



Universidade de Brasília - UnB

Metodologia do aprimoramento de uma usina fotovoltaica em rede reticulada com base em parâmetros técnicos e econômicos

Lucas Trindade Barbosa

Brasília, Julho de 2023

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)  
Graduação em Engenharia Elétrica

**Lucas Trindade Barbosa**

**Metodologia do aprimoramento de uma usina fotovoltaica em rede reticulada  
com base em parâmetros técnicos e econômicos**

Orientador(a): Prof. Dr. Fernando Cardoso Melo

Projeto apresentado para o Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

**Brasília  
2023**

# Ficha Catalográfica

---

Trindade Barbosa, Lucas

Metodologia do aprimoramento de uma usina fotovoltaica em rede reticulada com base em parâmetros técnicos e econômicos. / Lucas Trindade Barbosa; orientador Fernando Cardoso Melo. – Brasília, 2023. X p.

Monografia (Graduação - Engenharia Elétrica) - - Universidade de Brasília, 2023.

1. Usina Fotovoltaica 2. Rede reticulada. 3. Aprimoramento técnico. 4 Aprimoramento econômico.

---

## Resumo

A geração de energia elétrica por meio de fontes renováveis é uma realidade e tende a crescer ainda mais no médio e longo prazo. Dessa forma, existirão desafios para a implementação técnica e econômica em massa de fontes renováveis. Um desses desafios se trata de usinas fotovoltaicas localizadas em redes de distribuição reticuladas, que possuem um regime de operação diferente em relação a uma usina conectada em rede radial. Essa diferença se deve à impossibilidade de injeção de um excedente de energia na rede elétrica e, desta maneira, o desempenho da usina é bastante prejudicado. A possibilidade de ter toda uma usina instalada e ter o potencial de energia solar e não ter a conversão para energia elétrica abre uma gama de funcionalidades que ainda não foi explorada. O intuito deste trabalho é analisar um caso real de uma usina solar fotovoltaica inserida em rede reticulada e comparar os dados de desempenho teóricos e reais durante um ano de operação da usina em questão. A partir dessa diferença, sugerir soluções para o aproveitamento desse potencial energético levando em conta parâmetros técnicos e econômicos. Os resultados alcançados mostram uma queda de desempenho em parâmetros, e um potencial interessantes de economia com a energia não aproveitada.

Palavras-chave: Usina Fotovoltaica, Rede reticulada, Aprimoramento técnico, Aprimoramento econômico.

# Abstract

The generation of electricity through renewable sources is a reality and is expected to further grow in the medium and long term. Thus, there will be challenges for the technical and economic mass implementation of renewable sources. One of these challenges concerns photovoltaic power plants located in interconnected distribution networks, which operate differently compared to a power plant connected to a radial network. This difference arises from the inability to inject surplus energy into the electrical grid, greatly impairing the plant's performance. The possibility of having an entire power plant installed with untapped solar energy potential without conversion to electrical energy opens up a range of functionalities that have yet to be explored. The purpose of this study is to analyze a real case of a photovoltaic solar power plant integrated into an interconnected network and compare the theoretical and actual performance data during one year of plant operation. Based on these differences, solutions will be suggested to harness this energy potential considering technical and economic parameters. The achieved results show a decline in performance parameters and an interesting potential for cost savings with the unused energy.

Photovoltaic Power Plant, Interconnected distribution networks, Technical Enhancement, Economic Enhancement.

# Dedicatória

À minha família e amigos, pelo suporte e carinho.

# Agradecimentos

A conclusão do curso de graduação em engenharia elétrica não foi uma tarefa fácil. Foi necessário muito tempo, dedicação e sacrifícios. Apesar de constar o meu nome no diploma, essa conquista não é individual, várias pessoas contribuíram para essa jornada e merecem o devido reconhecimento. Dessa forma, deixo registrado minha gratidão à todas as pessoas que estiveram comigo.

Em primeiro lugar, tenho que agradecer à minha família. À minha mãe, Ana Raquel, por sempre me dar um amor incondicional e me manter com os pés no chão, por incontáveis horas de conversa que me ajudaram e continuam a me ajudar a refletir sobre meu futuro e sobre mim mesmo. Ao meu pai, Eden, por me ensinar a permanecer no caminho correto, mesmo diante dos medos, inseguranças e outros obstáculos que eu possa encontrar. À minha irmã, Ana Clara, por me mostrar o que é ter um coração verdadeiramente generoso e que é possível expandir o amor e carinho de maneira ainda indefinida. E, por fim, agradecer ao meu irmão caçula, Daniel, cujo convívio diário me mostra o brilho da vida e me ajuda a enxergar o mundo por um prisma mais alegre, colorido e brilhante.

Há uma frase que eu gosto, que é: "Amigos são a família que a gente escolhe". Além de ter tido a sorte de escolher ótimas amizades, eu tive uma sorte ainda maior de ser escolhido por essas pessoas maravilhosas como amigo. E como toda família, tem aqueles que convivemos todo dias e tem aqueles mais distantes, que mesmo com pouco contato o carinho e a amizade permanecem.

Para começar os agradecimentos aos meus amigos, queria começar agradecendo o grupo "Hospício", em que estão meus amigos mais loucos, cuja a loucura me ajuda a suportar os altos e baixos. Obrigado a todos por estarem na minha vida há tanto tempo, por me trazerem momentos e histórias inesquecíveis e por serem tão malucos quanto eu e me fazerem sentir em casa. Por fim, agradecer por trazerem uma leveza, lealdade, diversão e companheirismo. Obrigado vocês à todos, ao André, ao Bedian, ao Dênio, ao Victor, ao Heitor, ao Jorge, ao Pedro, ao Thiago, ao João e ao Victor.

Agradecer também ao meu grupo de amigos mais antigos, por sua companhia, por me acolherem nos momentos em que me senti mais solitário e esse acolhimento é de um valor inestimável. Agradeço demais, por abarcar meu lado mais tímido e "nerd". Obrigado vocês à todos, ao Gabriel, à Letícia, ao Lucas Eduardo, ao Otávio e ao Victor.

Não posso esquecer agradecer aos meus amigos feitos durante a faculdade, são pessoas que tiveram que passar pelos mesmos obstáculos que eu tive que passar, que conhecem as dores e os sacrifícios que precisaram ser feitos (não foram poucos e nem fáceis) e que foram persistentes e conseguiram o feito de concluir mais essa etapa. Espero que nós, que conhecemos na UnB, que passamos por vários percalços juntos possamos manter essa amizade. Obrigado à vocês todos, ao Johann, ao Lucas Ferreira, ao Luigi, à Rebeca e ao Gustavo.

Por fim, devo agradecer a uma pessoa especial que conheci no final desta jornada.

Alguém que me mostra todos os dias um lado novo de mim mesmo, alguém que reavivou um brilho que eu já havia perdido há muito tempo e que não pensei que pudesse recuperar. Essa pessoa é cheia de amor, carinho, compreensão,... São tantas qualidades que, se eu fosse citar, o trabalho teria o dobro de páginas. Obrigado, amor. Obrigado, Bia. Te amo.

