.2	Objetivos específicos	16
1.3	Estrutura do trabalho	16
2	REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1	Radiação solar	17
2.1.1	Radiação solar no Brasil	17
2.2	Elementos gerais da célula fotovoltaica	18
2.2.1	Efeito fotovoltaico	18
2.2.2	Célula fotovoltaica	19
2.2.3	Módulo fotovoltaico	20
2.3	Curvas características	22
2.4	Inversor	23
2.5	Sistema de MPPT	23
2.5.1	Perturbe & Observe	24
2.5.2	Condutância Incremental	25
2.6	Usina solar fotovoltaica	26
2.6.1	Usina fotovoltaica sobredimensionada por painéis solares	27
2.7	Armazenamento fotovoltaico	28
2.8	Controlador de carga	30
3	DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO	33
3.1	Painéis fotovoltaicos	33
3.2	Sistema fotovoltaico acoplado ao algoritmo MPPT	36
3.3	Inversor	40
3.4	Gerenciamento de controle	41
3.4.1	Controle do conversor	45
3.5	Armazenamento	48
3.5.1	Funcionamento	48

3.5.2	Descarte da bateria	49
3.6	Dimensionamento do sistema de armazenamento	49
4	CONCLUSÃO	52
4.1	Trabalhos futuros	53
	REFERÊNCIAS	54

1 INTRODUÇÃO

O uso da eletricidade faz parte da vida humana há muitas décadas e o crescimento populacional associado ao desenvolvimento da tecnologia está causando um aumento mundial na demanda de energia. Os países estão cada vez mais em busca de novas fontes de energia, principalmente aquelas que produzem com menos impacto negativo ao meio ambiente. As fontes renováveis são as mais procuradas, uma vez que são aquelas sem restrições de disponibilidade e a partir de recursos naturais, como água, sol, vento, marés e biomassa.

No Brasil, a matriz energética é formada 48,3% de energia renovável (EPE, 2022). A energia solar fotovoltaica é a que vem se destacando e se espalhando cada vez mais por ser uma energia que apresenta um operacional menos poluente, sem ruídos, de manutenção simples e de baixo impacto ambiental, podendo gerar eletricidade junto às construções, sem necessidade de longas linhas de transmissão (COSTA, 2010), se tornando então competitiva nas regiões.

O início da fotovoltaica no Brasil foi em meados dos anos de 50, mas com a falta de incentivo e o alto custo de implementação houve uma estagnação no setor, voltando somente depois de muitas tecnologias já estudadas em outros países e com o Centro Brasileiro de Energia Solar Fotovoltaica (CB-solar), criado em 2004 em Porto Alegre, RS (PINHO; GALDINO *et al.*, 2014). Com o rápido aumento das instalações de energia fotovoltaica residenciais e também usinas, o Brasil alcançou a marca de 30 GigaWatts (GW) de potência operacional da fonte solar fotovoltaica, segundo dados da (ABSOLAR, 2023). As usinas solares de grande e pequeno porte ocupam o quinto lugar de maior fonte de geração de energia no Brasil gerando preços até dez vezes menores que a energia elétrica importada dos países vizinhos (Udop, 2022) (EXAME, 2022).

O crescimento da energia elétrica a partir de painéis fotovoltaicos promove o debate de como adaptar esta nova capacidade de geração na matriz energética nacional, devido à sua fonte de energia se comportar de forma intermitente, mudando de acordo com fatores climáticos que muitas vezes dificultam uma previsão de geração assertiva, não podendo controlar sua produção de acordo com a demanda (GIMENES *et al.*, 2020).

Manifesta-se, então, como uma alternativa os Sistemas de Armazenamento de Energia (SAE), especificamente os sistemas de armazenamento por baterias, que além de contornar falhas dos sistemas fotovoltaicos, aproveita a geração de energia ao longo do dia para suprir em horários de demanda maior ou de baixa radiação solar. O armazenamento de energia elétrica é o processo de conversão de energia elétrica de uma rede em uma forma que pode ser armazenada e convertida novamente em energia elétrica quando for necessária. Esse processo permite que a eletricidade que é captada em horários de demandas baixas, com custo baixo, possa ser guardada para o uso posterior com demandas altas e custos maiores (MCLARNON; CAIRNS, 1989).

O uso de armazenamentos de energia no sistema elétrico é uma ideia existente desde os anos 20, evidenciadas pelo uso de bombeamento e turbinas, onde quantidades de águas eram bombeadas para reservatórios (AKHIL *et al.*, 2015). Contudo, de acordo com Bueno e Brandão (2016), o armazenamento efetivo de energia não estava na agenda do setor de energia do Brasil até meados de 2015. Devido a grande capacidade dos sistemas de armazenamento de garantir mais disponibilidade, qualidade e confiabilidade de energia, uma vez que apresentam vantagens desde a geração até o consumo, esse tipo de sistema tem ganhado crescente atenção.

Pode-se observar atualmente, em âmbito global, diversos tipos de SAE, cada uma em seu estágio de maturidade, seja em relação a pesquisas ou aplicações reais. Com previsões de crescimento, as baterias ganharam o mundo dos sistemas de armazenamento, com destaque para as baterias de íon-lítio, impulsionadas pela redução de custos (EPE, 2019b). Embora as baterias de íons de lítio sejam populares apenas na última década, as baterias de chumbo-ácido cumprem a função de armazenamento e eletricidade há muito tempo, o que mostra que o conceito de sistemas de armazenamento de energia elétrico não é novo (WEG, 2021).

1.1 Apresentação do tema

Há muitas usinas de geração fotovoltaica optando pelo sobredimensionamento (*oversizing*), isto é, adicionar uma potência de painéis de corrente contínua (CC) maior que a potência nominal do inversor de corrente alternada (CA), sendo fundamental para maximizar a energia gerada pelo sistema.

O presente trabalho tem como foco detalhar o projeto e dimensionamento de um armazenamento para uma usina fotovoltaica com sobredimensionamento. Trata-se de um caso real de uma usina fotovoltaica, a qual já é totalmente instalada e vem acontecendo um *oversizing*, que designa que os módulos solares são sobredimensionados em relação à potência do inversor. A Figura 1 abaixo mostra a estrutura básica de uma usina solar.

Há muitas razões pelas quais é usado o *oversizing* na geração fotovoltaica, como o aumento do aproveitamento da radiação solar disponível, obtendo também um melhor desem-

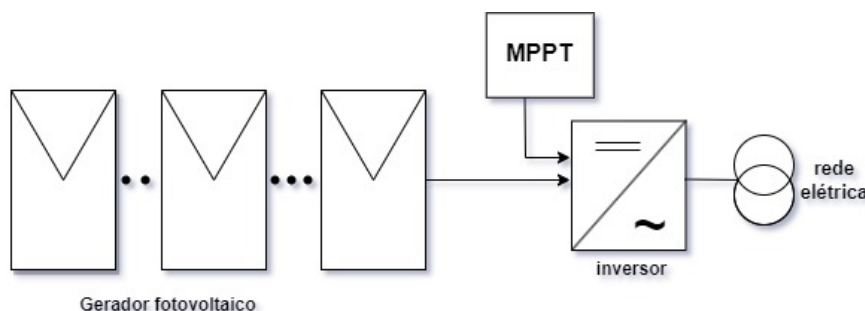


Figura 1 – Diagrama de um sistema fotovoltaico

Fonte: Autoria própria (2023).

penho em condições não ideais, como dias nublados ou com sombreamentos parciais. O sobredimensionamento pode ser estrategicamente planejado para acomodar futuras expansões do sistema, se houver planos de aumentar a demanda de energia no futuro, ter uma capacidade de geração excedente desde o início facilita a expansão sem a necessidade de substituir ou adicionar componentes significativos ao sistema existente. No entanto, é importante ressaltar que o *oversizing* deve ser cuidadosamente planejado, pois um dimensionamento excessivo pode resultar em custos adicionais desnecessários, enquanto um dimensionamento insuficiente pode comprometer a capacidade de geração do sistema (MOHANTY; MUNEEER; KOLHE, 2016).

O inversor possui um limite de potência de saída indicado em seu *datasheet* e, desse modo, mesmo que a potência dos módulos dos painéis seja maior do que o valor de potência nominal do inversor, o inversor irá gerar potência na saída apenas até o seu valor máximo e a potência adicional dos módulos será “ceifada”, efeito conhecido como *clipping*. A Figura 2 abaixo apresenta o ceifamento da potência, devido ao sobredimensionamento.

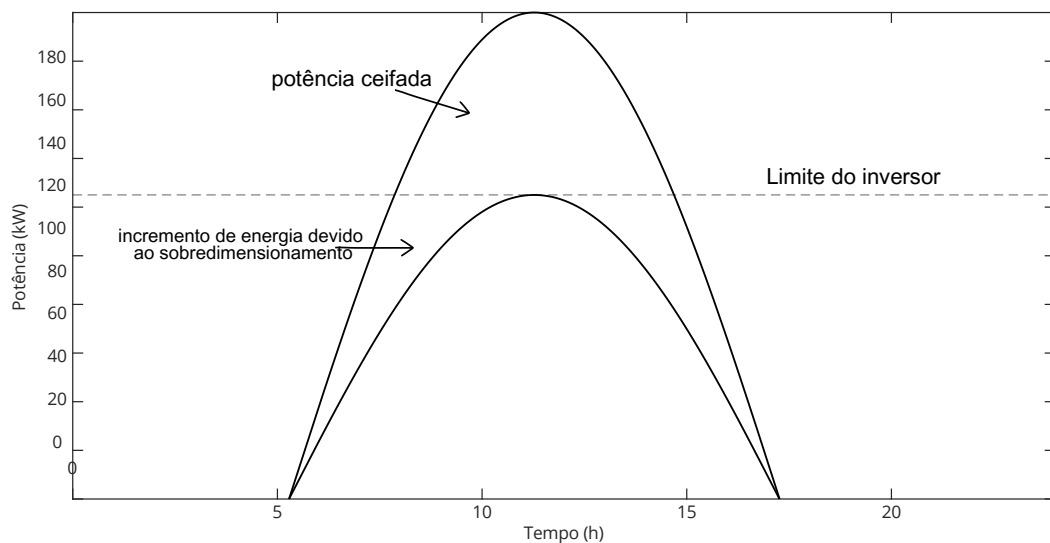


Figura 2 – Gráfico indicando o *clipping* de um inversor com sobredimensionamento nos painéis
Fonte: Autoria própria (2023).

Um tipo de sistema de armazenamento pode ser desenvolvido para esse excesso de energia inutilizada, devido ao efeito *clipping*. Além de captar essa potência e garantir o suprimento dessa energia para ser usada em outros momentos, o uso de elementos de armazenamento de energia em sistemas de geração fotovoltaica, energia renovável em geral, podem auxiliar também no gerenciamento da energia, auxiliando no aumento da qualidade de energia, incluindo a redução da distorção harmônica (MONTEIRO, 2011).

Os Sistemas de Armazenamento de Energia por Baterias – do inglês, *Battery Energy Storage Systems* (BESS) estão sendo destaques devido a grande aplicabilidade em uma variedade de aplicações, como melhoria da geração renovável, fornecimento de serviços para

regulação de frequência e tensões, reduções nos picos de demanda da rede de transmissão e distribuição (DATTA; KALAM; SHI, 2021). Os BESS são compostos por bancos de baterias, em que acumulam energia de forma química e convertem em energia elétrica.

Existem vários tipos de baterias, no entanto, as de chumbo-ácido e íons de lítio são as mais utilizadas e conhecidas. A escolha da bateria a ser utilizada no BESS depende de vários fatores, como o tipo de tecnologia e aplicação, em que se faz necessário um dimensionamento para cada projeto em específico.

Há várias formas de conectar um armazenamento. Neste trabalho será discutido sobre um armazenamento de energia para uma usina solar já em funcionamento, com dados reais da mesma. Será evidenciado o armazenamento para o excesso de energia que não está sendo aproveitada. A Figura 3 mostra como é a proposta da instalação de armazenamento na usina fotovoltaica.

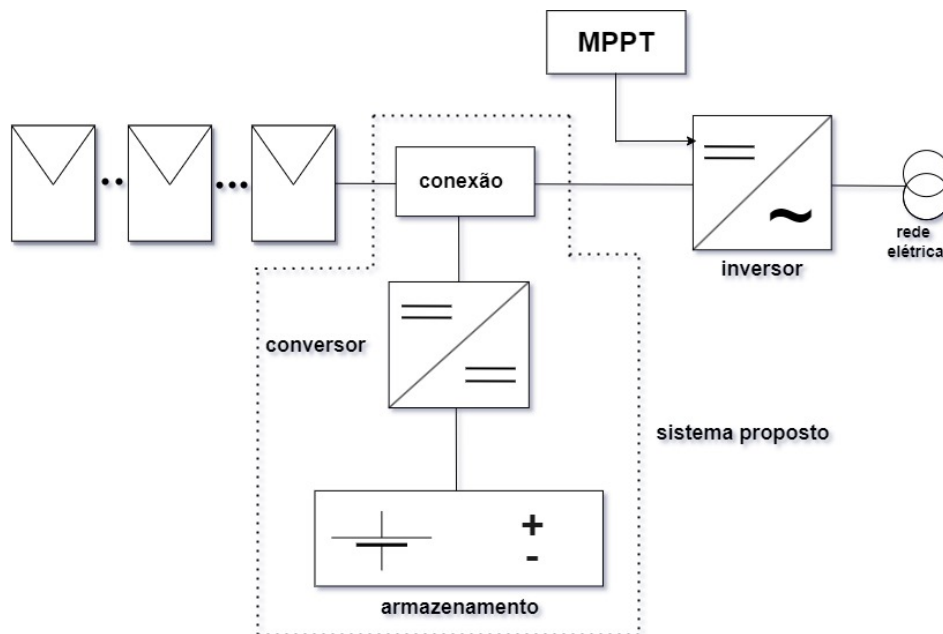


Figura 3 – Diagrama do projeto de instalação do armazenamento

Fonte: Autoria própria (2023).

O equilíbrio entre produção e consumo de energia tende a crescer cada vez mais, a complexidade das redes de distribuição e a complexidade dos sistemas de armazenamento de energia da bateria tornou-se uma alternativa valiosa, principalmente para a operação do sistema e sua modularidade para permitir diferentes escalas de desempenho.

Outra alternativa além do armazenamento, seria a troca do inversor por um de maior potência, é necessário alguns estudos técnicos e econômicos para essa decisão. Há alguns riscos a ser considerados na troca do inversor, como a compatibilidade com o sistema existente, a perda de garantia dos componentes do sistema fotovoltaico, como também é necessário visualizar as políticas e regulamentos locais, os termos e condições do contrato existente e a natureza da troca do inversor.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Estudo da viabilidade técnica de um sistema de armazenamento para usinas fotovoltaicas que possuem sobredimensionamento dos módulos fotovoltaicos em relação a potência nominal do inversor.

1.2.2 Objetivos específicos

- Efetuar uma pesquisa bibliográfica sobre os possíveis tipos de sistemas de armazenamentos de energia fotovoltaica.
- Analisar os dados de uma geração fotovoltaica que possui sobredimensionamento do sistema de geração, definindo uma melhor alternativa para adição de um sistema de armazenamento.
- Analisar e desenvolver os modelos médios das curvas de geração e dos fluxos de energia.
- Dimensionar o sistema de armazenamento.
- Aplicação do algoritmo MPPT método P&O com objetivo de obter o ponto de máxima potência do sistema.
- Realizar gerenciamento da curvas de carga e descargas do armazenamento.
- Desenvolver o sistema de gerenciamento do controlador de carga e descarga e do armazenamento de energia.
- Analisar e validar os resultados através de simulações.

1.3 Estrutura do trabalho

O trabalho é dividido em quatro capítulos. Inicialmente no primeiro capítulo, aborda-se uma contextualização do estudo, ressaltando a relevância deste trabalho e destacando o tema abordado e seus objetivos associados. No segundo capítulo, será tratado sobre os elementos que complementam a geração fotovoltaica.

Em seguida, no terceiro capítulo, será detalhado todo o desenvolvimento do trabalho com simulações devidas e respectivos resultados, de forma a alcançar os objetivos. E também os materiais necessários. O quarto capítulo apresenta a conclusão final e suas limitações e propostas de trabalhos para continuidade.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A energia solar fotovoltaica desempenha um papel importante na geração de energia renovável, essa que pode estar presente desde a microgeração até as grandes usinas, ampliando cada vez mais seu mercado. Neste capítulo é realizada uma revisão bibliográfica dos principais elementos que constituem uma usina fotovoltaica para geração da energia, em que serão apresentados e detalhados suas especificidades.

2.1 Radiação solar

O sol é o maior fornecedor de energia da Terra, uma vez que fornece energia na forma de radiação e é a base de toda a vida na Terra. Essa energia solar é transmitida na forma de ondas eletromagnéticas, das quais apenas uma pequena fração da radiação atinge a superfície da Terra. Dessa energia, metade é emitida como luz visível e a outra metade como luz infravermelha e ultravioleta.

A quantidade de radiação solar que atinge a Terra varia ao longo do dia e ao longo do ano, dependendo da posição da Terra em relação ao sol e das condições atmosféricas. A intensidade da radiação solar é medida em unidades como Watt por metro quadrado (W/m^2), sendo influenciada pela latitude, altitude, nebulosidade, poluição atmosférica e outras variáveis.