## Lista de Figuras

1	Bandas de energia de diversos tipos de materiais. Fonte: (PINHO; GALDINO et al., 2014) . . . . .	11
2	Representação de Si na rede cristalina. Fonte: Própria . . . . .	11
3	Exemplo dopagem tipo P. Fonte: Própria . . . . .	12
4	Exemplo dopagem tipo N. Fonte: Própria . . . . .	12
5	Esquema da junção PN. (PINHO; GALDINO et al., 2014) . . . . .	13
6	Estrutura básica de uma célula fotovoltaica de silício destacando: (1) região tipo n; (2) região tipo p, (3) zona de carga espacial, onde se formou a junção pn e o campo elétrico; (4) geração de par elétron-lacuna; (5) filme antirreflexo; (6) contatos metálicos. Fonte: (PINHO; GALDINO et al., 2014) . . . . .	14
7	Modelo de circuito da célula fotovoltaica com dois diodos (MA; YANG; LU, 2014)	14
8	Curva I-V. (MA; YANG; LU, 2014) . . . . .	15
9	Curvas I-V e curvas P-V do módulo fotovoltaico em diferentes intensidades de radiação solar na temperatura de 25 °C. Fonte: (MA; YANG; LU, 2014) . . . . .	16
10	Curvas I-V e curvas P-V do módulo fotovoltaico em diferentes temperaturas irradiância = 1000 W/m <sup>2</sup> . Fonte: (MA; YANG; LU, 2014) . . . . .	16
11	Topologia de inversor. Fonte: (RASHID, 2017) . . . . .	17
12	Modulação PWM em um inversor. Fonte: (RASHID, 2017) . . . . .	18
13	Diagrama Unifilar de um Sistema de Distribuição Reticulado em Malha ( <i>Grid Network</i> ). Fonte: Própria . . . . .	21
14	Diagrama Unifilar de um Sistema de Distribuição Reticulado Exclusivo (Spot Network). Fonte: Própria . . . . .	22
15	Fluxograma do trabalho . . . . .	31
16	Variação da tarifa residencial de 2014 a outubro de 2022. Fonte:(ABRACEEL, 2023) . . . . .	36
17	Geração de energia 03/06 . . . . .	42
18	Irradiância 03/06 . . . . .	43
19	Geração de energia 17/01 . . . . .	43
20	Irradiância 17/01 . . . . .	44

# Sumário

<b>1 Introdução</b>	6
1.1 Objetivos	7
1.2 Justificativa	8
1.3 Estrutura do trabalho	9
<b>2 Revisão Bibliográfica</b>	10
2.1 Sistema de energia fotovoltaica	10
2.1.1 Módulo Fotovoltaico	10
2.1.2 Unidade de Condicionamento de Potência (UCP) - Inversores	17
2.1.3 Método de avaliação técnica a partir da taxa de desempenho	19
2.2 Sistemas de distribuição em rede reticulada	19
2.2.1 Arquitetura dos sistemas reticulados	20
2.3 Baterias	25
2.3.1 Dimensionamento de baterias	26
2.4 Baterias de íon Lítio	27
2.5 Microrrede	28
<b>3 Proposta Metodológica</b>	30
3.1 Fluxograma do trabalho	30
3.2 Metodologia de cálculo de energia perdida pelos desligamentos	32
3.3 Determinação do padrão de consumo da edificação no longo prazo	33
3.4 Dimensionamento das baterias	34
3.5 Energia não utilizada ao longo do tempo	34
3.6 Metodologia referente à estimativa de economia da utilização de energia perdida	35
3.7 Sugestão de outras propostas de metodologia	38
<b>4 Aplicação em caso real</b>	39
4.1 Materiais	39
4.1.1 Características dos Módulos	40
4.1.2 Características do Inversor	40
4.1.3 Características da estação meteorológica e do sistema de controle de fluxo de potência	41

---

4.2 Funcionamento do sistema de controle de injeção de potência . . . . .	42
4.3 Estimativa de energia não utilizada . . . . .	44
4.4 Dimensionamento das baterias. . . . .	55
4.5 Estimativa de economia a longo prazo. . . . .	56
<b>5 Conclusão . . . . .</b>	<b>57</b>
<b>Referências . . . . .</b>	<b>59</b>

# 1 Introdução

A demanda por eletricidade continua a aumentar em todo o mundo, impulsionada pelo crescimento da população, urbanização e desenvolvimento econômico. A projeção é um crescimento contínuo, existe um cenário que a demanda de 2050 é mais do que dobrada em relação à demanda de 2015 (EMPRESA, 2021). Ao mesmo tempo, preocupações com a diminuição dos combustíveis fósseis e o impacto ambiental causado pela queima desses combustíveis levaram a um impulso global em direção às fontes de energia renovável. A transição para fontes de energia renovável, é uma das possíveis alternativas para enfrentar esse desafio de maneira sustentável, desta maneira, as preocupações referentes à questão energética e ecológica se mostra mais em voga e direciona o mundo para uma conciliação entre o desenvolvimento de uma sociedade e o meio ambiente.

Entre as fontes de energia renovável, a energia solar tornou-se cada vez mais popular devido à sua abundância, acessibilidade e escalabilidade. A tecnologia fotovoltaica solar avançou significativamente nas últimas décadas, com módulos fotovoltaicos se tornando mais eficientes e econômicos. Hoje, a tecnologia fotovoltaica é uma das fontes de energia renovável de crescimento mais rápido, com um potencial significativo de crescimento nos próximos anos (ENERGÉTICA, 2020).

Apesar do potencial significativo da tecnologia fotovoltaica, ainda existem desafios a serem abordados, particularmente no que se refere à integração de sistemas fotovoltaicos na rede elétrica existente. Em uma rede elétrica convencional, a eletricidade flui em uma direção, de grandes usinas de energia centralizadas para consumidores. No entanto, com a integração de sistemas fotovoltaicos distribuídos, a eletricidade pode fluir de forma bidirecional, criando uma rede mais complexa.

Em uma rede elétrica reticulada, que tem uma estrutura de rede mais complexa do que uma rede elétrica radial, os desafios de integração de sistemas fotovoltaicos são ainda maiores. As redes reticuladas são compostas por redes interconectadas de linhas de transmissão e distribuição, com múltiplas fontes de geração e consumo. Isso torna mais difícil gerenciar o fluxo de eletricidade e manter a estabilidade da rede, especialmente quando há um excedente de energia gerado por sistemas fotovoltaicos (BARRETO, 2014).

Este trabalho concentra-se nos desafios da integração de sistemas fotovoltaicos solares em redes elétricas reticuladas e propõe soluções para enfrentar esses desafios. Especificamente, analisa um estudo de caso de uma usina fotovoltaica solar localizada em uma rede elétrica reticulada e compara os dados de desempenho teórico e real da usina ao longo de um período de um ano. O estudo tem como objetivo identificar os fatores técnicos e econômicos que impactam o desempenho de sistemas fotovoltaicos em redes elétricas reticuladas e propor soluções para melhorar seu desempenho e maximizar seu potencial.

Para tanto, será realizada uma revisão bibliográfica a respeito das principais fontes de energia renovável utilizadas no mundo, com foco na energia solar fotovoltaica. Serão abordados

temas como o funcionamento de uma usina solar fotovoltaica, os principais componentes que a compõem, a geração de energia elétrica e as principais tecnologias utilizadas.