A energia solar fotovoltaica é dependente da radiação solar, pois ela é a energia elétrica produzida a partir da luz solar. Os sistemas fotovoltaicos são compostos por células fotovoltaicas, as quais são feitas de materiais semicondutores que absorvem a radiação solar e geram corrente elétrica.

2.1.1 Radiação solar no Brasil

No Brasil há um ótimo índice de radiação solar, pois sua localização é favorecida por encontrar-se próximo a linha do Equador. Segundo uma pesquisa do Atlas Brasileiro de Energia Solar, em 2016 o Brasil recebia cerca de 40% a mais de luz do sol que a Alemanha, considerado o país que mais investe e usa a energia solar (MARTINS *et al.*,).

Como pode-se observar na Figura 4, as regiões que apresentam as maiores intensidades de radiação solar no Brasil são o Nordeste e o Centro-Oeste, que possuem médias anuais de radiação solar em torno de 2.100 kWh/m^2 e 2.300 kWh/m^2 , respectivamente. Já as regiões Sul e Sudeste possuem médias anuais de radiação solar em torno de 1.500 kWh/m^2 e 1.900 kWh/m^2 , respectivamente.

De fato, a irradiação solar não é único fator determinante para a quantidade de energia solar disponível em um determinado país. Outros fatores podem influenciar a quantidade de

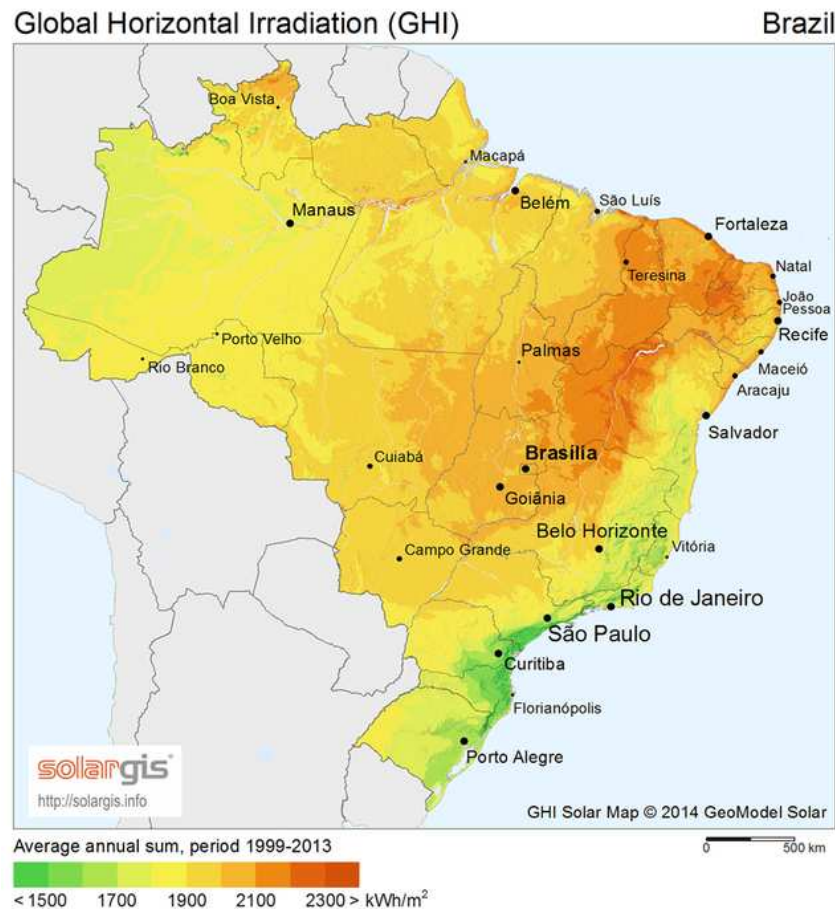


Figura 4 – Irradiação direta do Brasil em kWh/m²

Fonte: SOLARGIS (2022).

radiação solar efetivamente aproveitada, como variações climáticas e cobertura das nuvens, a inclinação e orientação dos painéis solares, entre outros (ZULUAGA *et al.*, 2022).

2.2 Elementos gerais da célula fotovoltaica

2.2.1 Efeito fotovoltaico

O efeito fotovoltaico, descoberto no ano de 1839 pelo físico francês Edmond Becquerel durante a observação de seus experimentos com eletrodos, consiste na geração de corrente elétrica pela exposição à luz. Esse efeito é caracterizado pela conversão da radiação solar em eletricidade, por intermédio de semicondutores (FADIGAS, 2012a).

A energia da luz solar é absorvida pelos elétrons dos átomos do material semicondutor, fazendo com que eles sejam liberados da sua posição original e se movam livremente pelo material. Quando os elétrons se movem, geram uma corrente elétrica que pode ser capturada e utilizada como energia elétrica. Em resumo, o efeito físico reside na possibilidade de movimento de elétrons da superfície devido a absorção de energia da luz incidente.

2.2.2 Célula fotovoltaica

As células solares fotovoltaicas são dispositivos que utilizam o efeito fotovoltaico para gerar eletricidade a partir da luz solar. As células solares são feitas de materiais semicondutores, como o silício, que possuem a propriedade de absorver a energia da luz solar e gerar corrente elétrica.

Uma célula fotovoltaica é responsável por absorver a energia luminosa do sol e convertê-la em energia elétrica. Quando essa luz atinge a célula, uma corrente é gerada e imediatamente vedada por fios que estão ligados com a célula e assim é enviada para os demais componentes necessários. Quanto maior o número de células fotovoltaicas, sejam ligadas em série ou paralelo, maior será a corrente e tensão produzida. Isso acontece através do efeito fotovoltaico onde é explorado pela composição da estrutura celular.

Uma célula consiste em um material semicondutor com duas camadas interagindo em uma junção P-N. Junção P-N é o limite entre as camadas semicondutoras do tipo P (com deficiência de elétrons) e a camada do tipo N (excesso de elétrons), criando um campo elétrico na fronteira (JÚNIOR; BAGNARA, 2016). Na Figura 5 é observado como acontece as junções P-N com os materiais semicondutores, proporcionando elétrons de uma camada a outra, ao sobrevir com a irradiância solar.

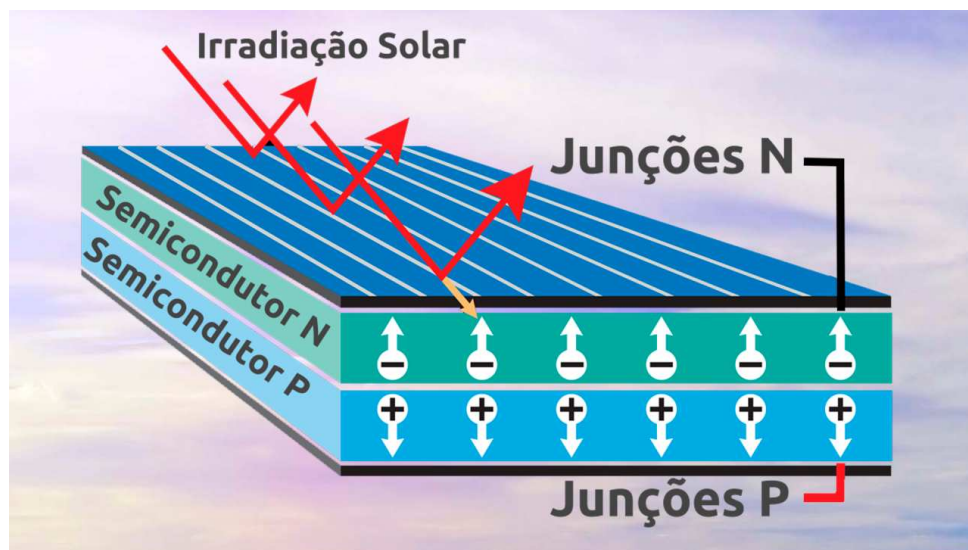


Figura 5 – Junção P-N
Fonte: Ribas (2020).

Em termos de composição das células fotovoltaicas, uma camada de material, geralmente dióxido de titânico (TiO_2) ou dióxido de silício (SiO_2), é adicionada à face das células para minimizar as perdas por reflexão. A implementação de uma camada anti-reflexiva é muito importante para suportar a correspondência entre os índices de refração do silício e do ar, que são diferentes e podem causar perdas significativas de eficiência. Essa camada tem um índice de refração médio, o que melhora o acoplamento óptico entre o ar e o silício (RAMOS, 2006).

A maioria das células solares é feita de silício (Si), podendo ser formadas de cristais monocristalinos, policristalinos ou de silício amorfo (SOLAR, 2006). Os cristais monocristalinos são células obtidas através do corte da barra de silício monocristalino, a partir de um único cristal, tornando-se ótima para potencializar o efeito fotovoltaico.

Essas células apresentam um valor mais elevado, comparando com as células de policristalinos, por serem apenas de um único cristal. A eficiência desses painéis varia próximo de 20%, sendo que ocupam menos espaço porque são mais eficientes em produzir a mesma quantidade de eletricidade e também tendem a ter um desempenho melhor em condições de pouca luz (WEBER, 2019).

Por fim, as células de silício amorfo são comuns em vários eletroeletrônicos de baixo consumo energético. Essas células são obtidas depositando camadas muito finas de silício em superfícies de vidro ou metal, por isso sua eficiência é muito menor comparada aos modelos citados acima. A Figura 6 ilustra os três tipos de célula de silício mais utilizados. Em ordem, monocristalino, policristalino e amorfo.



Figura 6 – Painéis solares do tipo silício

Fonte: METASOL (2022).

2.2.3 Módulo fotovoltaico

A junção eletrônica de células fotovoltaicas formam o módulo fotovoltaico, conhecido também como placa ou painel fotovoltaico. O uso de várias células juntas, seja em série ou em paralelo, é devido à baixa tensão e corrente de saída em uma única célula fotovoltaica. A Figura 7 ilustra essa classificação.

Além das células solares e suas conexões metálicas, essa junção consiste em um sanduíche de vidro temperado de alta qualidade com moldura de alumínio, transparência, acetato de etil vinila (EVA) estabilizado contra UV, células fotovoltaicas, EVA estabilizado e filme isolante traseiro e por fim caixa de junção. A Figura 8 demonstra essas camadas.

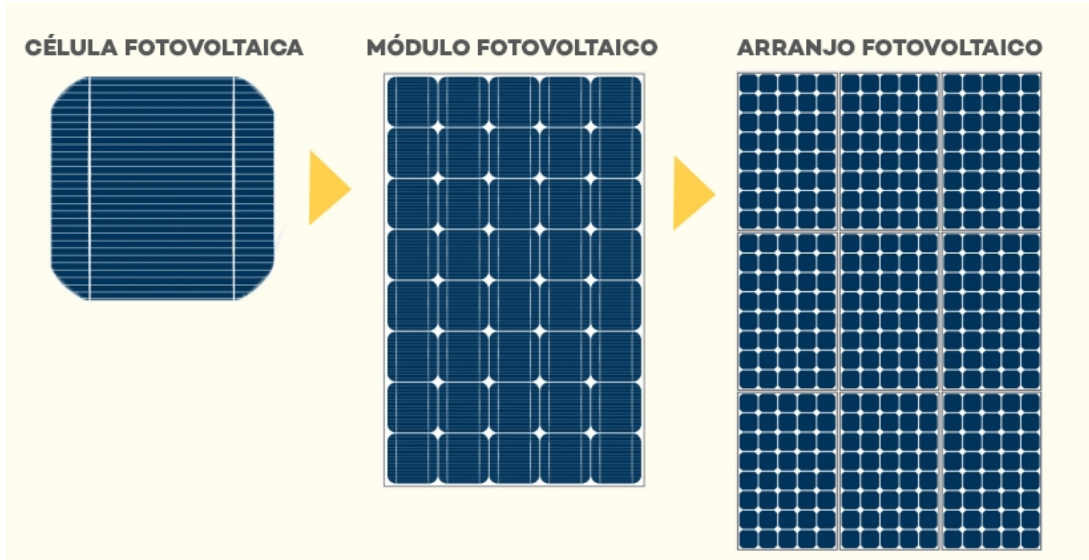


Figura 7 – Classificação da junção eletrônica das células

Fonte: SOLAR (2022).

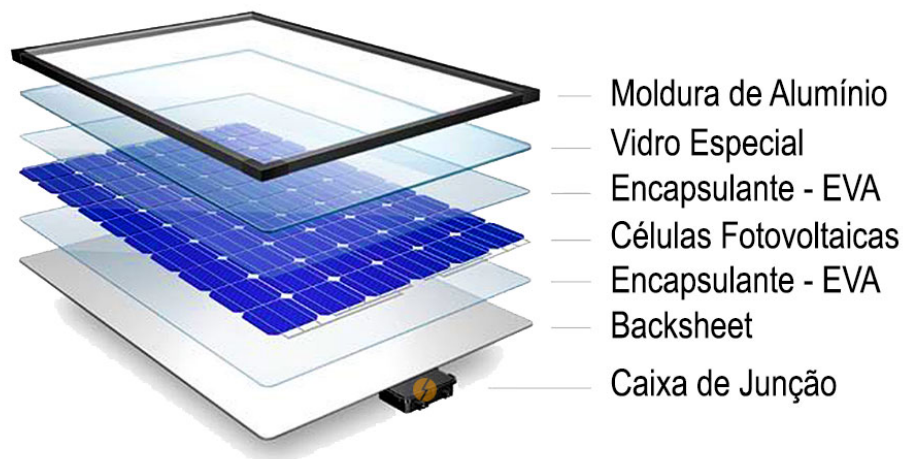


Figura 8 – Camadas de um módulo fotovoltaico

Fonte: Portal Solar (2022).

É importante destacar que a eficiência de uma célula individual é maior que um conjunto de células formando um módulo. Isso acontece devido à presença do vidro em cima do painel, pelo material que foi encapsulado e também pelas perdas ôhmicas, nas junções e condutores, ocasionando a redução da eficiência do painel.

Os módulos fotovoltaicos são capazes de gerar eletricidade quando expostos à luz solar, mesmo em dias nublados. A quantidade de eletricidade gerada depende da intensidade da luz solar, da temperatura ambiente e de outros fatores como a correta colocação dos módulos fotovoltaicos. É importante avaliar corretamente o local de instalação dos painéis que são fixos, quanto à área disponível. Sendo que a inclinação ótima para a máxima incidência solar anual é dada pela latitude local.

2.3 Curvas características

A curva característica de um painel solar consiste na representação gráfica do comportamento da corrente em função da tensão em diferentes níveis de irradiância solar e temperatura. Essa curva é importante pois fornece informações sobre o desempenho do painel solar e ajuda a determinar o melhor ponto de operação.

Já para um sistema fotovoltaico representam a relação entre a potência gerada pelo sistema em função da irradiância solar e da temperatura. A potência gerada final depende de muitos fatores, como a radiação solar diretamente no módulo e também a temperatura de funcionamento das células que depende fatores externos, como orientação e inclinação dos painéis solares, sombreamento, temperatura ambiente e qualidade dos componentes utilizados.

No gráfico $I \times V$ (corrente x tensão) da Figura 9 a seguir, I_{sc} é a corrente de curto-circuito, portanto, a tensão é igual a zero; V_{oc} é a tensão de circuito aberto, corresponde à queda de tensão através da junção P-N; I_{mp} , V_{mp} e P_{max} são a corrente, a tensão e a potência no ponto de máxima potência respectivamente. Ao analisar essa curva, é possível determinar o Ponto de Máxima Potência (PMP), que representa a combinação ideal de tensão e corrente para a maximização da energia produzida pelo sistema. Essa relação depende significativamente da radiação e da temperatura módulo fotovoltaico (VILLALVA, 1983).

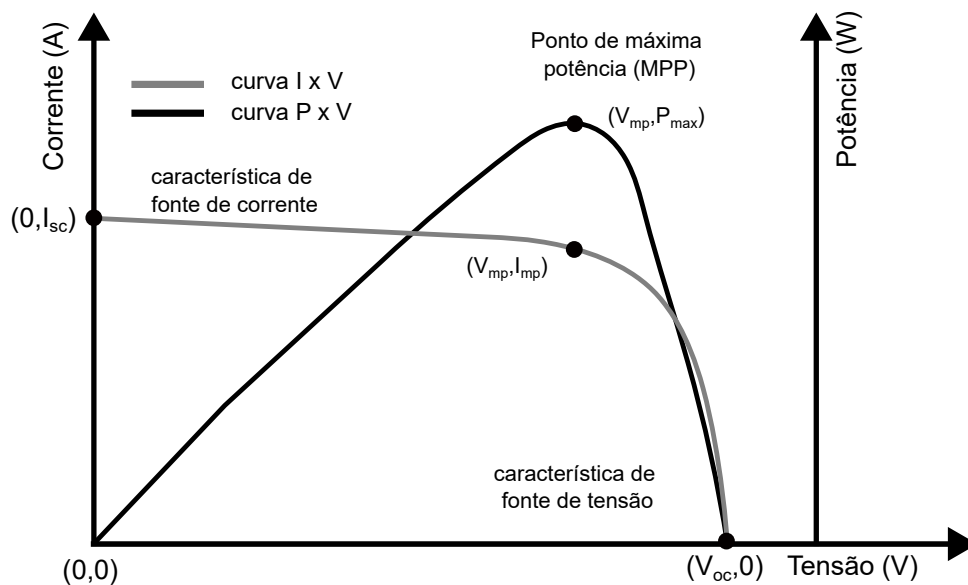


Figura 9 – Curva característica P-V

Fonte: Autoria própria (2023).

Além disso, a curva $I \times V$ é usada para analisar a resistência interna do sistema, que é um indicador da qualidade dos componentes e da eficiência de conversão do sistema. Uma resistência interna alta indica uma perda de eficiência no sistema, enquanto uma resistência baixa indica que o sistema está funcionando de forma mais eficiente.

2.4 Inversor

Após a conversão dos raios solares em energia elétrica pelos módulos fotovoltaicos, essa energia ainda precisa passar por mais uma conversão para poder ser utilizada, pois a energia gerada pelos módulos é em corrente contínua (CC) e as cargas utilizadas atuais são em corrente alternada (CA). Sua operação é realizada por um mecanismo de comutação para alternar a direção da corrente fornecida à carga. Existem muitas técnicas de conversão de corrente contínua em corrente alternada, a partir das quais é possível determinar a qualidade da energia fornecida à carga e sua forma de onda de saída de uma delas (PINTO; ALMEIDA, 2009).

Um inversor fotovoltaico é um equipamento eletrônico utilizado em sistemas de geração de energia elétrica a partir de painéis solares. Sua principal função é converter a CC gerada pelos painéis solares em CA, que é a forma de energia elétrica utilizada em residências, comércios e indústrias. O inversor é capaz de medir e seguir parâmetros como a frequência, a tensão e ângulo, para que assim o sistema encontre-se em perfeita sincronização com a rede. Possui seu sistema de segurança, o qual consegue identificar a falta de corrente vindo do sistema de distribuição e desliga automaticamente para que a energia não seja injetada na rede,.

A norma da ABNT NBR 16149:2013 é a que estabelece parâmetros para os inversores, tais como: fator de potência, faixas de variação de tensão e frequência, proteções, entre outros.

2.5 Sistema de MPPT

Para que um sistema fotovoltaico funcione com maior eficiência, ele deve trabalhar no ponto de potência máxima. Como já mencionado, os parâmetros de saída dos módulos fotovoltaicos não são constantes devido a mudanças ambientais, como radiação solar e temperatura. Nesse contexto, o *Maximum Power Point Tracking* (MPPT), ou rastreamento do ponto máxima potência, é um tipo de controle eletrônico utilizado em sistemas de geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis, como painéis solares e turbinas eólicas. Ele é responsável por garantir que o sistema de geração opere de forma instantânea em seu ponto de máxima potência gerando então uma maximização na produção de eletricidade do sistema fotovoltaico e sua entrega à carga por meio do inversor, independente das condições de irradiação solar e temperatura.

O sistema MPPT utiliza um controlador eletrônico para ajustar continuamente a tensão de saída do sistema de geração de energia, monitorando a corrente e a tensão da fonte de energia e ajustando a carga para obter a máxima potência disponível. Dessa forma, o sistema é capaz de extrair a máxima quantidade de energia elétrica possível, independentemente das condições climáticas ou ambientais. Existe várias técnicas aplicadas de MPPT em sistemas fotovoltaicos, as mais usadas e destacadas são os métodos de Perturbe e Observe (P&O) e de condutância incremental (BLESSA, 2018).

2.5.1 Perturbe & Observe

O método P&O é o mais operado devido sua facilidade de implementação e sua eficiência. O algoritmo é baseado em curvas características, método de perturbar e observar, em que um pequeno aumento de tensão ou corrente é aplicado e as mudanças de potência são verificadas. Se a potência fornecida pelo painel aumentar, o algoritmo continuará a interferir na mesma direção. Porém, se a energia cair, na próxima iteração a perturbação ocorrerá na direção oposta. Desta forma, o algoritmo P&O faz com que a variação do valor de referência se aproxime do ponto máximo de potência. A forma como o rastreo é feito é representado na Figura 10 pelo fluxograma do método.

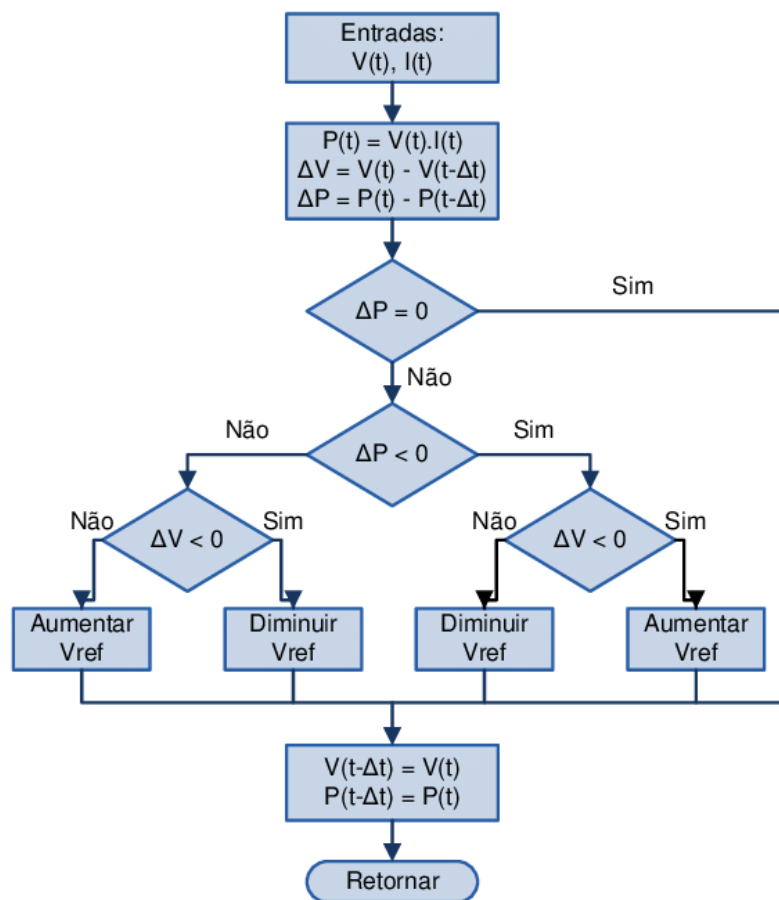


Figura 10 – Fluxograma para método Perturbe e Observe

Fonte: MOÇAMBIQUE (2012).

Calcula-se instantaneamente a corrente e tensão do painel e, em seguida, o valor da potência. Toda vez que o algoritmo é iniciado, a diferença entre a potência atual e a anterior é calculada. Se a potência atual for maior, significa que a operação está sendo realizada na direção de máxima potência, se for menor, faz uma nova aproximação de MPPT para a potência anterior. Se as condições de temperatura ou radiação solar mudarem, a condutividade também mudará. Portanto, uma nova tensão de referência será calculada com base no ponto de operação atual do sistema (LIMA *et al.*, 2019).

2.5.2 Condutância Incremental

O método de condutância incremental leva em conta a condutância de valores exatos e instantâneos do módulo e sua condutância incremental. Para amostrar a condutância, tanto a corrente instantânea quanto a tensão instantânea precisam ser amostradas e por meio das mesmas, pode-se derivar a potência obtida pela tensão e tendo como resultado a equação

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(VI)}{dV} = V \frac{dI}{dV} + I = 0. \quad (1)$$

Reajustando, obtemos a equação

$$\frac{1}{V} \frac{dP}{dV} = \frac{I}{V} + \frac{dI}{dV}. \quad (2)$$

É por meio da averiguação das equações que o método da condutância incremental opera. Basicamente, compara-se a condutância e condutância incremental, em que lado do pico da curva característica a matriz de painéis opera, ou seja, se a derivada de P e V é positiva ou negativa. Em seguida, implementa-se o ciclo de trabalho no inversor CC-CA no sentido de

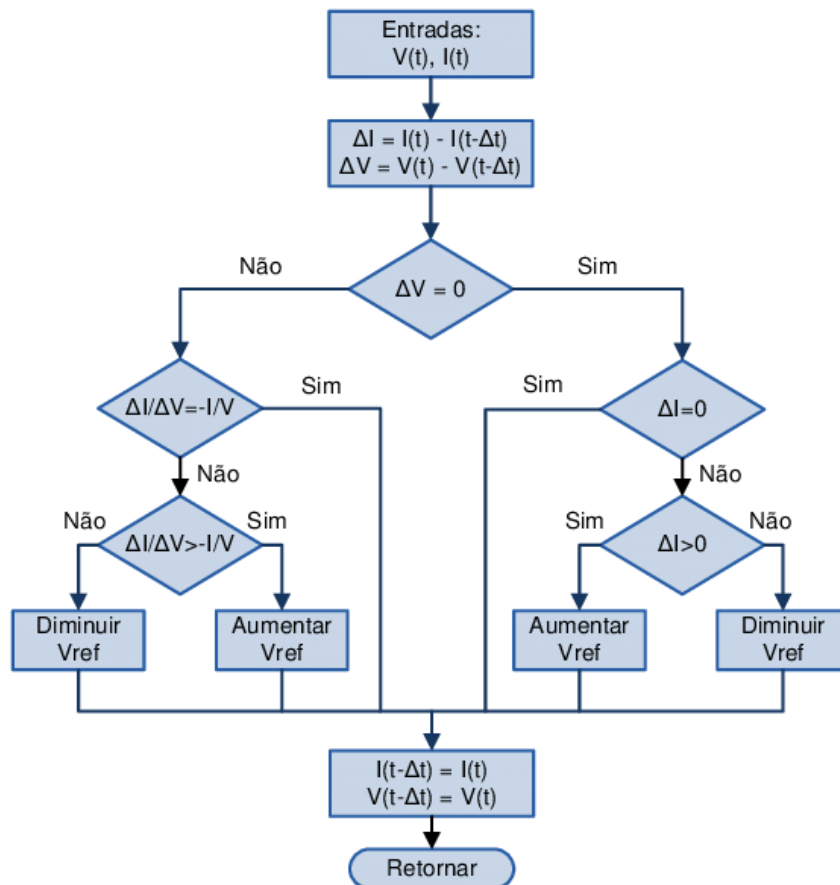


Figura 11 – Fluxograma para método condutância

Fonte: MOÇAMBIQUE (2012).

mover o ponto de trabalho para o topo da curva $P \times V$ (LIMA *et al.*, 2019). A Figura 11 apresenta o fluxograma do método da condutância incremental. Este método busca o MPPT da mesma forma que o método P&O. O controle não incrementa o ciclo de trabalho e mantém o mesmo estado, pois já se está no MPPT.

O método de condutância incremental tem bom desempenho e eficiência porque tem um erro de estado estacionário muito baixo, que depende inteiramente do intervalo ajustado no algoritmo de ponto de máxima potência. Devido à sua complexidade, esse método é mais intensivo computacionalmente, pois várias operações de divisão precisam ser realizadas em cada iteração.

2.6 Usina solar fotovoltaica

As usinas solares fotovoltaicas geralmente são compostas por um grande número de painéis solares podendo ser instalados em uma área ampla, incluindo áreas urbanas, rurais e remotas, dependendo das necessidades de energia da região. Na Figura 12 a usina instalada é em um amplo terreno. A energia elétrica gerada pelos painéis solares é coletada em inversores que convertem a energia de corrente CC gerada pelos painéis solares em corrente CA, que é a forma de energia elétrica utilizada na rede elétrica.



Figura 12 – Usina fotovoltaica localizada na Bahia

Fonte: HCC (2022).

No entanto, a construção de uma usina solar fotovoltaica pode ser um investimento significativo em termos de custos iniciais e a eficiência da geração de energia pode ser afetada por condições climáticas, como nuvens e chuva. Além disso, a geração de energia solar é intermitente, ou seja, depende da disponibilidade de luz solar, podendo não estar disponível em dias nublados e nunca está durante a noite.

Apesar dessas limitações, as usinas solares fotovoltaicas estão se tornando cada vez mais populares em todo o mundo, à medida que a demanda por energia limpa e renovável continua a crescer. As tecnologias de painéis solares estão em constante evolução e a eficiência de conversão de energia está melhorando continuamente, tornando a energia solar cada vez mais destaques.

Antes de construir uma usina solar, é importante realizar um estudo do local para avaliar a viabilidade da instalação. Alguns dos fatores a serem considerados incluem:

1. Irradiação solar: É importante avaliar a quantidade de luz solar que atinge a área onde a usina solar será instalada. Isso pode ser feito por meio de medições diretas ou por meio de dados de satélite;
2. Topografia: A topografia do terreno pode afetar a eficiência da geração de energia, uma vez que a inclinação e a orientação dos painéis solares podem influenciar a quantidade de luz solar que eles recebem;
3. Clima: O clima da região pode afetar a geração de energia solar, já que condições climáticas como nuvens, chuva e neve podem afetar a quantidade de luz solar disponível;
4. Acesso à rede elétrica: É importante avaliar a capacidade da rede elétrica local para acomodar a energia gerada pela usina solar e garantir que haja conexão suficiente para transmitir a energia gerada para o ponto de consumo;
5. Restrições ambientais e regulatórias: É importante verificar se há restrições ambientais ou regulatórias que possam impedir a instalação de uma usina solar na área selecionada.

Com base nessas informações, segundo (SOUZA; MOURA; COSENZA, 2021), pode-se determinar se o local é adequado para a construção de uma usina solar e quais seriam os requisitos para garantir sua viabilidade.

2.6.1 Usina fotovoltaica sobredimensionada por painéis solares

Uma usina sobredimensionada por painéis solares pode apresentar problemas de limitação no inversor. Isso ocorre pois o inversor é projetado para converter a energia elétrica produzida pelos painéis solares em energia elétrica utilizável para a rede elétrica.

O inversor tem uma capacidade de entrada máxima de energia elétrica que pode ser convertida e enviada para a rede elétrica. Se a usina fotovoltaica é sobredimensionada por painéis solares e a capacidade total de produção de energia elétrica excede a capacidade de entrada máxima do inversor, a energia produzida pelos painéis solares que não pode ser convertida pelo inversor será perdida.

O sobredimensionamento é de muito uso em prática nos dias de hoje. Muitos projetistas já consideram para melhor aproveitamento do espaço e investimento. Sendo assim, os inversores são projetados também para receber essa potência extra, sem que haja danos. No entanto, um sobredimensionamento excessivo pode superaquecer o inversor, diminuindo sua vida útil.

2.7 Armazenamento fotovoltaico

O armazenamento fotovoltaico é a capacidade de armazenar a energia elétrica gerada por painéis solares em baterias ou outros dispositivos de armazenamento, para que essa energia possa ser utilizada posteriormente, quando a geração solar não é suficiente para atender a demanda de consumo. Atualmente, existem várias tecnologias de armazenamento, em vários estágios de maturidade. Essas tecnologias permitem converter a energia elétrica em outra forma de energia que possa ser armazenada.

Cada tecnologia possui suas vantagens e desvantagens, sendo as mais usadas baterias e supercapacitores. Com a melhoria contínua da tecnologia, os armazenamentos recarregáveis desempenha papel fundamental em sistemas fotovoltaicos, sendo responsável por armazenar o excesso de energia gerada pela matriz de módulos e alimentar cargas CC e CA quando a potência gerada pelo gerador fotovoltaico é insuficiente.

As baterias são a forma mais comum de armazenamento de energia em sistemas fotovoltaicos, devido à crescente procura de carros elétricos, que utilizam majoritariamente baterias de íon de lítio. As tecnologias para este tipo de baterias têm avançado significativamente e os seus custos diminuem cada vez mais, o que favorece a sua aplicação também no setor do armazenamento de energia (CAZZOLA *et al.*, 2016).

As baterias podem ser dimensionadas de acordo com a necessidade de armazenamento e são capazes de armazenar a energia gerada pelos painéis solares durante o dia e fornecê-la durante a noite ou em dias nublados. Vale ressaltar que a escolha de bateria utilizada em cada sistema fotovoltaico depende de vários fatores importantes que devem ser levados em conta na escolha. Em (BUENO; BRANDÃO, 2016) é definido alguns conceitos importantes para a escolha, como:

1. Capacidade de armazenamento: A capacidade de armazenamento de energia é uma medida de quanto energia a tecnologia de armazenamento pode armazenar;
2. Eficiência: A eficiência é a relação entre a quantidade de energia armazenada e a quantidade de energia consumida para armazenar essa energia. Uma tecnologia de armazenamento eficiente é capaz de armazenar mais energia com menos perda de energia durante o processo;
3. Tempo de vida útil: O tempo de vida útil de uma tecnologia de armazenamento é a quantidade de tempo que ela pode ser utilizada antes de precisar de manutenção ou

substituição. É importante escolher uma tecnologia de armazenamento com uma longa vida útil para garantir um retorno do investimento. A vida útil de uma bateria é visto pelo seu número de ciclos ou intervalo de tempo que ela pode ser sujeita a trabalho sem apresentar nenhuma falha. Em uma geração fotovoltaica, o número de ciclos depende da profundidade da descarga do mesmo, sendo essas cargas/descargas diárias, tendo necessidade de um controle das mesmas;

4. Velocidade de carregamento: A velocidade de carregamento é a quantidade de tempo que leva para a tecnologia de armazenamento ser carregada completamente. Uma tecnologia de armazenamento com uma velocidade de carregamento rápida é importante para situações em que a energia precisa ser armazenada rapidamente, verificando sempre se não esta degradando sua vida útil;
5. Segurança: A segurança é uma preocupação importante na escolha de uma tecnologia de armazenamento de energia. A tecnologia de armazenamento deve ser segura para uso e armazenamento, sem risco de vazamentos, explosões ou incêndios.