Em seguida, será apresentado o contexto da rede de distribuição reticulada, suas características e desafios em relação à injeção de energia elétrica na rede. Serão discutidos os impactos dessa rede no desempenho de uma usina fotovoltaica e as possíveis soluções para otimizar a geração de energia nesse tipo de rede.

Será apresentado também o estudo de caso da usina solar fotovoltaica localizada em uma rede elétrica reticulada, com a análise dos dados de desempenho teóricos e reais durante um ano de operação. Serão apresentados gráficos e tabelas para facilitar a compreensão dos resultados e serão discutidas as possíveis soluções para aprimorar o desempenho da usina.

Por fim, serão propostas soluções técnicas e econômicas para otimizar a geração de energia elétrica em usinas fotovoltaicas inseridas em redes elétricas reticuladas. Espera-se que este trabalho possa contribuir para o desenvolvimento e aprimoramento da tecnologia de geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis, bem como para a discussão sobre o papel das redes elétricas reticuladas nesse processo.

## 1.1 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver uma metodologia para aprimorar o desempenho de usinas fotovoltaicas em rede reticulada, a partir da análise de parâmetros técnicos e econômicos relevantes.

Para atingir esse objetivo, o trabalho irá abordar os seguintes aspectos:

1. Investigar o comportamento de uma usina fotovoltaica em rede reticulada, considerando as particularidades deste tipo de rede elétrica e as limitações que podem afetar a geração de energia elétrica;
2. Identificar os principais parâmetros técnicos e econômicos que afetam o desempenho da usina fotovoltaica em rede reticulada, tais como: nível de irradiação solar, demanda de energia elétrica, características dos componentes da usina, entre outros;
3. Desenvolver soluções que possam ser aplicadas na usina fotovoltaica em rede reticulada com o objetivo de aprimorar seu desempenho. Serão considerados aspectos técnicos, tais como: configuração dos módulos fotovoltaicos, inversores, taxa de desempenho bem como aspectos econômicos, tais como: economia gerada pelo sistema.

Por meio desses objetivos gerais, espera-se contribuir para o desenvolvimento de novas estratégias e técnicas que possam ser aplicadas no aprimoramento de usinas fotovoltaicas em rede reticulada, de forma a maximizar o aproveitamento da energia solar e, conseqüentemente, aumentar a eficiência energética da rede elétrica como um todo. Os objetivos em específico do trabalho estão descritos abaixo:

- Realizar uma análise técnica e econômica detalhada da usina fotovoltaica em rede reticulada em estudo, identificando seus pontos fortes e limitações, e propondo estratégias para otimização do seu desempenho;
- Investigar as principais diferenças de operação e desempenho entre usinas fotovoltaicas em redes reticuladas e em redes radiais, a fim de compreender os desafios específicos deste tipo de configuração;
- Propor e avaliar soluções para aprimorar o desempenho da usina fotovoltaica em rede reticulada em estudo, levando em conta critérios técnicos, econômicos;
- Realizar simulações computacionais para avaliar o desempenho teórico da usina fotovoltaica em estudo, comparando-o com os dados obtidos na prática, e identificando possíveis lacunas ou inconsistências que possam ser corrigidas;
- Elaborar um conjunto de recomendações práticas e sustentáveis para aprimorar a eficiência energética da usina fotovoltaica em rede reticulada, de forma a contribuir para a expansão da matriz energética renovável no país e redução das emissões de gases de efeito estufa.

## 1.2 Justificativa

A geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis, como a energia solar fotovoltaica, é cada vez mais importante para o desenvolvimento sustentável da sociedade. A utilização de usinas fotovoltaicas em rede reticulada é uma das formas mais eficientes de geração de energia elétrica a partir da luz solar, uma vez que permite a conexão da usina à rede elétrica local, permitindo a distribuição da energia gerada para diversas regiões.

No entanto, existem alguns desafios que precisam ser superados para que a utilização de usinas fotovoltaicas em rede reticulada possa ser ampliada. Um dos principais desafios é a impossibilidade de injeção de um excedente de energia na rede elétrica, o que pode levar a uma redução do desempenho da usina fotovoltaica.

Nesse sentido, este trabalho justifica-se pela necessidade de desenvolver uma metodologia que possa aprimorar o desempenho de usinas fotovoltaicas em rede reticulada. O desenvolvimento de técnicas e soluções para aumentar a eficiência energética dessas usinas pode contribuir para a utilização mais ampla da energia solar fotovoltaica e, conseqüentemente, para a redução da dependência de fontes não renováveis de energia elétrica.

Por fim, é importante ressaltar que a realização deste trabalho está alinhada com as políticas públicas de incentivo à geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis, bem como com as metas globais de redução da emissão de gases de efeito estufa e de mitigação das mudanças climáticas. Dessa forma, a pesquisa desenvolvida pode contribuir de forma significativa para a sustentabilidade e para a preservação do meio ambiente.

### **1.3 Estrutura do trabalho**

O trabalho é estruturado da seguinte forma:

Capítulo 2 Revisão Bibliográfica: estudo dos temas que são abordados no trabalho de diversas fontes, visando aprofundar o conhecimento no assunto e melhorar o resultado obtido;

Capítulo 3 Materiais e Métodos: apresenta-se o fluxograma do trabalho, assim como a descrição da metodologia utilizada para elaboração do trabalho;

Capítulo 4 Resultados: apresentam-se os resultados obtidos pela metodologia abordada e faz-se uma avaliação;

Capítulo 5 Conclusão: conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

## 2 Revisão Bibliográfica

### 2.1 Sistema de energia fotovoltaica

Sistema de energia solar fotovoltaica é um conjunto de componentes e dispositivos projetados para gerar e fornecer eletricidade pela conversão da energia solar e através de um gerador fotovoltaico (ABNT, 2020). Apesar das células fotovoltaicas serem os principais componentes por conta da conversão de energia, há também outros componentes, como módulos solares, inversores, baterias (se houver armazenamento), cabos, estruturas de suporte e dispositivos de monitoramento. O sistema é projetado para capturar a energia solar disponível, convertê-la em eletricidade utilizável e, se necessário, armazená-la para uso posterior ou fornecer energia diretamente à rede elétrica.

Os principais componentes de um sistema fotovoltaico serão descritos e caracterizados nas seguintes subseções.

#### 2.1.1 Módulo Fotovoltaico

##### 2.1.1.1 Princípio de funcionamento

O princípio físico de funcionamento da conversão de energia proveniente do sol em energia elétrica é um fenômeno fundamental da física que descreve a emissão de elétrons por um material quando exposto à luz. Quando a luz incide em um material semicondutor, como o silício, comumente usado nas células fotovoltaicas, os fótons (partículas de luz) transferem sua energia para os elétrons do material. Se a energia dos fótons for suficiente para superar a energia de ligação dos elétrons, eles serão excitados e podem ser liberados do átomo, resultando em uma corrente elétrica.

A equação que determina a energia de um fóton a ser absorvida por um elétron é a relação de Plank-Einstein descrita na seguinte equação:

$$Ef = h.f \quad (2.1.1)$$

Os semicondutores possuem propriedades intermediárias entre condutores elétricos, como metais, e isolantes elétricos, como plásticos ou cerâmicas. Esses materiais têm a capacidade de conduzir eletricidade de forma controlada, dependendo de diferentes condições, como temperatura, luz ou tensão aplicada.