Essas são apenas algumas das características importantes a serem consideradas na escolha de uma tecnologia de armazenamento de energia. É importante avaliar cuidadosamente as necessidades de armazenamento de energia de uma determinada aplicação antes de escolher a tecnologia de armazenamento mais adequada.

Quando uma bateria é descarregada, ela sofre uma degradação química que pode reduzir sua capacidade de armazenamento de energia ao longo do tempo. A profundidade de descarga pode afetar a velocidade dessa degradação. Por isso, é importante levar em consideração a profundidade de descarga ao escolher um dispositivo de armazenamento de energia. É necessário dimensionar a capacidade de armazenamento da bateria para a demanda de energia esperada, de forma a evitar descargas profundas frequentes que possam afetar a vida útil da bateria. No gráfico da Figura 13 tem-se um exemplo da relação entre ciclos de uma bateria e sua profundidade de descarga. Quanto maior a profundidade de descarga, menor é seu número de ciclos, ou seja, podendo afetar diretamente na sua vida útil e desempenho da bateria.

Outra importante análise a ser feita, é referente ao estado de carga – do inglês, *State of Charge* (SoC), utilizado para referir ao nível de carga ou energia armazenada na bateria. Geralmente medido em porcentagem, onde 0% representa uma bateria totalmente descarregada e 100% uma bateria completamente carregada. No entanto, a relação entre o nível de carga da bateria e sua voltagem não é linear, o que significa que a tensão da bateria não é um indicador preciso do seu estado de carga.

Para determinar com precisão o estado de carga de uma bateria, é necessário usar um medidor de carga ou um dispositivo de monitoramento que mede a corrente, a tensão e outros parâmetros da bateria para calcular sua capacidade restante. Isso é especialmente importante em aplicações críticas onde uma bateria descarregada pode causar falhas no sistema ou perda de dados.

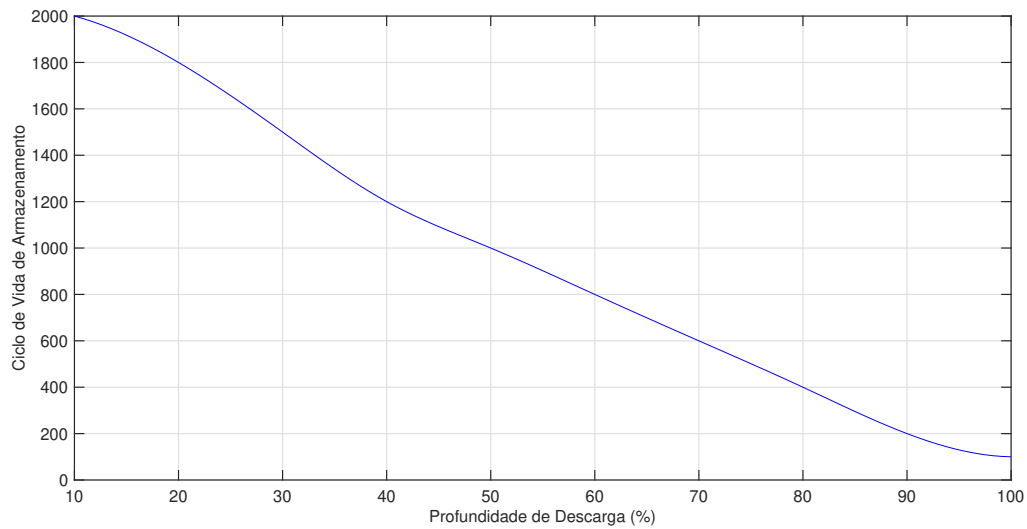


Figura 13 – Ciclos de vida em função da profundidade de descarga

Fonte: Adaptado de Pereira *et al.* (2016).

2.8 Controlador de carga

Um conversor controlador de carga é um componente importante de uma usina solar fotovoltaica. Ele tem a função de controlar a carga elétrica que é gerada pelos painéis solares, garantindo que a energia seja utilizada de forma eficiente e segura. O controlador também tem a função de monitorar a carga da bateria de armazenamento, garantindo que a bateria não seja sobrecarregada ou descarregada em excesso. Eles podem incluir recursos como monitoramento remoto e gerenciamento de dados para fornecer informações detalhadas sobre o desempenho da usina solar.

Existem diversos tipos de conversores controladores de carga disponíveis no mercado, e a escolha do modelo adequado depende das especificidades da usina solar, incluindo a capacidade de geração de energia, a tensão de saída e a quantidade de baterias de armazenamento. É importante escolher um conversor controlador de carga de qualidade para garantir a segurança e a eficiência da usina solar.

Os controladores de carga para sistemas fotovoltaicos devem cumprir o fornecimento de energia pelo painel fotovoltaico no momento do carregamento. No entanto, existem algumas diretrizes gerais que podem ser seguidas para o carregamento, como algoritmos de carga, onde o controlador utiliza um algoritmo específico para garantir uma carga eficiente e segura do armazenamento, como o MPPT. A estratégia de carga mais utilizada para o processo de carregamento da bateria é dividida em três estágios, como pode ser visto na Figura 14, descritos abaixo:

1. Estágio de carga profunda: Neste estágio, a bateria é carregada rapidamente com a corrente constante máxima possível, até que sua tensão atinja um valor pré-definido, geralmente cerca de 80% a 90% da capacidade total da bateria;
2. Estágio de absorção: Neste estágio, a tensão da bateria é mantida em um nível constante para permitir que a bateria absorva a carga restante e atinja sua capacidade total;
3. Estágio de flutuação: Neste estágio, a tensão da bateria é reduzida para um nível mais baixo e mantida constante para manter a bateria carregada e pronta para uso.

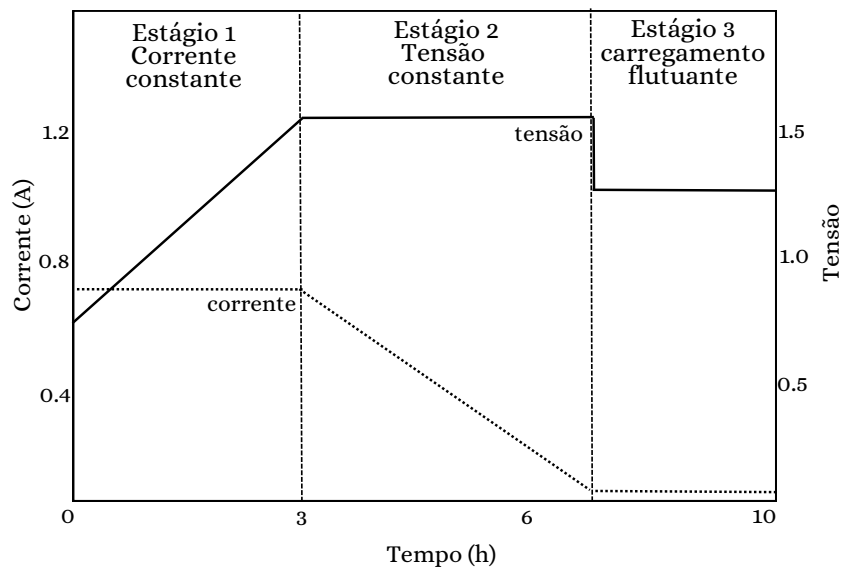


Figura 14 – Estágios de carga
Fonte: Adaptado de Saad (2012).

Alguns controladores de carga de bateria também possuem recursos adicionais, como a capacidade de monitorar a temperatura da bateria e ajustar a corrente de carga de acordo, ou a capacidade de fornecer informações de carga e descarga para um sistema de monitoramento externo.

O objetivo dos estágios de controle de carga de bateria é maximizar a vida útil da bateria, garantindo que ela seja carregada corretamente e protegida contra danos causados por sobrecarga ou descarga excessiva. Cada estágio é projetado para otimizar a carga da bateria em diferentes pontos do processo de carregamento, permitindo que ela seja carregada de forma eficiente e segura.

Alguns sistemas mais avançados, os controladores de carga oferecem recursos adicionais de descarregamento, como controle de carga/descarga, proteção contra descarga profunda e monitoramento do estado do armazenamento. Esses recursos podem permitir que o controlador de carga atue no processo de descarga da bateria. A estratégia de descarregamento é

específica para cada projeto, algumas possíveis estratégias mais usadas, é visto em (BARSUKOV; QIAN, 2013), podendo ser consideradas:

1. Controle de carga/descarga programado: Funciona de modo a programar para ativar ou desativar a carga ou sobrecarga em horários específicos ou em atuações específicas. Definindo alguns limites de descarga para evitar a descarga excessiva do armazenamento, o que pode degradar a vida útil.
2. Proteção contra descarga profunda: O controlador de carga monitora a tensão do armazenamento e para automaticamente de descarregar quando a tensão atinge um nível mínimo predefinido. Isso evita que o armazenamento descarregue demais, o que pode prejudicar sua capacidade de armazenar energia.
3. Controle de descarga do estado de carga: um controlador de carga pode limitar a taxa de descarga do armazenamento com base no estado de carga. Por exemplo, pode ser configurado para reduzir a taxa de descarga quando a bateria está fraca e permitir uma taxa de descarga mais alta quando a bateria está alta.

Importante ressaltar que nem todos os controladores de carga possuem recursos avançados de controle de carga/descarga. Esses recursos podem variar dependendo do modelo e especificação do controlador de carregamento usado.

3 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

Com o interesse do estudo de viabilidade para o projeto do armazenamento, nesse capítulo é apresentado o detalhamento da usina fotovoltaica sobredimensionada estudada neste trabalho como também seus métodos e materiais utilizados. Por fim, é dimensionado o armazenamento proposto. São mostrados valores e gráficos de modo a se observar as configurações da proposta de armazenamento.

A usina fotovoltaica estudada esta sobredimensionada, é uma usina que está em operação, contendo uma potência ceifada pelo limite do inversor. Através de uma pesquisa descritiva e informações diretas, obteve-se a coleta de dados necessários para o estudo e análise computacional da modelagem do sistema da usina fotovoltaico via plataforma computacional software MATLAB. Como principal ferramenta será utilizada a extensão Simulink, para que seja possível a montagem do modelo do sistema.

3.1 Painéis fotovoltaicos

A Tabela 1 abaixo trás informações retiradas do *datasheet* do módulo fotovoltaico BiHiKu7 - CS7N-650MB-AG da marca (CANADIANSOLAR, 2022), material monocristalino, considerando as condições de teste padrão Standard Test Conditions (STC), utilizados na usina fotovoltaica presente neste trabalho.

Tabela 1 – Datasheet módulo CanadianSolar BiHiKu7

Parâmetros	Valor
Tensão nominal	120/240V
Tensão de circuito aberto	45.0 V
Corrente de circuito aberto	18.39 A
Eficiência	20.9%
Garantia	10 anos

Fonte: Adaptado de CanadianSolar (2022).

Com o *datasheet* dos módulos usados na usina, é necessário entendimento do modelo eletricamente equivalente. O circuito equivalente de uma célula fotovoltaica pode ser representado por um modelo de diodo ideal conectado em paralelo com uma fonte de corrente por tensão e um resistor em série com o diodo, apresentado na Figura 15. Em resumo, o circuito equivalente de uma célula fotovoltaica é usado para representar a relação entre a tensão e a corrente em uma célula fotovoltaica sob diferentes condições de iluminação e temperatura, que podem ser descritas conectando um modelo de diodo ideal em paralelo com uma fonte controlada. A corrente flui através da tensão e da resistência em série. A saída da fonte de corrente é proporcional à luz incidente sobre células. O diodo determina as características $I - V$ da célula.

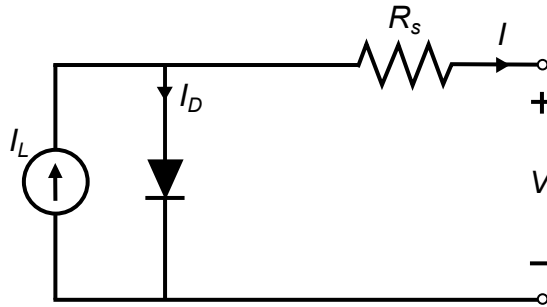


Figura 15 – Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica
Fonte: Autoria própria (2023).

Para este circuito, é chamado de modelo de circuito equivalente ideal de uma célula fotovoltaica, onde não é considerado resistência paralela (R_p) e outros efeitos não lineares presentes no dispositivo real. É incluído a dependência da temperatura da fotocorrente I_L e a corrente de saturação do diodo I_D . Contém um resistor da série R_s , que representa a resistência interna da célula, que são as perdas presentes internas devido as resistência dos materiais utilizados na célula fotovoltaica. Por fim, resultando em uma representação mais precisa do comportamento do dispositivo. Um único diodo *shunt* foi usado com o fator de qualidade do diodo definido para obter a melhor correspondência de curva.

As equações que descrevem as características $I - V$ da célula são obtidas a partir da Lei de Kirchhoff das Correntes. A corrente produzida pela célula é igual à produzida pela fonte de corrente, a menos da que flui através do diodo, de modo que

$$I = I_L - I_D, \quad (3)$$

em que I a corrente de saída, I_L a corrente gerada pelos fótons sendo diretamente proporcional à radiação e I_D a corrente que através do diodo. Essas correntes dependem da tensão aplicada sobre elas da forma

$$V_c = V + I \cdot R_s, \quad (4)$$

em que V_c a tensão no terminal do diodo, V a tensão entre os terminais de saída, I a corrente de saída, e R_s o resistor de carga em série.

Por fim, corrente que passa pelo diodo é dada pela equação de Shockley para o diodo ideal. Desta forma a equação da corrente que representa a corrente de saída do painel é dado por

$$I = I_L - I_0 \left(\exp \left(\frac{V + I \cdot R_s}{(n \cdot k \cdot T)/q} \right) - 1 \right). \quad (5)$$

em que:

I é a corrente na célula solar [A]

I_L a corrente gerada pela célula quando exposta à luz solar [A]

I_0 a corrente de saturação reversa do diodo [A]

V a tensão na carga [V]
 q a carga elementar ($1.60\text{e-}19$ [C])
 n o fator de qualidade do diodo (1.2)
 k a constante de Boltzmann ($1.38\text{e-}23$ [J/K])
 T a temperatura absoluta da junção P-N [K]
 R_s a resistência série [Ω]

Para obtenção das curvas experimentais, todas as constantes nas equações acima podem ser determinadas examinando o *datasheet* do fabricante do painel fotovoltaico juntamente com as demais equações. Para esta aplicação será utilizado o método do Newton Raphson. O valor da resistência em série pode variar com a temperatura e irradiância.

As Figuras 16 e 17, respectivamente, ilustram as curvas características $I \times V$ (corrente x tensão) e $P \times V$ (potência x tensão) com diferentes valores de irradiância solar (1000 W/m^2 , 950 W/m^2 , 900 W/m^2 , 850 W/m^2 e 800 W/m^2) que ocorrem ao longo do dia na região de instalação da usina fotovoltaica segundo (DIAS *et al.*, 2019) e temperatura constante de $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Os gráficos são resultantes da modelagem matemática da célula solar a partir da Equação (5), utilizando os dados do *datasheet* do painel da Tabela 1, em que verifica-se que a corrente de saída e a potência dependem da irradiação solar.

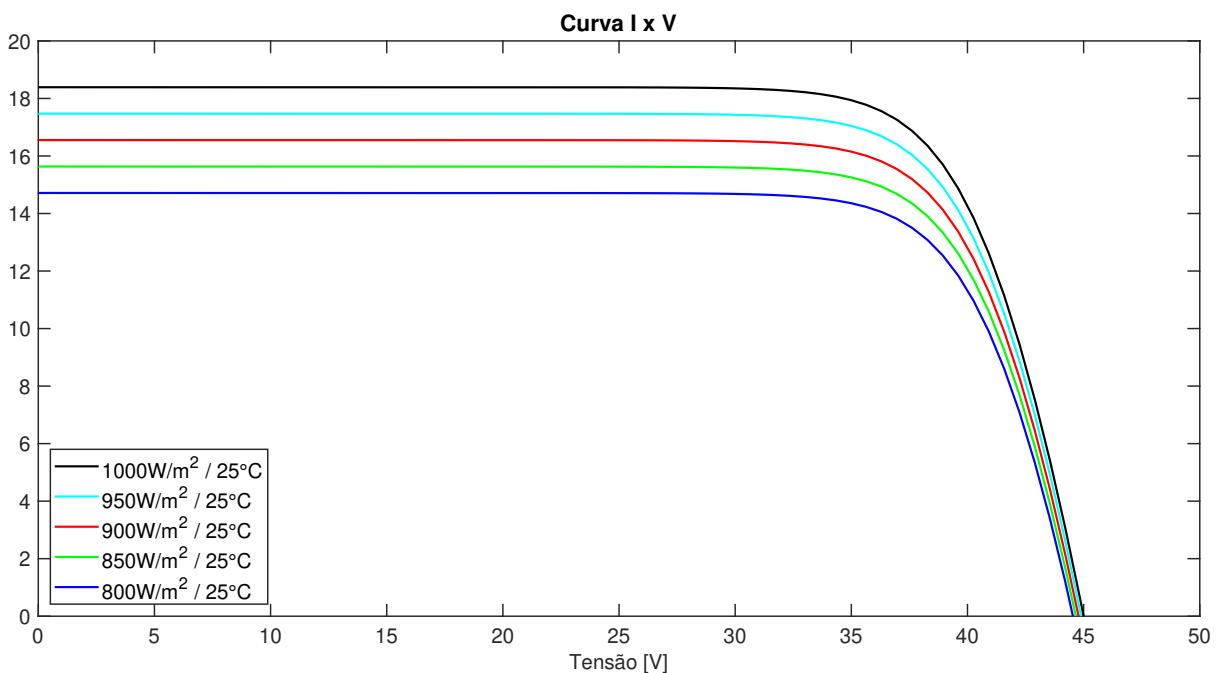


Figura 16 – Curva I-V para diferentes irradiações solares
Fonte: Adaptado do *datasheet* da CanadianSolar (2022).