A característica distintiva dos semicondutores é a presença de uma "banda de energia proibida" em sua estrutura eletrônica. Essa banda é uma faixa de até 3 eV (PINHO; GALDINO et al., 2014) de energia onde não há níveis eletrônicos permitidos para os elétrons ocuparem.

Nos materiais isolantes, essa banda de energia proibida é relativamente grande (maior que 3 eV). Já nos materiais condutores, essa banda é muito pequena, permitindo que os elétrons transitem para banda de condução facilmente.

Basicamente, um elétron que recebe a energia de um fóton (2.1.1) maior que a energia de banda proibida, passará para a banda de condução e terá a capacidade gerar energia elétrica.

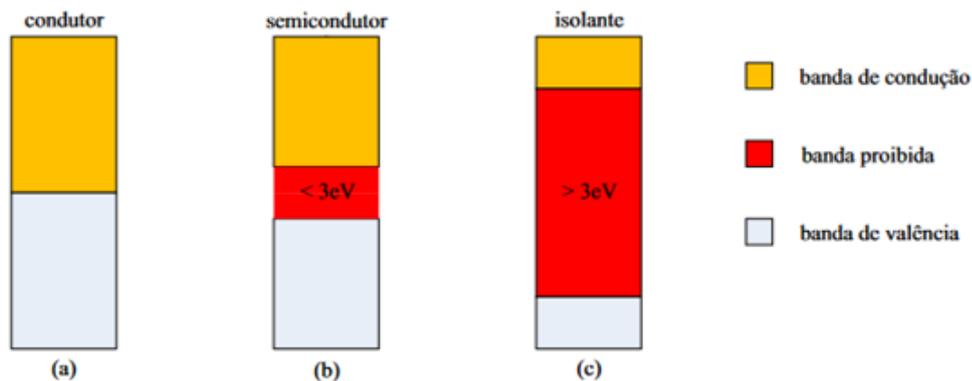


Figura 1: Bandas de energia de diversos tipos de materiais. Fonte: (PINHO; GALDINO et al., 2014)

A constituição das células não consiste em silício com alto grau de pureza, são adicionadas quantidades controladas de outros átomos em cristais de silício, esse processo é denominado dopagem (WHITE, 2016). Esse processo é realizado para mudar as características de condutividade do material. O silício pertence a família 4A da tabela periódica, portanto realiza 4 ligações com os outros átomos da rede. Desta forma a célula cristalina unitária de silício teria a seguinte representação.

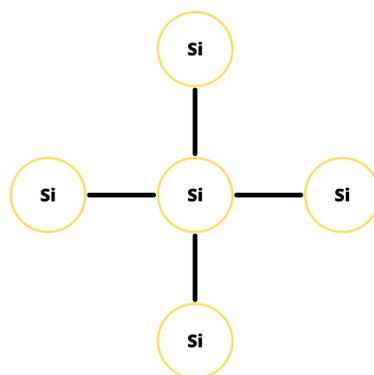


Figura 2: Representação de Si na rede cristalina. Fonte: Própria

A dopagem normalmente é feita com elementos da família 3A, geralmente boro ou alumínio, e da família 5A, geralmente é o fósforo (WHITE, 2016). No caso do primeiro tipo de dopagem da-se-á o nome de dopagem tipo P, elementos da família 3A possuem apenas 3 elétrons na camada de valência portanto na rede cristalina se criam lacunas. Desta forma, a lacuna de elétron cria uma característica de carga positiva na banda de condução, por isso o nome de

dopagem do tipo p (positiva). O esquema de ligação é representado na figura 3.

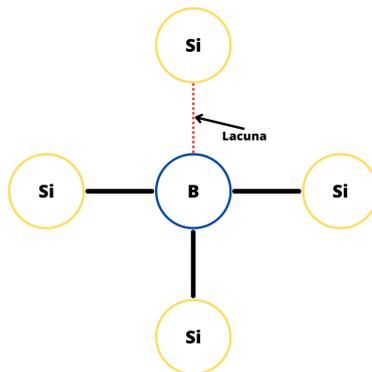


Figura 3: Exemplo dopagem tipo P. Fonte: Própria

A outra dopagem, que é feita com elementos da família 5A, é a dopagem do tipo N. Diferentemente da família 3A, os elementos da família 5A possuem 5 elétrons na banda de valência, o que implica que haverá elétrons que não se ligaram que, por consequência, irão para a banda de condução. Graças a esse aumento de cargas negativas na banda de condução, a dopagem é denominada do tipo n (negativa). O esquema representativo da dopagem tipo n está demonstrado na figura 4

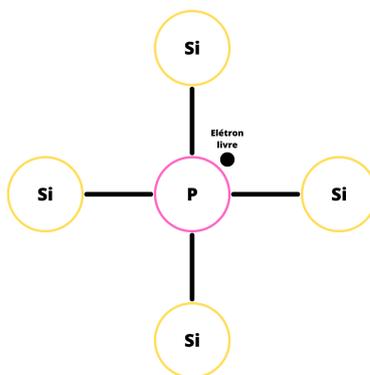


Figura 4: Exemplo dopagem tipo N. Fonte: Própria

É importante ressaltar que a nomenclatura das dopagens se refere a quantidade de cargas negativas na banda de condução. Apesar dos nomes se referirem a quantidade de elétrons na camada de condução, a carga se mantém neutra. Independente do átomo inserido, a quantidade de cargas positivas e negativas permanece a mesma, portanto independente da dopagem o composto permanece com carga neutra.

No momento em que se tem uma lâmina de silício em que uma parte é realizada a dopagem do tipo p e na outra parte dopagem do tipo n. O excesso de elétrons na camada de condução lado do tipo n é transferido para as lacunas do lado do tipo p. Essa transferência não ocorre de maneira indefinida, em um determinado momento essa movimentação de cargas

se encerra devido a criação de uma barreira de potencial (PINHO; GALDINO et al., 2014).

Após a conclusão da movimentação de cargas, é criado um campo elétrico, que irá no sentido do lado do tipo n para o lado do tipo p, que impede a continuidade do processo de movimentação dos portadores de cargas. Na fronteira da junção, é criada a zona de depleção, que é uma barreira de potencial que impede a passagem de cargas (importante salientar que cargas negativas naturalmente se movem no sentido oposto ao do campo elétrico). O esquemático da figura 5, ilustra o processo.

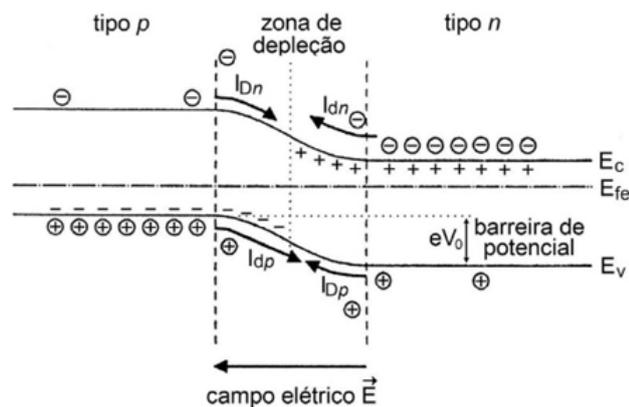


Figura 5: Esquema da junção PN. (PINHO; GALDINO et al., 2014)

A aplicação desses dois conceitos para a geração de energia solar fotovoltaica funciona da seguinte maneira: um material semicondutor dotado da junção pn será exposto a luz e desta maneira serão criados pares elétrons-lacuna. Essa geração de pares pode ocorrer em duas regiões diferentes a depender da energia dos fótons incidentes: na zona de depleção ou fora dela.

Caso o par elétron-lacuna seja gerado na zona de depleção, os elementos do par serão separados por conta do campo elétrico da zona, desta maneira o elétron irá para a região n, e a lacuna para região p, o que dará origem a uma tensão elétrica que caso ligada a uma carga gerará uma corrente elétrica como mostra a figura 6.

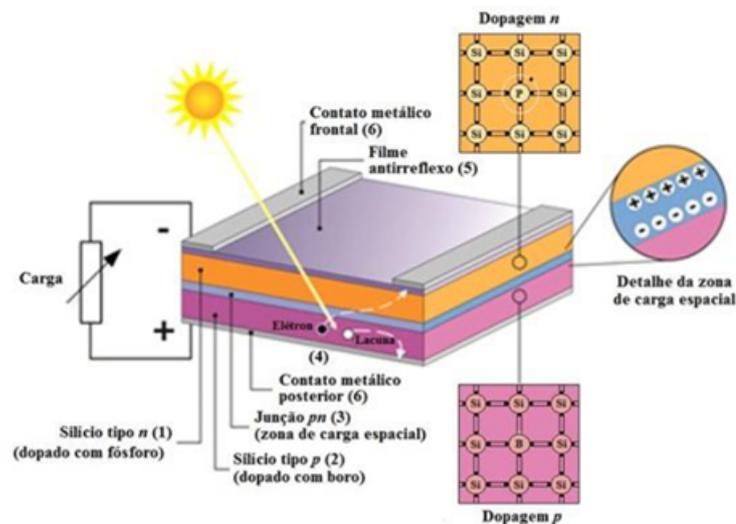


Figura 6: Estrutura básica de uma célula fotovoltaica de silício destacando: (1) região tipo n; (2) região tipo p, (3) zona de carga espacial, onde se formou a junção pn e o campo elétrico; (4) geração de par elétron-lacuna; (5) filme antirreflexo; (6) contatos metálicos. Fonte: (PINHO; GALDINO et al., 2014)

Caso o par seja gerado fora da zona de depleção, os portadores de carga provenientes tenderão a se locomover para a junção pn e serão coletados, isso antes do tempo de recombinação (antes que o elétron ocupe a lacuna originada pela excitação via fótons).

### 2.1.1.2 Características e curvas do módulo

Existem várias possibilidades de modelar um circuito de um módulo fotovoltaico. Para traçar as curvas características será usado o modelo de dois diodos, que é o método mais preciso mas computacionalmente mais pesado (MA; YANG; LU, 2014). O modelo consiste em dois diodos em paralelo, com uma resistência em paralelo ligado em série com uma resistência. O diagrama está demonstrado abaixo.

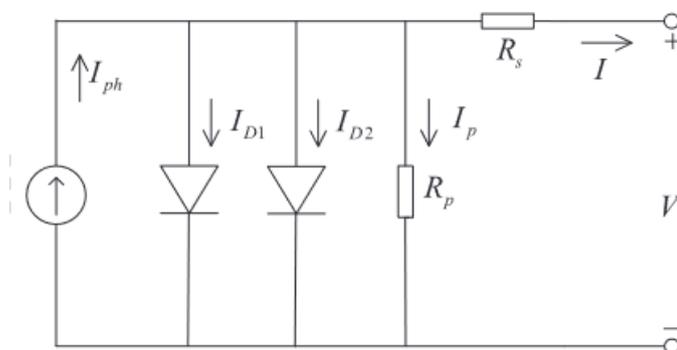


Figura 7: Modelo de circuito da célula fotovoltaica com dois diodos (MA; YANG; LU, 2014)

A curva I-V (corrente-tensão) de um módulo fotovoltaico é uma representação gráfica

fundamental para compreender o comportamento desse dispositivo em diferentes condições de operação. Essa curva mostra como a corrente elétrica gerada pelo módulo varia conforme a tensão aplicada. Em geral, a curva I-V começa com uma região de curto-circuito, onde a corrente é máxima e a tensão é próxima de zero. À medida que a tensão aumenta, a corrente diminui gradualmente até chegar à região de circuito aberto, onde a corrente é zero e a tensão é máxima.

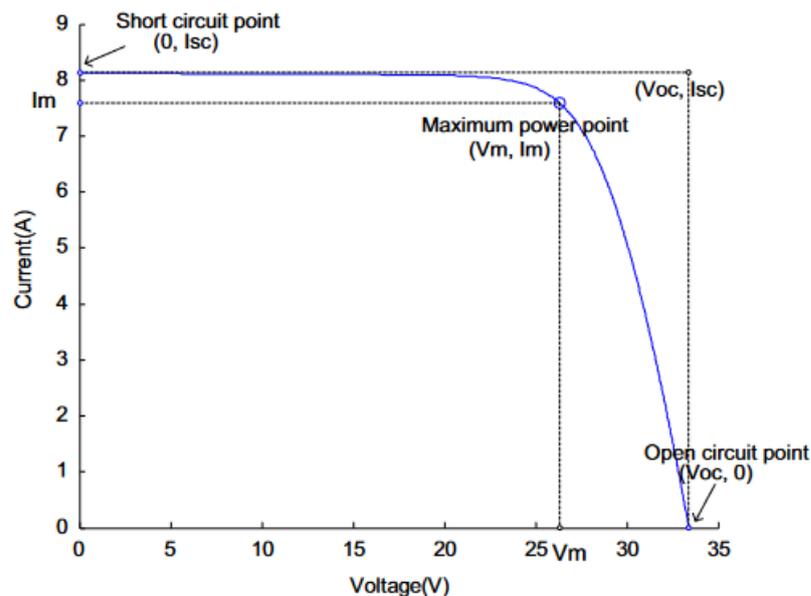


Figura 8: Curva I-V. (MA; YANG; LU, 2014)

Entre a região de curto-circuito e a de circuito aberto, há uma região intermediária conhecida como a região de potência máxima (PMP). Nessa região, o módulo fotovoltaico gera a máxima potência possível. É nessa faixa que a tensão e a corrente estão em equilíbrio ótimo para a máxima eficiência de conversão de energia solar em eletricidade.

A curva P-V (potência-tensão) complementa a curva I-V ao mostrar a relação entre a potência elétrica gerada pelo módulo e a tensão aplicada. A curva P-V possui uma forma característica, com um pico correspondente à potência máxima do módulo. Esse ponto, conhecido como ponto de máxima potência, representa o equilíbrio ideal entre a tensão e a corrente para obter a máxima eficiência do módulo.

A análise das curvas I-V e P-V de um módulo fotovoltaico é essencial para demonstrar a influência de outros fatores na eficiência dos módulos, como a irradiação e a temperatura. Serão mostrados os gráficos PV e IV, traçados através de métodos distintos e convergentes (MA; YANG; LU, 2014), que mostram a influência da radiação (figura 9) e da temperatura (figura 10) nestas curvas.