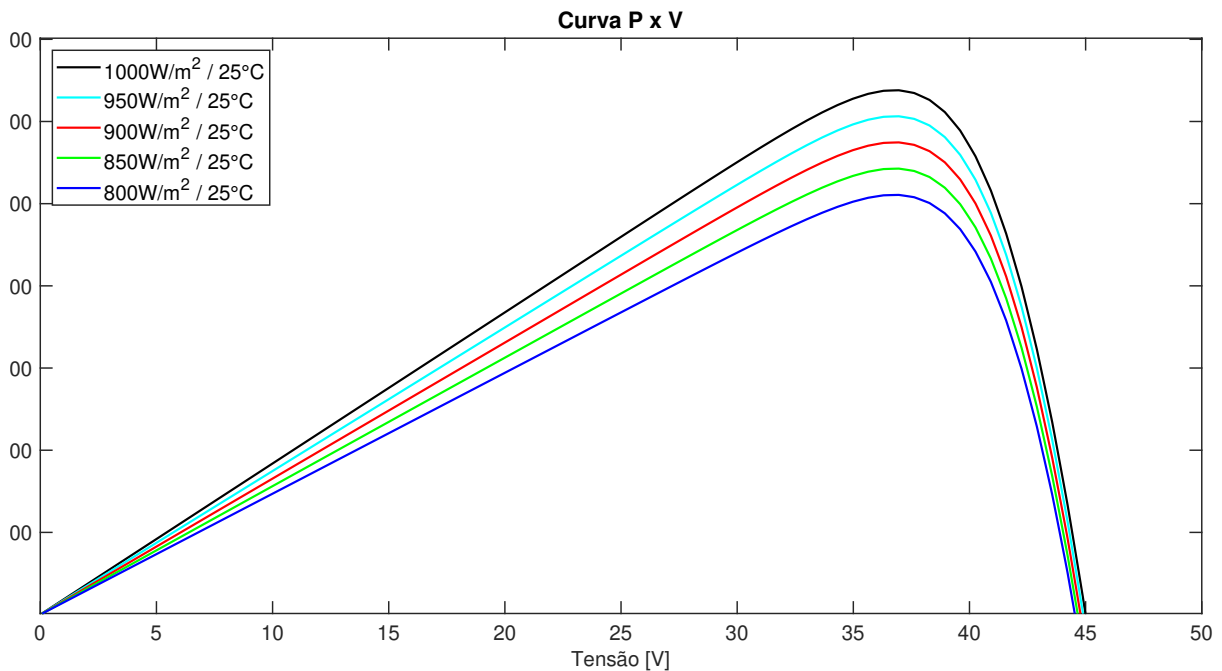


Figura 17 – Curva P-V para diferentes irradiâncias solares
Fonte: Adaptado do *datasheet* da CanadianSolar (2022).

3.2 Sistema fotovoltaico acoplado ao algoritmo MPPT

Um único módulo fotovoltaico tem uma potência de saída muito baixa, portanto, para aplicações práticas, é necessário combiná-lo em série e paralelo para atender às condições de tensão e potência para formar uma string. O sistema fotovoltaico estudado é composto por um arranjo fotovoltaico composto por dez fileiras (*strings*) em paralelo. A implementação em ambiente Simulink foi realizada com 20 módulos série em cada, ou seja, um sistema fotovoltaico formado por 200 módulos. Para implementação foi usado um algoritmo de entrada de irradiância elaborado com as irradiâncias de acordo com a região do sistema.

Com esses dados, pode-se dimensionar a potência total da forma

$$P_{fv} = N_m \times P_n, \quad (6)$$

em que P_{fv} a potência do sistema fotovoltaico, N_m é o número de módulos fotovoltaicos e P_n a potência nominal máxima do módulo.

As condições meteorológicas de irradiância e temperatura interferem de forma não linear na corrente e tensão de saída do painel fotovoltaico, fazendo com que ocorram constantes mudanças na potência de saída. Portanto, é importante implementar um método para obter o rastreamento de ponto de desempenho máximo, como o método MPPT.

Para análise do estudo, foi optado pelo método P&O, sendo uma entrada no MPPT para cada *string*, ou seja são 20 painéis fotovoltaicos em cada entrada. Esse método foi desenvolvido por uma técnica de algoritmo inteligente e adaptado para simulação computacional no *MATLAB*

Simulink. O diagrama da Figura 18 mostra as entradas do fluxograma utilizado, primeiramente o é colocado uma frequência para o funcionamento do algoritmo, a tensão do barramento CC e a corrente do painel. É então dado uma tensão inicial de referência, uma função para habilitar o MPPT e também um passo para atualizar a tensão. Por fim, na saída obtém-se a tensão final do barramento CC.

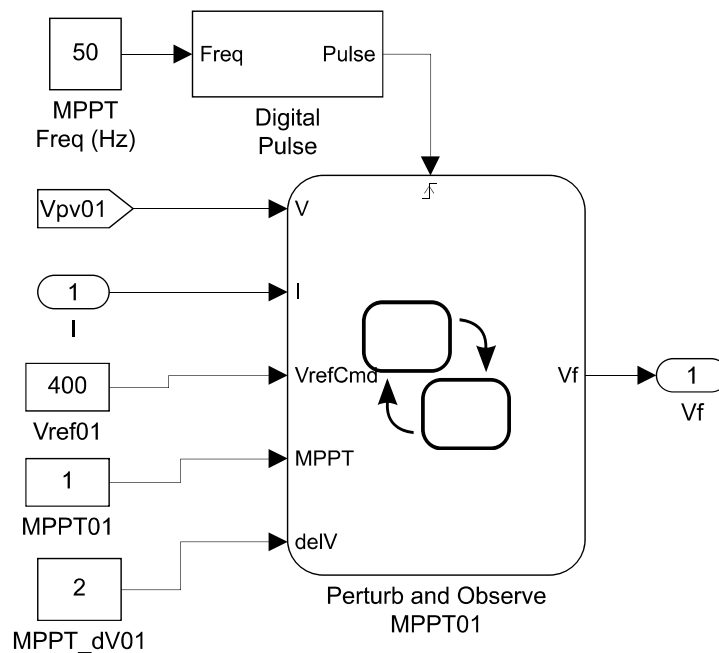


Figura 18 – Diagrama do controle MPPT

Fonte: Adaptado do (MATLAB, 2022).

Na Figura 19 tem-se o fluxograma do algoritmo P&O utilizado que é baseado em incrementos e decrementos periódicos. O algoritmo inicia com uma tensão e corrente do sistema, analisando então a potência fornecida. A partir desse ponto, calcula-se as variações de potência e tensão no sistema. O ciclo se repete sempre comparando a potência de saída com o valor anterior da mesma. Se a potência entregue aumentou, a perturbação continua na mesma direção no próximo ciclo, caso contrário, o algoritmo reverte a direção da perturbação. Isso significa que existe uma perturbação na tensão nos terminais do arranjo todo ciclo de execução do algoritmo. Quando o ponto de máxima potência é atingido, o algoritmo P&O oscila ao redor deste ponto.

No fluxograma, pode-se observar que em último momento é feito também a comparação de máxima e mínima tensão de referência, pois a tensão deve estar dentro da faixa estipulada para um bom funcionamento. Se a tensão do sistema for menor que a mínima, o painel não gera corrente e o MPPT não funcionará. Por outro lado, se a tensão máxima for maior que a tensão de máxima operação do painel, o painel pode ser danificado como também a eficiência do sistema pode ser reduzida, podendo causar até mesmo falha no MPPT pois não conseguirá rastrear o MPPT corretamente. A utilização do algoritmo MPPT permite aumentar a eficiência

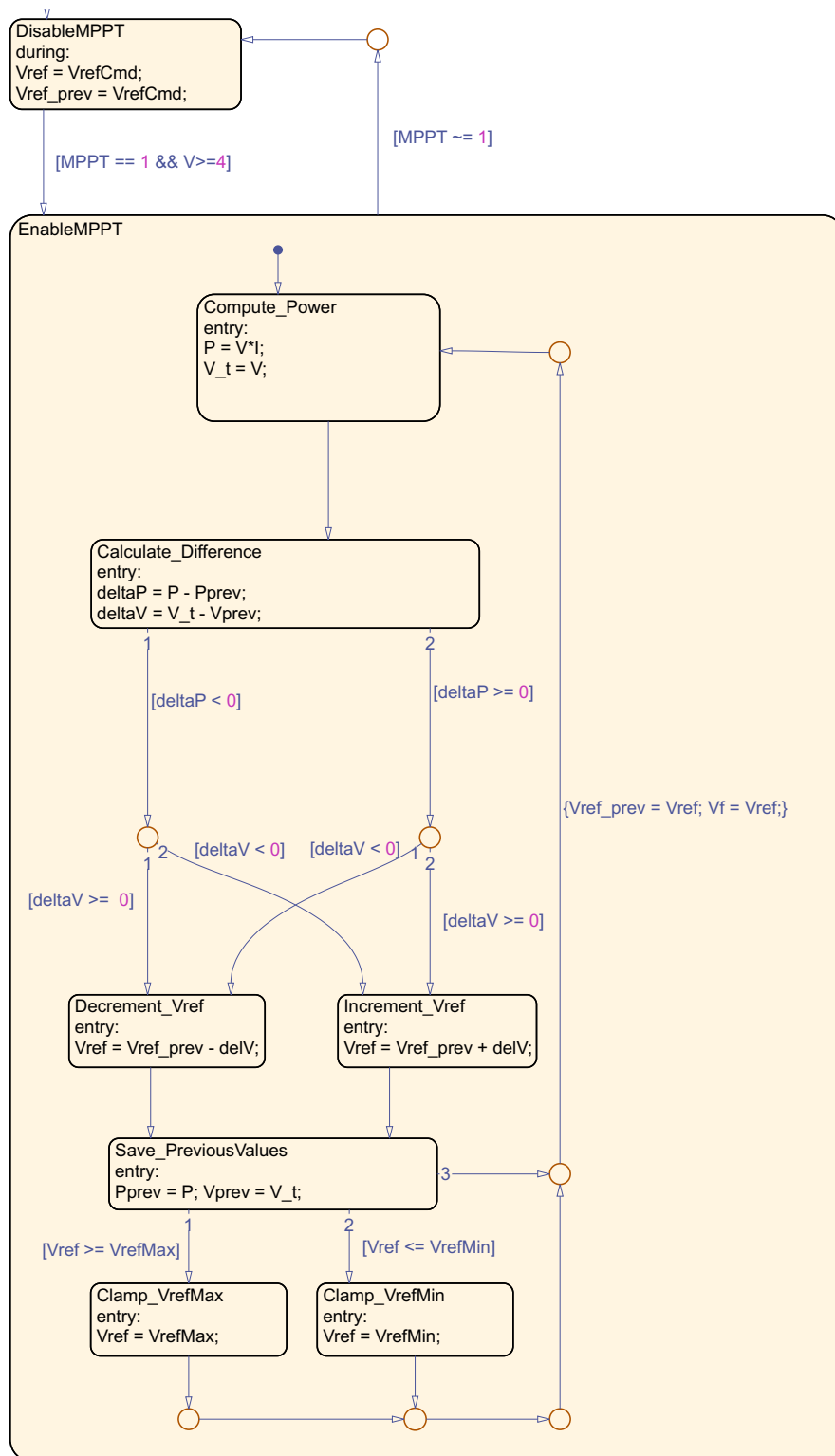


Figura 19 – Fluxograma do algoritmo MPPT

Fonte: Adaptado do (MATLAB, 2022).

da geração de energia solar em até 30%, o que pode resultar em uma redução significativa nos custos de eletricidade (BRUNO *et al.*, 2015).

Com a simulação do método foi possível verificar o ponto de máxima potência de cada *string*, sendo perturbado ao redor desse ponto e permanecendo sempre em uma máxima potência. Na Figura 20, tem-se a apresentação da curva MPPT da *string* 01, para diferentes valores médios de irradiâncias pertencentes a região de instalação da usina fotovoltaica, 800 W/m² a 1.000 W/m² segundo (DIAS *et al.*, 2019).

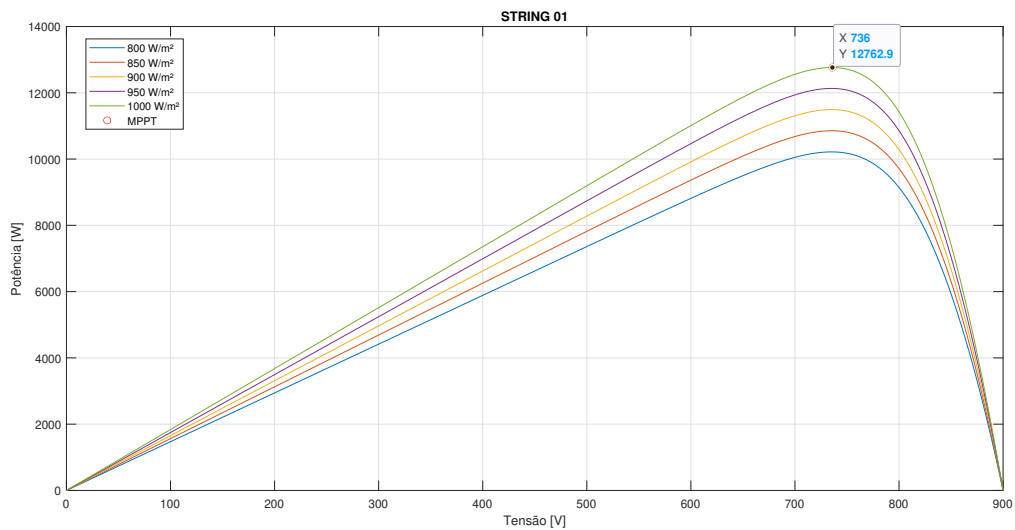


Figura 20 – Curva de máxima potência da *string* 01

Fonte: Autoria própria (2023).

Tem-se também a verificação da potência, tensão e corrente de saída em função do tempo dos módulos fotovoltaicos conectados na *string* 01 na Figura 21, para uma irradiância

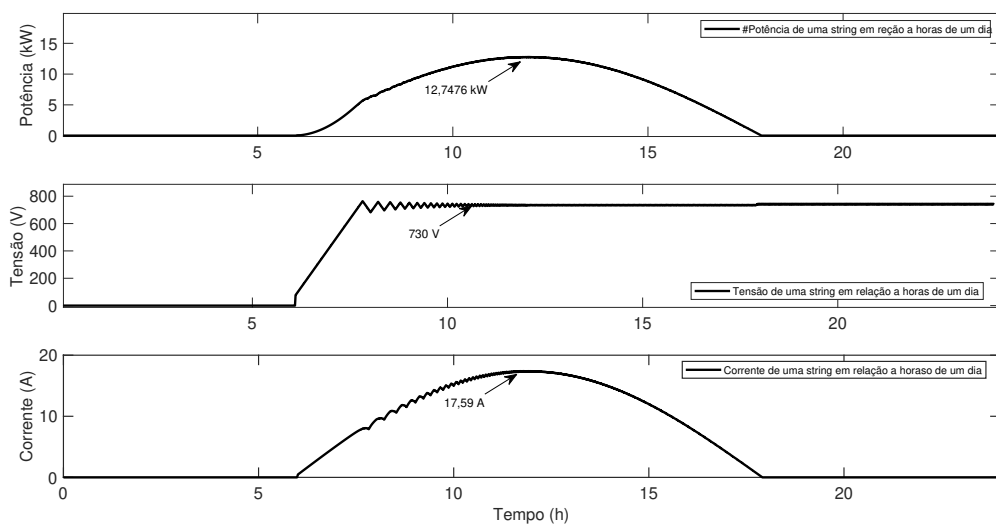


Figura 21 – Potência, tensão e corrente de saída da *string* 01

Fonte: Autoria própria (2023).

de 1000 W/m². Os quais são parâmetros essenciais para o dimensionamento adequado do sistema, a potência de saída é a quantidade de energia elétrica que são capazes de gerar em determinado tempo, a tensão está diretamente relacionada a eficiência da conversão de energia solar em energia elétrica, levando em conta também para garantir a compatibilidade com os equipamentos conectados à instalação solar. E a corrente de saída é outra medida fundamental para avaliar o desempenho do sistema, ela está diretamente relacionada à quantidade de energia elétrica gerada pelos módulos em determinado momento (FADIGAS, 2012b). Acompanhar a corrente de saída ao longo do tempo permite identificar reduções na geração de energia, identificar possíveis falhas nos painéis solares, cabos ou conexões. Para todas as *strings* foi calculado o mesmo modo.