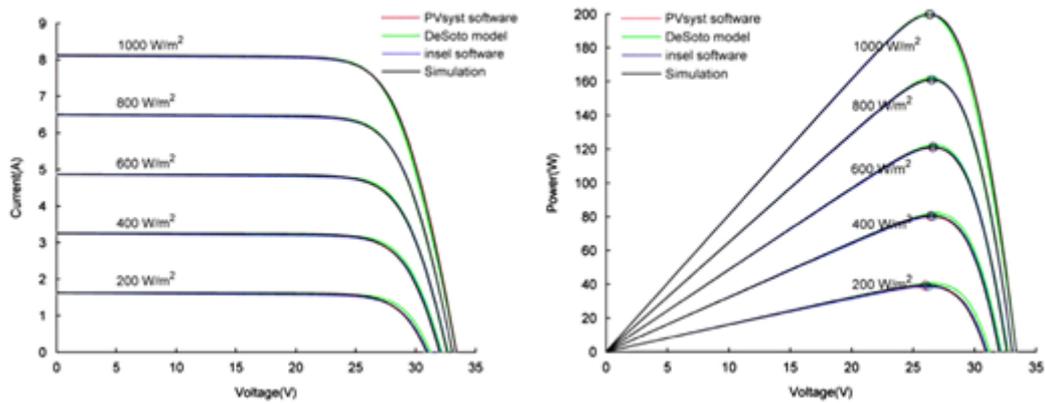


Figura 9: Curvas I-V e curvas P-V do módulo fotovoltaico em diferentes intensidades de radiação solar na temperatura de 25 °C. Fonte: (MA; YANG; LU, 2014)

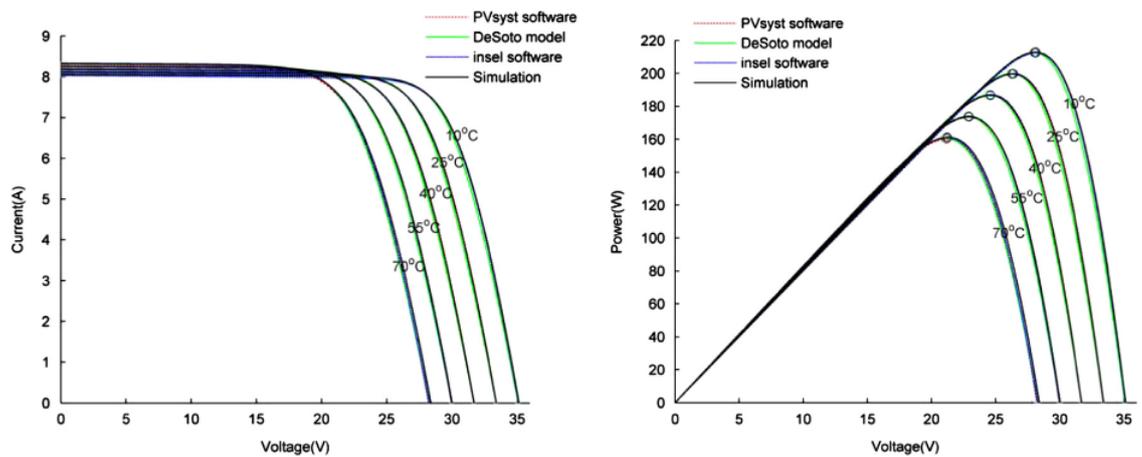


Figura 10: Curvas I-V e curvas P-V do módulo fotovoltaico em diferentes temperaturas irradiância = 1000 W/m². Fonte: (MA; YANG; LU, 2014)

Perceba que a determinação da energia produzida de um módulo depende de várias condições distintas e de grandezas que não apresentam comportamento lineares. Para uma aproximação do cálculo de energia gerada por um módulo, será usada a abordagem calculada no *System Advisor Model* (SAM), software de simulação de fontes de energias renováveis. O modelo de cálculo de potência de acordo com seu manual (GILMAN et al., 2018) é dada por:

$$P_{mp} = G\eta_m A_m \frac{\gamma_{mp,ref}}{100} (T_c - 25) \tag{2.1.2}$$

Em que:

- $P_{mp}$  é a potência do módulo em W
- $G$  é a Irradiância efetiva transmitida a célula em W/m².
- $\eta_m$  é a eficiência do módulo em porcentagem.

- $A_m$  é a área do módulo em  $m^2$ .
- $\gamma_{mp,ref}$  é o coeficiente de temperatura de potência máxima em  $\%/^{\circ}\text{C}$ .
- $T_c$  é a temperatura da célula em  $^{\circ}\text{C}$ .

A partir dessa equação de potência (equação 2.1.2) é possível deduzir a equação de energia de um módulo. A energia de um módulo ( $E_{mp}$ ) será dada por:

$$E_{mp} = \int_{t_0}^{t_1} G \eta_m A_m \frac{\gamma_{mp,ref}}{100} (T_c - 25) dt \quad (2.1.3)$$

### 2.1.2 Unidade de Condicionamento de Potência (UCP) - Inversores

O funcionamento dos inversores solares em uma usina fotovoltaica pode ser dividido em várias etapas principais. Os módulos solares fotovoltaicos convertem a luz solar em energia elétrica de corrente contínua. Cada módulo é composto por células solares que contêm materiais semicondutores, como o silício, capazes de gerar eletricidade quando expostos à luz solar. Essa energia solar capturada é fornecida aos inversores para serem convertidos em corrente alternada.

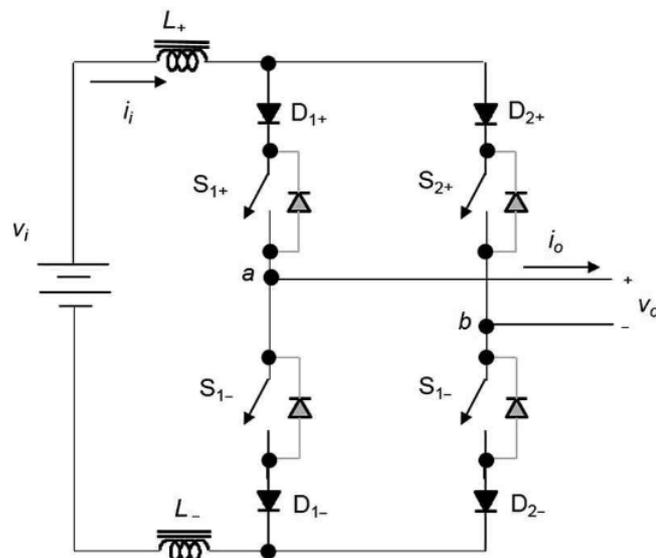


Figura 11: Topologia de inversor. Fonte: (RASHID, 2017)

O inversor solar é equipado com um algoritmo de MPPT (*Maximum Power Point Tracking*), responsável por rastrear e otimizar continuamente o ponto de máxima potência dos módulos solares. Isso é importante porque a potência gerada pelos módulos solares varia de acordo com a intensidade da luz solar e as condições ambientais. O MPPT garante que o inversor opere no ponto de máxima eficiência, obtendo a máxima energia possível dos módulos solares em diferentes condições.