3.3 Inversor

A usina fotovoltaica estudada é uma usina sobredimensionada por painéis solares, a qual possui uma capacidade de painéis instalados maior que o limite do inversor instalado. O inversor instalado é o SUN2000-100KTL-M1 da marca (HUAWEI, 2020), possuindo 10 entradas de MPPT. Cada entrada recebe uma string de 20 módulos. Os dados do *datasheet* do inversor foram transferidos para a Tabela 2.

Tabela 2 – Datasheet do inversor Huawei SUN2000-100KTL-M1

Parâmetros	Valor
Tensão nominal de entrada	600 V
Tensão máxima de entrada	1.100 V
Tensão nominal de saída	400 V, 3W + PE
Frequência nominal	50 Hz/ 60 Hz
Potência nominal	100 kW
Eficiência	98.8%

Fonte: Adaptado de Huawei (2020).

Na Figura 22 é representado mais em detalhe o máximo de potência em função do tempo do sistema da usina fotovoltaica com o uso do controle do MPPT, obtendo-se uma potência total de 127,767kWp. Dessa forma, pelo *datasheet* do inversor é possível verificar a potência que está sendo ceifada, em que uma parcela de 27,767 kW não está sendo injetada no inversor para energia da rede. O motivo desse ceifamento é pela usina possuir um sobredimensionamento ao qual o inversor não tem limite para capturar toda essa potência sobredimensionada pelos painéis.

O *datasheet* também fornece a informação de sua eficiência, de 98,8%. A eficiência é a relação entre a energia elétrica produzida pelo inversor e a energia elétrica que entra no inversor. Em outras palavras, é a porcentagem de energia elétrica que é convertida e enviada para a rede elétrica em relação à energia elétrica que é gerada pelos painéis.

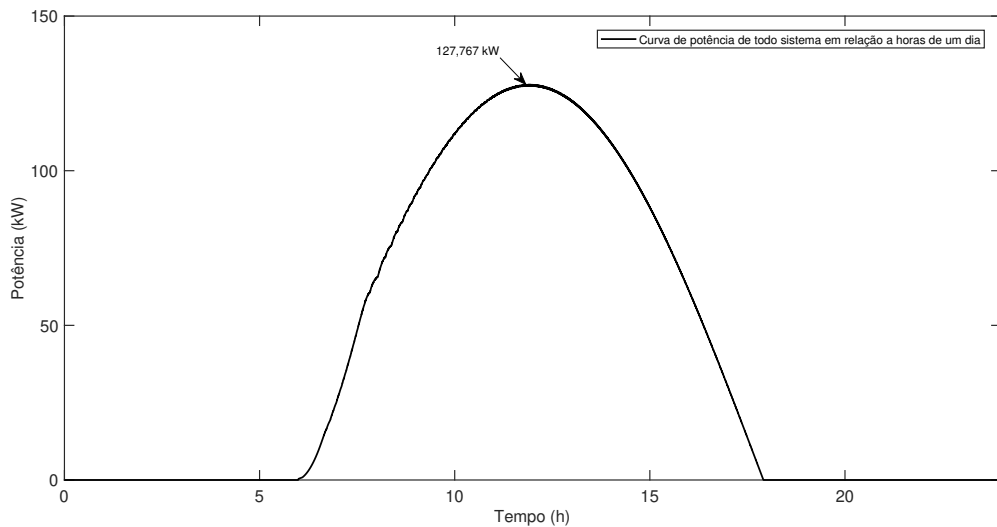


Figura 22 – Potência de todo o sistema fotovoltaico
Fonte: Autoria própria (2023).

3.4 Gerenciamento de controle

Em uma usina sobredimensionada que não possui entrada no inversor para armazenamento de energia e com propósito de não modificar o hardware, uma estratégia de gerenciamento de controle pode ser implementado. Esse controle pode atuar quando a usina produz mais energia do que o limite do inversor e não há como armazenar, podendo ser implementado de forma a detectar a potência ceifada e ativar o desvio de energia para o dispositivo de armazenamento, por meio do MPPT. De modo o MPPT carregue o armazenamento com máxima eficiência durante a geração e descarregue para alimentar o inversor quando necessário.

Na Figura 23, tem-se o gráfico da potência em função do tempo de um dia, o qual apresenta o sobredimensionamento do sistema como também o limite do inversor e a potência que será ceifada direcionada para o armazenamento.

Pelo *software* MATLAB Simulink foi executado o controle estratégico de gerenciamento juntamente com o conversor, utilizando a ferramenta de modelagem *stateflow*, que permite a criação de máquinas de estados e diagramas para descrever comportamento do sistema, de modo a detectar essa potência excessiva. O diagrama da Figura 24 mostra as entradas do fluxograma utilizado para controle. Para reduzir as dimensões do controlador, foi estipulado conectar apenas três strings do MPPT. Foi então conectado da *string* 01 a 03 separado no gerenciamento, de modo que só será utilizada as mesmas para desvio para o armazenamento, para que possa ser projetado o controle do conversor e o armazenamento em suas *strings*, de maneira a não interferir a potência das outras *strings* quando estiverem em funcionamento. Na entrada também foi adicionado um bloco *trigger* que permite que um sinal de gatilho seja enviado quando uma determinada condição for atendida.

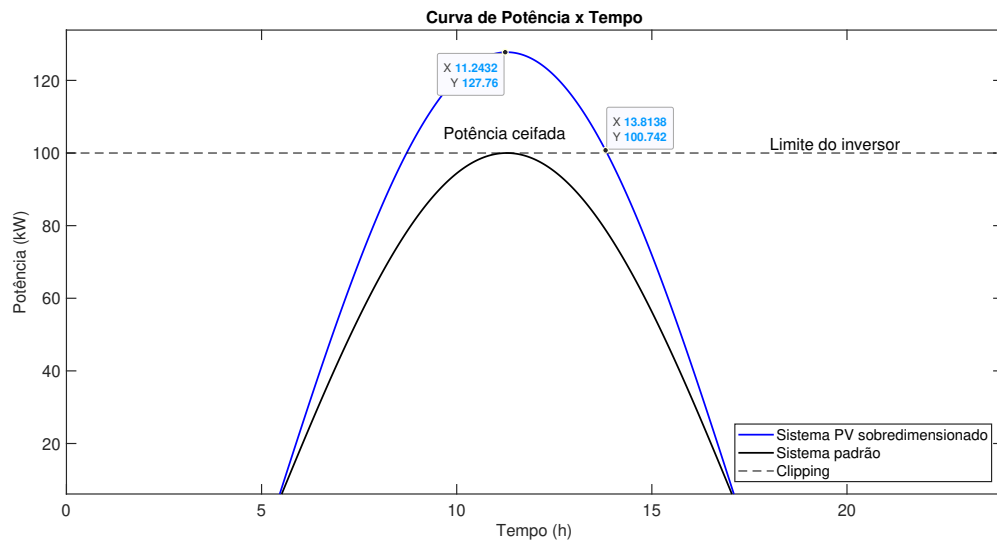


Figura 23 – Curva da potência pelo tempo em horas de um dia

Fonte: Autoria própria (2023).

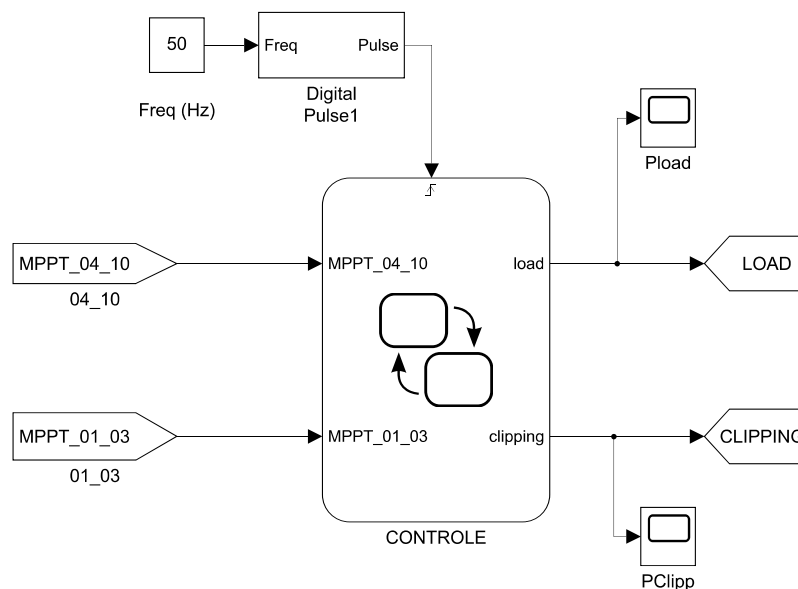


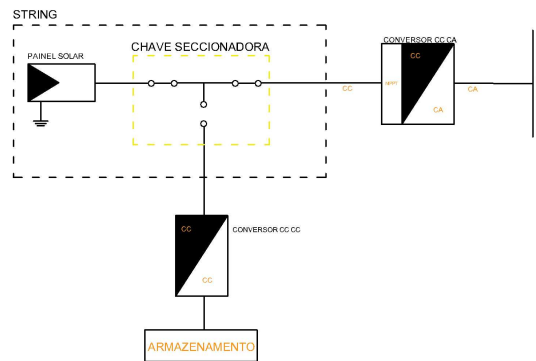
Figura 24 – Diagrama do controle de limite do inversor

Fonte: Autoria própria (2023).

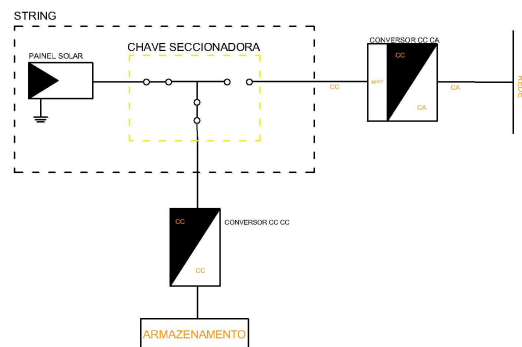
A chave seccionadora presente nas *strings* representadas pela Figura 25, irá fazer o controle dinâmico, tanto de conexão e desconexão dos painéis para armazenar a potência quanto também do armazenamento para o conversor CC-CA. Quando não necessita do armazenamento a chave segue como na Figura 25-a, na Figura 25-b a chave despacha a potência de *clipping* para o conversor CC-CC para então ser armazenada. E por fim a Figura 25-c do armazenamento para o inversor CC-CA.

Em primeiro momento, o algoritmo calcula a potência do sistema de usina fotovoltaica inteiro e direciona para a carga a potência até o limite do inversor. Quando a potência excede esse limite, acontece o efeito *clipping*, que neste caso, é desviado então para o armazenamento,

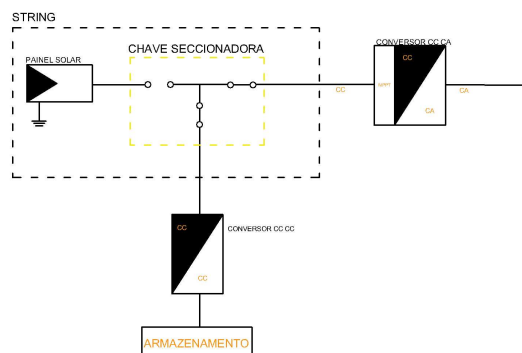
por uma chave seccionadora presente nas *strings*, representado na figura Figura 25. É feito então o retorno para sempre estar atualizando esse processo, para que quando haver a energia ceifada ela seja aproveitada. Esse processo pode ser visto na Figura 26 do *stateflow*.



(a)



(b)



(c)

Figura 25 – Diagrama unifilar do controle da chave seccionadora.

Fonte: Autoria própria (2023).

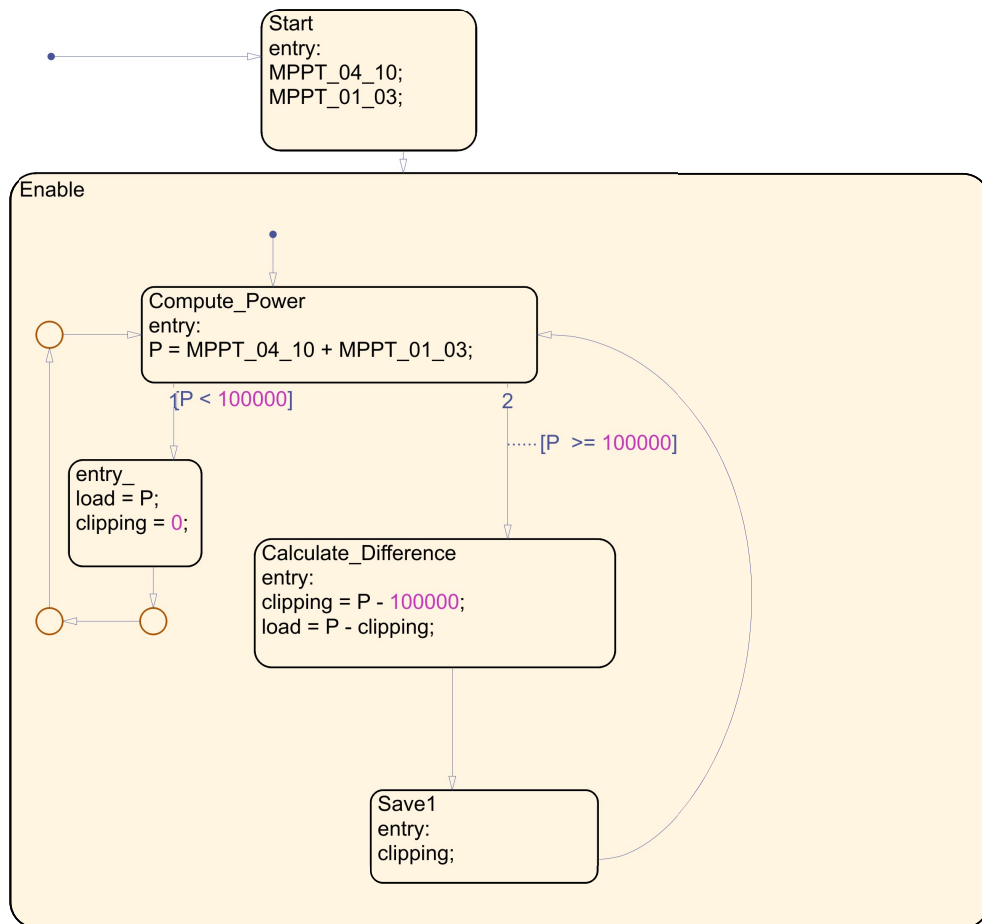


Figura 26 – Controle implantado no *Stateflow*
Fonte: Autoria própria (2023).

Apresentado pela Figura 27, pelo *scope* colocado em *load*, é possível observar que a potência foi limitada. E pelo *scope clipping* é apresentado a potência que está sendo ceifada e terá direcionamento para o armazenamento, mostrado na Figura 28.

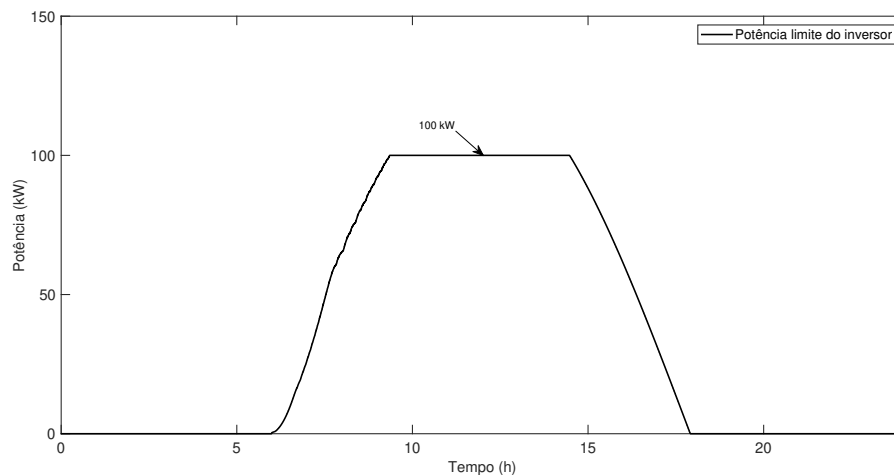


Figura 27 – Curva da potência de limite do inversor
Fonte: Autoria própria (2023).

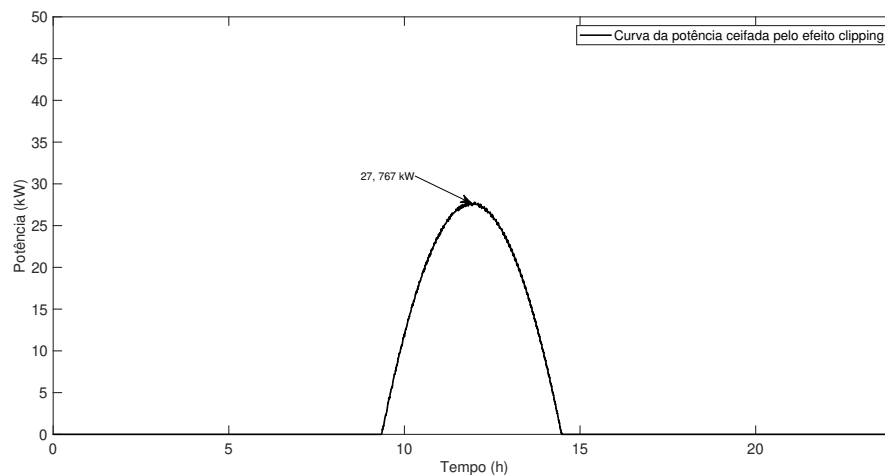


Figura 28 – Curva da potência ceifada pelo efeito clipping

Fonte: Autoria própria (2023).

3.4.1 Controle do conversor

Um controle de conversor CC-CC é executado de modo a carregar o armazenamento e descarregá-lo, usando o *stateflow* do Simulink.

Como visto nas simulações acima, o valor de potência do efeito *clipping* é 27,767 kWp, com base na Figura 21 onde é observado a potência somente em uma *string*, é considerado então que o conversor esteja ligado em três strings para suprir toda potência vinda do efeito *clipping*.

Para entrada necessária do controle, é necessário a entrada da potência ceifada, como também as três strings utilizadas para carregamento e descarregamento, e um timer para propor um horário de descarregamento quando não possui irradiância. Quando a potência vindo da *string* 01 alcança 10 kWp é retomado para a *string* 02 o carregamento, passando de 20 kWp é retomado pela *string* 03. Para operação do descarregamento, é considerado horário quando não possui irradiância solar de modo a suprir essa falta. Então quando é detectado horário após as 17:35 horas, é colocado um descarregamento de modo a ingerir potência na carga. No processo foi utilizado *timer* de 1055s pois para simulação foi utilizado que a cada 60 segundos equivale a uma hora. Como entrada no fluxo também foi utilizado o *energia clipping* que seria o valor da energia armazenada, que foi obtida realizando a integral da área da potência pelo tempo em ambiente *matlab* e então descarregar no *time* escolhido. Antes do descarregamento foi dividido a *battery* pelo valor das horas que eu quero descarrega-la, obtendo então a potência na carga. Com os retornos presente, o algoritmo consegue monitorar o estado da bateria, a disponibilidade de energia e os requisitos de carga e descarga. Esse processo de carregamento e descarregamento utilizado nesse trabalho é apresentado as entradas pelo diagrama da Figura 29 e as etapas do fluxo grama pela Figura 30.

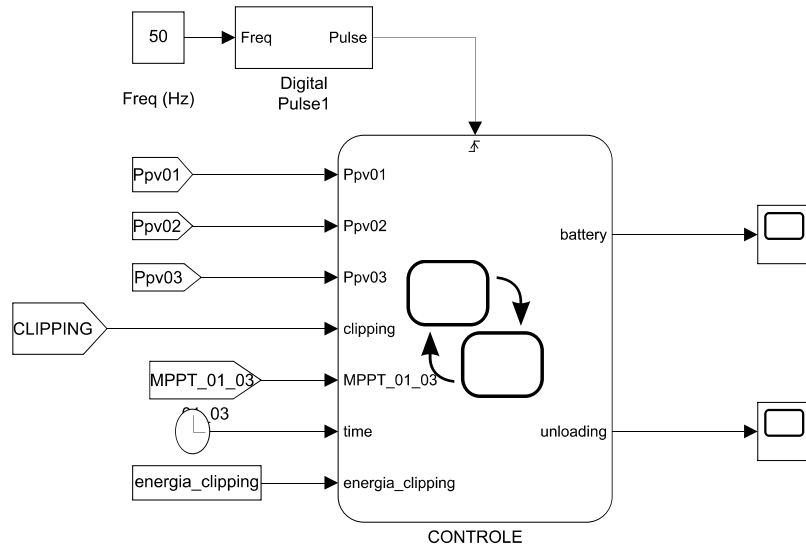


Figura 29 – Diagrama de entrada de carregamento e descarregamento
Fonte: Autoria própria (2023).

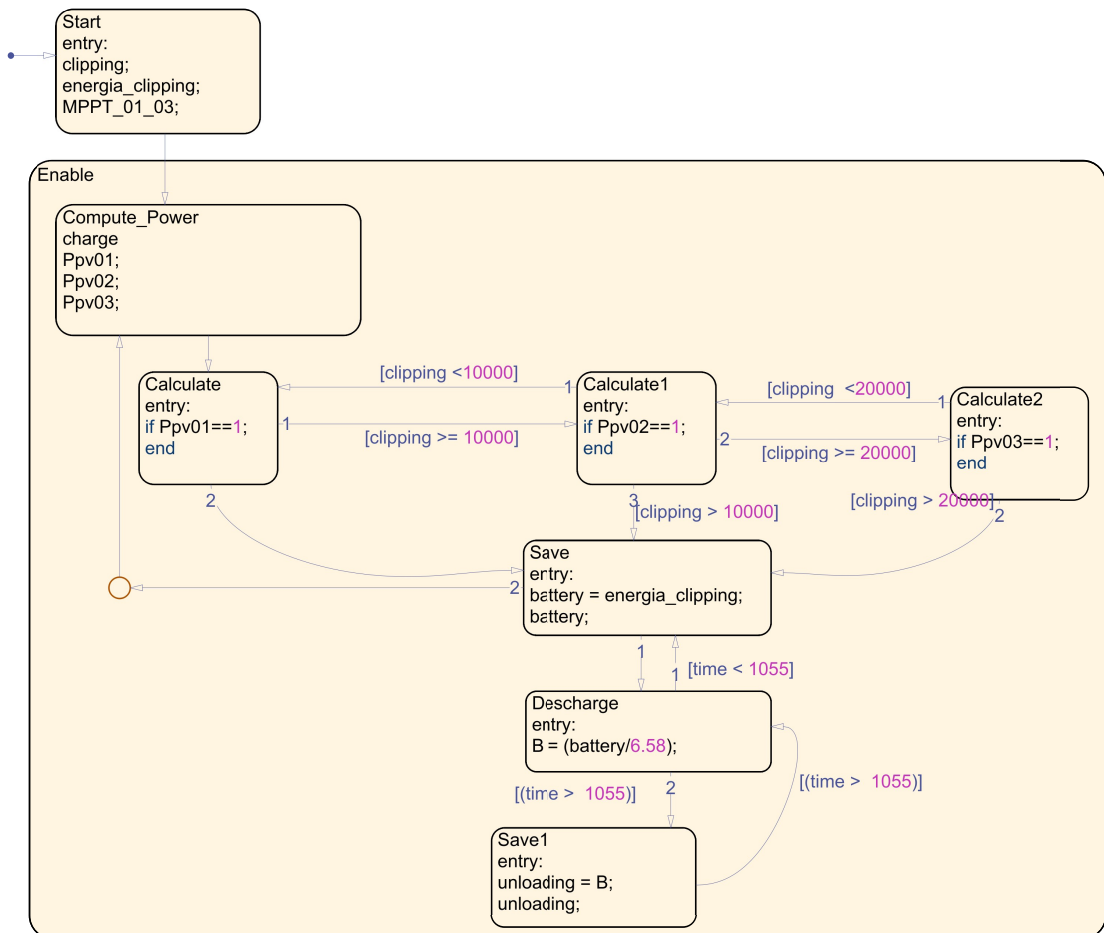


Figura 30 – Controle de carregamento e descarregamento
Fonte: Autoria própria (2023).

E como resultado, é apresentado a Figura 31 da simulação de carregamento e descarregamento no cenário e horário proposto.

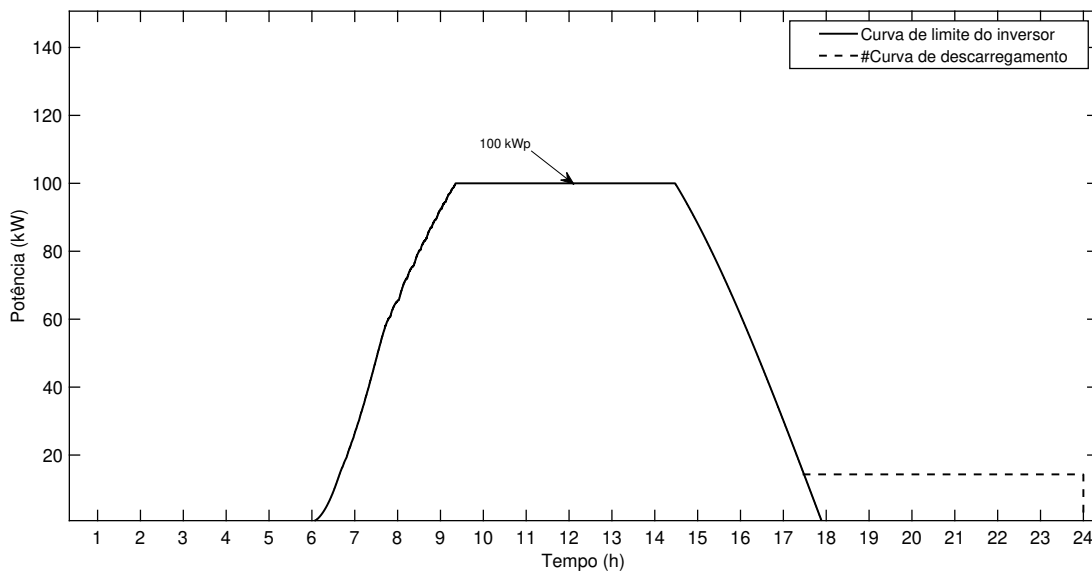


Figura 31 – Curva da descarregamento proposto

Fonte: Autoria própria (2023).

Para garantir uma vida útil prolongada do armazenamento, é necessário considerar um limite de *Depth of Discharge* (DoD), ou profundidade de descarga, geralmente de 80% da capacidade nominal do armazenamento, sendo que esse limite reduz o estresse e a degradação que ocorrem durante os ciclos de descarga. O DoD também afeta o desempenho e a eficiência dos sistemas de armazenamento de energia. Em muitos tipos de baterias, a eficiência de carga e descarga diminui com o aumento do DoD. Isso significa que em níveis mais profundos de DoD, a bateria perde mais energia na forma de calor durante os ciclos de carga e descarga. Limitar o DoD ajuda a manter um melhor desempenho e eficiência do sistema de armazenamento. Portanto, controlar o DoD é muito importante para garantir a estabilidade e confiabilidade do sistema de armazenamento de energia, evitando que a bateria opere em condições inadequadas e mantém a estabilidade do sistema. Descarregar uma bateria além de seu limite DoD pode causar problemas como queda de energia, capacidade reduzida e estabilidade do sistema reduzida.

Outro aspecto a ser considerado é o SoC, um parâmetro crucial no gerenciamento de sistemas de armazenamento. O SoC de uma bateria é definido como a relação entre a capacidade restante da bateria e a capacidade nominal da bateria (PATTIPATI; SANKAVARAM CHAITANYA E PATTIPATI, 2011). O SoC indica a quantidade de energia disponível na bateria em relação a sua capacidade total. Normalmente é considerado um SoC nominal de 50% a 80%. Essa faixa é usada para maximizar a vida útil da bateria e garantir um desempenho estável e eficiente. Entretanto, a relação entre SoC e DoD é inversa. Quando a bateria está totalmente carregada, o SoC é alto e o DoD é baixo. À medida que a bateria descarrega, aumenta o DoD e

consequentemente diminui o SoC. Quando a bateria atinge seu DoD máximo, significa que está esgotada.

3.5 Armazenamento

Para o sistema de armazenamento foram dimensionadas banco de baterias do tipo íon-lítio. Existem várias razões pelas quais a bateria de íon de lítio é uma escolha ótima para sistemas de armazenamento de energia. As vantagens desse tipo de bateria estão na sua vida longa útil (cerca de 1.000 ciclos), altas densidade energética (140 - 240 Wh/kg), eficiência (90-98%) e baixa manutenção(SAJI; BABU; ILANGO, 2019). Vale ressaltar que seu custo ainda é um dos mais elevados dentro das tecnologias existentes, contudo, vem decrescendo progressivamente em razão de ser o tipo de bateria mais utilizada no mercado.

3.5.1 Funcionamento

Durante o carregamento, os íons de lítio são forçados a passar do eletrodo positivo para o eletrodo negativo pela aplicação de uma diferença de potencial (tensão) na bateria. Os íons de lítio viajam pelo eletrólito da bateria e são armazenados no ânodo. Durante a descarga, os íons de lítio fluem do ânodo para o cátodo, criando uma corrente elétrica que pode ser usada para alimentar dispositivos ou sistemas elétricos. Os eletrólitos atuam como um meio condutor de íons de lítio entre ânodo e o cátodo, permitindo a movimentação dos íons de lítio durante os processos de cargas e descarga. O separador é uma camada porosa, evitando o contato direto, prevenindo curto-circuitos. A Figura 32 apresenta o diagrama principal da bateria de íon lítio e seu processo de carga e descarga.

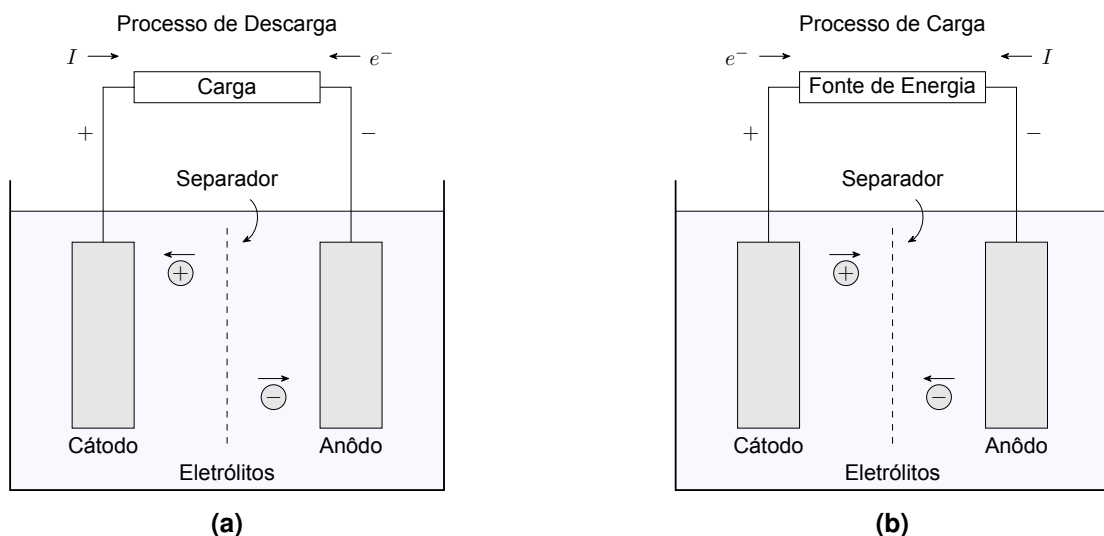


Figura 32 – Bateria de íon lítio. (a) Processo de Descarga. (b) Processo de carga

Fonte: Adaptado de (LUO WEILIN E LV, 2011).

3.5.2 Descarte da bateria

O descarte inadequado de baterias de lítio pode ser perigoso para o meio ambiente e para a saúde humana, uma vez que possuem substâncias químicas tóxicas. O descarte em aterros sanitários pode levar até mesmo risco de incêndios, já que essas baterias são inflamáveis.

Segundo a resolução CONAMA n° 257/99 é determinado regras para o descarte das baterias de lítio de forma correta, considerando a necessidade de se disciplinar o descarte e o gerenciamento (CONAMA, 1999). Outro guia publicado pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos, em inglês – *Environmental Protection Agency* (EPA) , fornece informações sobre os riscos ambientais e de saúde associados ao descarte inadequado de baterias de íon-lítio, bem como diretrizes para o gerenciamento correto desses resíduos (EPA, 2020).

3.6 Dimensionamento do sistema de armazenamento

Para dimensionamento do sistema de armazenamento, é importante considerar tanto o conversor CC/CC responsável por converter a energia de entrada em uma forma adequada para carregar ou descarregar a bateria, enquanto também a bateria que é responsável por armazenar a energia para uso posterior.

Após calcular a potência do sistema total do sistema e também o limite máximo do inversor, pode-se dimensionar o sistema de armazenamento, com o valor de potência do efeito *clipping*, da simulação da Figura 28.

$$\text{Potência} = 27,767 \text{ kW}_p \quad (7)$$

É necessário determinar a tensão do sistema que a bateria será conectada, pela Tabela 1 do *datasheet* do módulo, tem-se uma tensão de circuito aberto de 45 V. Considerando que cada *string* possui 20 painéis, a tensão total é de 900 V.