A modulação por largura de pulso (PWM) é uma técnica empregada nos inversores

solares para controlar a saída de corrente alternada. A forma de onda de referência, gerada pelo oscilador interno do inversor, é comparada à forma de onda filtrada da corrente contínua dos módulos solares. Com base nessa comparação, o inversor ajusta a largura dos pulsos para reproduzir a forma de onda de corrente alternada desejada. O processo de modulação em PWM é ilustrada na figura 12.

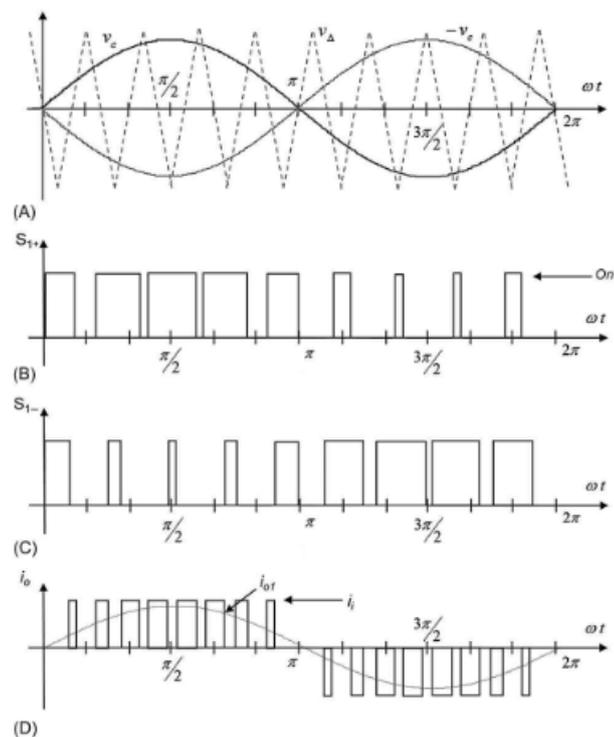


Figura 12: Modulação PWM em um inversor. Fonte: (RASHID, 2017)

Os transistores de potência do inversor são acionados pelos pulsos de largura modulada para converter a corrente contínua filtrada em corrente alternada de tensão e frequência adequadas à rede elétrica. Os transistores de potência alternam rapidamente a polaridade da tensão e corrente para produzir uma forma de onda de corrente alternada senoidal, em sincronia com a rede elétrica. Além disso, um filtro de saída é utilizado para melhorar a qualidade da forma de onda de saída, suavizando quaisquer ruídos ou distorções remanescentes.

Durante todo o processo, os inversores solares são equipados com sistemas de proteção para garantir a segurança do sistema e a integridade dos componentes. Esses sistemas de proteção incluem mecanismos para evitar sobretensão, sobrecorrente e curto-circuito. Além disso, os inversores solares geralmente possuem recursos de monitoramento, permitindo o acompanhamento em tempo real da produção de energia, eficiência do sistema e identificação de possíveis falhas ou problemas de desempenho.

Ao integrar os inversores solares em uma usina fotovoltaica, a corrente alternada produzida é entregue à rede elétrica para uso imediato ou entregue à sistemas de armazenamento de energia, como baterias.

### 2.1.3 Método de avaliação técnica a partir da taxa de desempenho

A taxa de desempenho, ou *Performance Ratio* (PR), é um parâmetro fundamental para avaliar o desempenho de uma planta fotovoltaica conectada à rede elétrica. Esse indicativo é usado para medir a eficiência da conversão da energia solar em energia elétrica utilizável e leva em consideração fatores como a perda de energia devido a degradação, sujeira e outros efeitos ambientais, além do consumo de energia durante o processo de operação. O PR é calculado dividindo a energia elétrica efetivamente disponível para exportação para a rede pelo potencial máximo teórico da planta.

O PR é amplamente utilizado como um indicador-chave de desempenho em estudos de desempenho de plantas fotovoltaicas conectadas à rede. Ele fornece uma medida mais precisa e abrangente do desempenho real da planta em relação ao seu potencial máximo. Ao contrário do rendimento final, o PR leva em consideração as variações na insolação real, o que o torna adequado para comparações entre diferentes sistemas fotovoltaicos em regiões com diferentes níveis de insolação.

Um valor alto de PR indica um bom desempenho da planta em relação a outros sistemas similares em condições climáticas semelhantes. Por outro lado, um PR baixo pode ser um indicativo de problemas ou falhas na planta. Portanto, o monitoramento contínuo do PR é essencial para identificar possíveis falhas e melhorar o desempenho do sistema. O cálculo do PR consiste justamente na razão entre a energia gerada de fato pela energia nominal calculada (SOLAR; AG, 2016). O SAM traduz essa razão para a seguinte equação:

$$PR = \frac{E_a(kWh)}{G_{POA}\eta_m} \quad (2.1.4)$$

Em que,  $E_a(kWh)$  é a energia produzida ao longo do período analisado,  $G_{POA}$  é a irradiação total no mesmo plano em que os módulos se encontram e  $\eta_m$  é a eficiência do módulo em porcentagem.

## 2.2 Sistemas de distribuição em rede reticulada

As redes de tensão secundária em corrente alternada, também conhecidas como redes secundárias, foram desenvolvidas na década de 1920 (IEEE 2018) com o objetivo de fornecer um serviço elétrico altamente confiável a áreas urbanas densamente povoadas, especialmente nas regiões centrais das grandes cidades. Para alimentar uma rede secundária, são necessários pelo menos dois alimentadores primários, mas o número de alimentadores pode variar de acordo com os requisitos de projeto, como a confiabilidade desejada e a demanda da rede.

Em uma cidade, não é raro encontrar várias redes em malha operando de forma independente. Os clientes que estão localizados em uma área coberta por uma rede secundária geralmente são atendidos diretamente pela rede, sem a necessidade de um transformador inter-

mediário. Já as redes em malha abrangem uma área maior e fornecem energia a vários clientes dispersos. Por outro lado, as redes exclusivas atendem a um único local ou a um número limitado de clientes. Independentemente do tipo de rede, a principal vantagem é o aumento da confiabilidade em comparação com outras formas de fornecimento de energia (IEEE 2018).

Os transformadores e os dispositivos de proteção da rede podem estar localizados em compartimentos subterrâneos abaixo das calçadas ou ruas, em estruturas suspensas em postes ou mesmo dispersos em edifícios altos. Em alguns casos, os dispositivos de proteção podem estar em ambientes desafiadores, como compartimentos subterrâneos sujeitos a submersão frequente, o que torna a integração com outros equipamentos de controle mais complexa. Os engenheiros de redes de distribuição costumam se referir a uma unidade de rede (*Network Unit*), que é composta geralmente por um transformador de rede, um disjuntor de baixa tensão, fusíveis, relés de potência reversa e relés de fase. Esses componentes essenciais garantem o funcionamento adequado da rede secundária.

### 2.2.1 Arquitetura dos sistemas reticulados

Existem dois tipos principais de redes secundárias: as redes do tipo exclusivo (*spot network*) e as redes em malha (*grid network*). Os detalhes de cada tipo de arquitetura serão abordados nas próximas seções.

#### 2.2.1.1 Sistema Reticulado em Malha (*Grid Network*)

A arquitetura de rede reticulada em malha, também conhecida como *Grid Network*, é um sistema de distribuição de energia elétrica que se destaca pela sua confiabilidade e capacidade de garantir um fornecimento contínuo de energia. Nesse sistema, os componentes são interconectados por meio da criação de uma malha de circuitos de baixa tensão, estabelecida pelos próprios consumidores. A alimentação da malha ocorre através de derivações no circuito de média tensão, em vários pontos estratégicos ao longo da malha de consumidores.