Para dimensionar o tamanho do armazenamento, é necessário possuir o valor da energia a ser armazenado. A energia é dada pela integral da potência em relação ao tempo. Matematicamente, podemos expressar essa relação da forma

$$\text{Energia} = \int P(t)dt = 94,1847 \text{ kWh}, \quad (8)$$

em que $P(t)$ é a potência pelo tempo e dt é a variação infinitesimal do tempo. O intervalo de tempo utilizado na equação, foi para o intervalo que está acontecendo o *clipping*. A potência é medida em Watts (W) e o tempo é medido em segundos (s), portanto energia resultante será medida em Joules (J).

A capacidade do sistema de armazenamento de baterias de íon-lítio é, geralmente, especificada em termos de sua capacidade inicial em ampère-hora (Ah). A capacidade do armazenamento pode ser afetada por vários fatores ao longo do tempo, incluindo a idade, o número de ciclos de carga e descarga e as condições de operação, como temperatura e corrente de descarga. Devido à degradação da capacidade desses armazenamentos ao longo do tempo, alguns fabricantes especificam uma perda de capacidade estimada em percentual por ano. Isso significa que a capacidade esperada do armazenamento em um determinado momento é calculada como um percentual da sua capacidade inicial.

Dessa forma, para obter a capacidade de armazenamento ideal, estipula-se a energia de acordo com a eficiência do sistema no seu primeiro ano de operação, para esse armazenamento em específico, foi considerada 90% , considerando também a eficiência do conversor, que refere-se a eficiência do processo de conversão de energia entre diferentes formas, considerado no presente trabalho eficiência de 95% do conversor. Em seguida, divide-se a energia atual pela eficiência do sistema de armazenamento multiplicado pela eficiência do conversor, de modo que

$$E_T = \frac{E}{E_f \cdot E_c} = 110,16 \text{ kWh}, \quad (9)$$

em que E_T é a energia total armazenada (Wh), E a energia armazenada sem considerar eficiência (Wh), E_f a eficiência do armazenamento (%) e E_c a eficiência considerada do conversor (%).

Em seguida, dimensiona-se a capacidade do armazenamento:

$$C_{\text{armazenamento}} = \frac{E_T}{V_b} = 122,4 \text{ Ah}, \quad (10)$$

em que $C_{\text{armazenamento}}$ é a capacidade de carga do armazenamento e V_b a tensão do armazenamento proposto.

A partir dos cálculos acima, o dimensionamento do armazenamento foi realizado e a ficha técnica com os valores propostos para o armazenamento, e é apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros propostos para o sistema de armazenamento

Parâmetros	Valor
Capacidade nominal	125 Ah
Potência instantânea pico	30 kW
Tensão de operação do conversor	900 V
Eficiência do armazenamento	90%
Eficiência do conversor	95%
Garantia	10 anos
Vida útil	10 anos

Fonte: Autoria própria (2023).

É considerado uma capacidade nominal e potência instantânea um pouco a mais como margens de segurança, levando em considerações possíveis variações na carga ou nas condições de operação, garantindo que o conversor tenha capacidade suficiente para lidar com situações previstas. O número de baterias necessários no banco de baterias irá depender da topologia do conversor e a capacidade comercial encontrada, como valor de corrente e tensão.

Outro importante aspecto é a compatibilidade desse armazenamento com o MPPT, é necessário adequar o armazenamento para que a voltagem e a corrente de carga sejam adequados com o MPPT. Necessário também, avaliar a proteção de carga do MPPT para evitar danos futuros ao armazenamento devido a uma corrente excessiva de carga. Contudo, há MPPT projetado para monitorar continuamente a tensão da bateria. Quando a tensão atinge um limite pré-definido que indica que está totalmente carregada, o MPPT pode reduzir a corrente de carga ou interromper completamente o carregamento para evitar a sobrecarga na bateria.

4 CONCLUSÃO

O sobredimensionamento de usinas solares fotovoltaicas pode levar a um fenômeno chamado "clipping", que ocorre quando a capacidade de geração de energia excede a capacidade de processamento ou armazenamento disponível. O clipping ocorre quando os painéis solares produzem mais energia do que o inversor pode converter ou o sistema pode armazenar. Em usinas solares sem sistemas de armazenamento, como baterias, a energia excedente gerada durante o clipping é desperdiçada, pois não há capacidade para armazená-la e utilizá-la posteriormente. Isso pode levar a uma redução na eficiência do sistema e a uma perda de oportunidades de geração de energia.

Como solução, neste trabalho foi feito um estudo de uma usina fotovoltaica sobredimensionada em operação, sendo o principal objetivo analisar as potências ceifadas pelo efeito *clipping*. e então dimensionar um sistema de armazenamento para uso posterior. Foi realizada a implantação de toda usina através dos bancos de dados e a validação do mesmo por meio da ferramenta Matlab/Simulink®. Com esse processo foi possível analisar as curvas da geração fotovoltaica, de modo a validar o excesso de potência das mesmas. Em relação à estratégia de MPPT adotada, é de suma importância para observar o máximo da potência do sistema e não dimensionar um sistema de armazenamento sem essa segurança.

Através de uma revisão bibliográfica foi estudado alguns modelos de armazenamento e optado pelo BESS, em específico a bateria de íons de lítion que possui um enorme potencial e bastante conhecida em sistemas fotovoltaicos. Juntamente com os resultados das simulações, foi possível dimensionar o sistema de armazenamento. Foi então proposto a implementação de controle estratégicos de operação através da ferramenta gráfica de modelagem *stateflow*, descrevendo uma lógica para o sistema, sendo associado ao MPPT, tanto para carregamento quanto para descarregamento.

O controle proposto para carregamento do armazenamento é por meio de três *strings* em que as mesmas estão diretamente ligadas ao conversor, sendo detectado por um gerenciamento quando acontece o efeito *clipping* para carregamento das mesmas. O descarregamento é feito para a carga em um horário proposto onde não possui irradiância solar, ou seja, quando não possui potência diretamente dos painéis, ressaltando a preservação da vida útil do armazenamento.

Durante o desenvolvimento do trabalho, identificou-se as vantagens da utilização de um armazenamento na usina fotovoltaica, já que cerca de 22% da potência de todo o sistema está sendo desaproveitado. Portanto, para o sistema, um banco de baterias com 5 Ah nominais, nas condições consideradas, forneceu energia necessária para suprir a demanda em outros horários. É de ser considerado a forma que o controle proposto pode degradar a vida útil da bateria, de modo a conciliar a compensação de maximizar com o MPPT e ter essa potência retornável. Além disso, é importante considerar cuidadosamente os custos desse armazenamento.

Dessa forma, fica evidente a extrema importância da necessidade de um sistema de armazenamento de energia com foco em aumentar a eficiência geral do sistema e em proporcionar um melhoramento no aproveitamento máximo da energia. Contudo, outra dificuldade encontrada, sobre o armazenamento que não é padrão, pode-se não ser encontrado em meio comercial, dificultando o acesso em tê-lo.

4.1 Trabalhos futuros

Para trabalhos futuros, outros estudos podem ser realizados com base no que foi exposto e desenvolvido nesse trabalho, de modo a ampliar as análises, sendo eles:

1. Investigação de outras possibilidades de gerenciamento dessa energia de modo a não utilizar o MPPT para não degradar a vida do armazenamento, sendo assim feito uma comparação com o trabalho presente chegando a um controle ótimo que compense;
2. Investigação do hardware para comutações;
3. A busca de um armazenamento comercial que se encaixa na ficha técnica proposta, como também análise financeira do mesmo.
4. Estudo mais complexo do chaveamento utilizado entre as strings e o conversor.

REFERÊNCIAS

- ABSOLAR. **Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica**. 2023. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/>. Acesso em: 02 de junho de 2023.
- AKHIL, A. A. *et al.* **DOE/EPRI Electricity Storage Handbook in Collaboration with NRECA**. [S.l.], 2015.
- BARSUKOV, Y.; QIAN, J. **Battery power management for portable devices**. [S.l.]: Artech house, 2013.
- BLESSA, L. d. A. **Estudo de técnicas de extração de máxima potência de painéis fotovoltaicos**. 2018. Dissertação (B.S. thesis) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2018.
- BRUNO, R. *et al.* Small size single-axis pv trackers: control strategies and system layout for energy optimization. **Energy Procedia**, Elsevier, v. 82, p. 737–743, 2015.
- BUENO, A.; BRANDÃO, C. Visão geral de tecnologia e mercado para os sistemas de armazenamento de energia elétrica no brasil. **Associação Brasileira de Armazenamento e Qualidade de Energia**, 2016.
- CANADIANSOLAR. **BiHiKu7 Módulo PERC Bifacial de Alta Potência e Células Duplas**. 2022. Disponível em: <https://www.csisolar.com/br/bihiku7/>. Acesso em: 20 de janeiro de 2023.
- CAZZOLA, P. *et al.* Global ev outlook 2016. **International Energy Agency, France**, 2016.
- CONAMA. **Resolução CONAMA nº 257**. 1999. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=96661>. Acesso em: 25 de abril 2023.
- COSTA, W. T. da. **Modelagem, estimação de parâmetros e método MPPT para módulos fotovoltaicos**. 2010. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Espírito Santo, Brazil, 2010.
- DATTA, U.; KALAM, A.; SHI, J. A review of key functionalities of battery energy storage system in renewable energy integrated power systems. **Energy Storage**, Wiley Online Library, v. 3, n. 5, p. e224, 2021.
- DIAS, P. M. A. *et al.* Estudo do potencia de energia solar no estado da bahia usando o modelo de mesoescala wrfo. **Blucher Engineering Proceedings**, v. 6, n. 3, p. 556 – 563, 2019.
- EPA. **Gerenciamento de Resíduos de Baterias de Lítio-íon**. 2020. Disponível em: <https://www.epa.gov/>. Acesso em: 25 de abril 2023.
- EPE. **Balanco Energético Nacional**. Empresa de Pesquisa Energética, 2019b. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt>. Acesso em: 16 de fevereiro de 2023.
- EPE. **Matriz Energética e Elétrica**. Empresa de Pesquisa Energética, 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt>. Acesso em: 16 de setembro de 2022.
- EXAME. **Energia solar bate recorde em 2021 e ultrapassa geração de usinas térmicas**. Revista Exame, 2022. Disponível em: <https://exame.com/economia/energia-solar-bate-recorde-em-2021-e-ultrapassa-geracao-de-usinas-termicas/>. Acesso em: 07 de setembro de 2022.
- FADIGAS, E. Energia solar fotovoltaica: fundamentos, conversão e viabilidade técnico-econômica. **Grupo de Energia Escola Politécnica Universidade de São Paulo**, p. 32, 2012.

- FADIGAS, E. Energia solar fotovoltaica: fundamentos, conversão e viabilidade técnico-econômica. **Grupo de Energia Escola Politécnica Universidade de São Paulo**, p. 32, 2012.
- GIMENES, A. L. V. *et al.* **Armazenamento de energia: Abordagens sistemáticas referentes aos sistemas elétricos de potência**. [S.l.]: Paco e Littera, 2020.
- HCC, E. S. **Energia Solar na Bahia: um potencial a ser explorado**. 2022. Disponível em: <https://hccenergiasolar.com.br/energia-solar-na-bahia-um-potencial-a-ser-explorado/>. Acesso em: 20 de abril de 2023.
- HUAWEI. **SUN2000-100KTL-M1 Smart PV Controller**. 2020. Disponível em: <https://www.csisolar.com/br/bihiku7/>. Acesso em: 30 de janeiro de 2023.
- JÚNIOR, R. M.; BAGNARA, M. Os princípios químicos e físicos envolvidos no funcionamento das células fotovoltaicas. **Salão do Conhecimento**, 2016.
- LIMA, L. D. d. *et al.* **Estudos de técnicas de extração de máxima potência de painéis fotovoltaicos**. [S.l.]: Universidade Federal de Uberlândia, 2019.
- LUO WEILIN E LV, C. e. W. L. e. L. C. **Study on impedance model of Li-ion battery**. [S.l.]: IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, 2011.
- MARTINS, F. R. *et al.* **Atlas brasileiro de energia solar 2**. INPE. Disponível em: http://labren.ccst.inpe.br/atlas_2017.html. Acesso em: 22 de abril de 2023.
- MATLAB. **Solar Inverter MPPT Example**. 2022. Disponível em: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/69259-solar-inverter-mppt-example>. Acesso em: 02 de maio de 2023.
- MCLARNON, F. R.; CAIRNS, E. J. Energy storage. **Annual review of energy**, Annual Reviews 4139 El Camino Way, PO Box 10139, Palo Alto, CA 94303-0139, USA, v. 14, n. 1, p. 241–271, 1989.
- METASOL. **Modelos de Pannel Solar: Conheça os Principais**. 2022. Disponível em: <https://www.ensolare.com.br/blog/efeito-fotovoltaico-como-a-energia-e-gerada>. Acesso em: 20 de março de 2023.
- MOÇAMBIQUE, N. E. M. **Aplicação de algoritmos de busca de ponto de máxima potência e controladores lineares e/ou fuzzy para regulação da tensão terminal de painéis fotovoltaicos**. 2012. 134 p. Tese (Doutorado), 2012.
- MOHANTY, P.; MUNEEER, T.; KOLHE, M. **Solar photovoltaic system applications: a guidebook for off-grid electrification**. [S.l.]: Springer, 2016.
- MONTEIRO, F. M. d. S. **Planejamento de alocação e atuação de sistemas de armazenamento de energia a baterias para a melhoria do perfil de tensão em sistemas de distribuição de energia elétrica**. 2011. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2011.
- PATTIPATI, B.; SANKAVARAM CHAITANYA E PATTIPATI, K. **Estrutura de identificação e estimativa do sistema para características essenciais do sistema de gerenciamento de baterias automotivas**. [S.l.]: IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews), 2011. v. 41. 869-884 p.
- PEREIRA, T. Q. *et al.* **Desenvolvimento de um sistema de monitoramento remoto microcontrolado para análise da performance de bancos de baterias**. [S.l.]: Araranguá-SC, 2016.
- PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. *et al.* **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. [S.l.: s.n.], 2014. v. 1. 47–499 p.

PINTO, A.; ALMEIDA, M. **Desenvolvimento de Controladores de Carga para Sistemas Fotovoltaicos Autônomos**. [S.l.]: Universidade Federal do Pará, 2009.

Portal Solar. **Passo a Passo da Fabricação do Painel Solar**. 2022. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/passa-a-passo-da-fabricacao-do-painel-solar.html>. Acesso em: 20 de março de 2023.

RAMOS, C. d. M. **Procedimentos para caracterização e qualificação de módulos fotovoltaicos**. São Paulo-SP: Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Energia. Univ. de S. Paulo, 2006. 18–23 p.

RIBAS, L. **Efeito fotovoltaico - Como a energia é gerada**. ENSOLARE, 2020. Disponível em: <https://www.ensolare.com.br/blog/efeito-fotovoltaico-como-a-energia-e-gerada>. Acesso em: 20 de março de 2023.

SAAD, M. **Controlador de carga e descarga de baterias, microcontrolado com PIC, com aplicação em sistemas de fornecimento de Energia em Geral, incluindo fotovoltaicos**. [S.l.]: Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2012.

SAJI, D.; BABU, S. P.; ILANGO, K. **SOC Estimation of lithium ion battery using combined coulomb counting and fuzzy logid method**. Bangalore, Índia: IEEE, 2019. 948-952 p.

SOLAR, E. **Princípios e aplicações**. Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito, 2006. Disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/tutorial/tutorial_solar_2006.pdf. Acesso em: 16 de abril de 2023.

SOLAR, N. **ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA: TUDO SOBRE**. 2022. Disponível em: <https://www.neosolar.com.br/aprenda/saiba-mais/energia-solar-fotovoltaica>. Acesso em: 20 de março de 2023.

SOLARGIS. **Dados meteorológicos e software para investimentos em energia solar**. 2022. Disponível em: <https://solargis.com/>. Acesso em: 20 de março de 2023.

SOUZA, M. P. de; MOURA, L. C. B.; COSENZA, C. A. N. Análise para a localização ótima de uma usina solar fotovoltaica no estado do rio de janeiro. **Revista Brasileira de Energia** | Vol, v. 27, n. 4, 2021.

Udop. **Brasil é 4º país que mais cresceu em energia solar em 2021**. União Nacional da Bioenergia, 2022. Disponível em: <https://www.udop.com.br/noticia/2022/04/25/brasil-e-4-pais-que-mais-cresceu-em-energia-solar-em-2021.html>. Acesso em: 16 de setembro de 2022.

VILLALVA, M. G. **Energia Solar Fotovoltaica. Conceitos e aplicações: guía del usuario**. [S.l.]: Saraiva Educação SA, 1983.

WEBER, L. **Energia solar fotovoltaica como fonte alternativa de geração de energia: estudo de caso**. [S.l.]: UNIFACVEST, CENTRO UNIVERSITÁRIO, 2019.

WEG. **Sistema de Armazenamento de Energia em Baterias ESSW**. 2021. Disponível em: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h0e/h3c/WEG-ESSW-sistema-de-armazenamento-de-energia-50100243-pt.pdf>. Acesso em: 16 de fevereiro de 2023.

ZULUAGA, C. F. *et al.* The climate change perspective of photovoltaic power potential in brazil. **Renewable Energy**, Elsevier, v. 193, p. 1019–1031, 2022.