Uma característica importante desse tipo de sistema é a presença de câmaras subterrâneas de componentes em cada circuito de alimentação. Essas câmaras abrigam diversos elementos, como transformadores, chaves de média tensão e protetores de rede. O protetor de rede desempenha um papel fundamental ao garantir a proteção contra fluxos de potência reversos, realizar o monitoramento e a localização de faltas, além de oferecer recursos de automação para os sistemas de proteção.

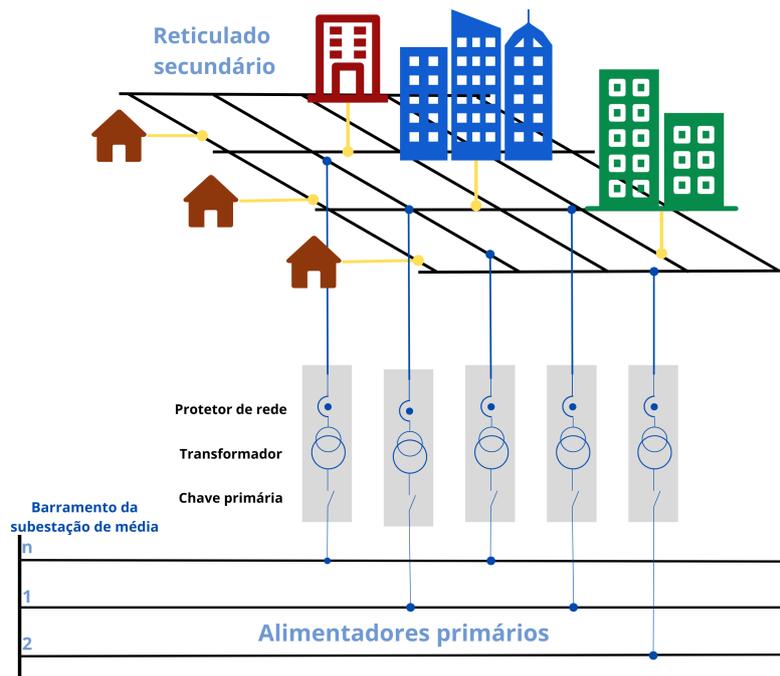


Figura 13: Diagrama Unifilar de um Sistema de Distribuição Reticulado em Malha (*Grid Network*).  
Fonte: Própria

A grande quantidade de alimentadores em derivação disponibilizados na arquitetura da rede reticulada em malha proporciona uma alta confiabilidade ao sistema. Mesmo em casos de falha em um dos alimentadores, os demais continuam operando em regime de contingência, assegurando a continuidade no fornecimento de energia elétrica.

No sistema reticulado em malha, a ruptura do fornecimento de um alimentador não implica necessariamente em uma falta de energia. Essa característica, aliada à capacidade de contingência proporcionada pelos demais alimentadores, confere maior confiabilidade e resiliência ao sistema, atendendo às necessidades de fornecimento contínuo de energia elétrica em diversas aplicações. A arquitetura da rede reticulada em malha é, portanto, uma solução eficiente para assegurar a disponibilidade no fornecimento de energia elétrica.

### 2.2.1.2 Sistema Reticulado Exclusivo (*Spot Network*)

Um *spot-network* é um tipo de sistema de distribuição de energia elétrica em que as unidades transformadoras alimentam um ou mais barramentos de um prédio ou um conjunto de prédios. Esse sistema pode ser iniciado com a instalação de alguns *spot-network*, alimentando cargas concentradas relativamente distantes entre si. À medida que novos prédios são construídos e os *spot-network* se aproximam, eles são interligados, formando o sistema reticulado propriamente dito.

Em contraste com o sistema reticulado em malha, a diferença do *spot-network* está na origem do próprio alimentador que compõe o barramento de baixa tensão. No entanto, as-

sim como no sistema em malha, a alta confiabilidade é garantida pela grande quantidade de alimentadores fornecendo energia elétrica ao mesmo barramento. A falha de um dos alimentadores não resulta necessariamente em queda no fornecimento de energia elétrica, devido à grande quantidade de alimentadores envolvidos nesse tipo de topologia.

O uso de *spot-network* é geralmente justificado em áreas de grande densidade de carga, devido ao seu alto custo de instalação. A abordagem de *spot-network* permite atender às necessidades de fornecimento de energia elétrica de forma eficiente em prédios ou conjuntos de prédios, concentrando-se nas cargas específicas que esses locais demandam.

Comparando com as redes em malha, podemos destacar que as redes exclusivas possuem uma arquitetura mais ampla e complexa, interligando um maior número de consumidores e alimentadores em derivação. Essa abordagem é voltada para garantir a confiabilidade do sistema de distribuição de energia elétrica em larga escala, utilizando a redundância e a resiliência da malha de circuitos de baixa tensão para manter o fornecimento contínuo de energia, mesmo em casos de falhas em alimentadores individuais.

Enquanto as *grid networks* abrangem uma área geográfica mais ampla, os *spot-network* são projetados para atender demandas específicas de cargas concentradas em prédios ou grupos de prédios. Ambas as abordagens têm como objetivo garantir a confiabilidade do fornecimento de energia elétrica, mas em escalas diferentes. A escolha entre as duas depende das características e necessidades da região ou das instalações em questão.

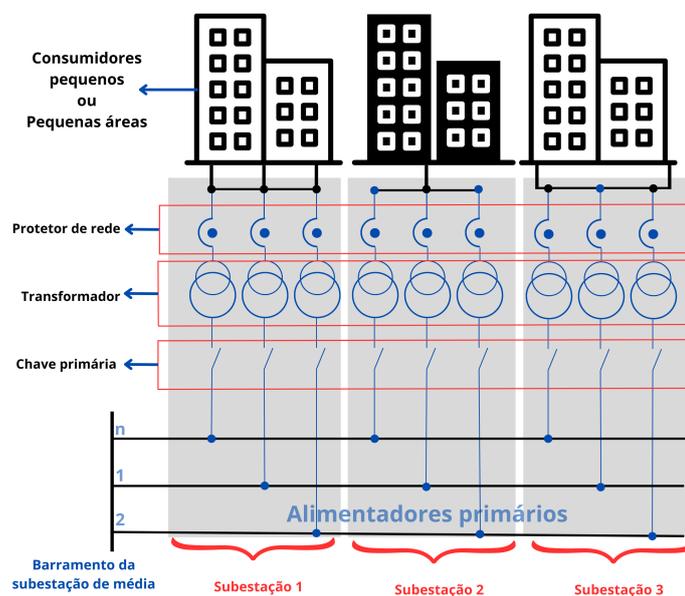


Figura 14: Diagrama Unifilar de um Sistema de Distribuição Reticulado Exclusivo (Spot Network).  
Fonte: Própria

Em resumo, os *spot-network* são sistemas de distribuição de energia elétrica que visam atender a cargas concentradas em prédios ou grupos de prédios. Eles oferecem confiabilidade e eficiência para essas cargas específicas, enquanto as *grid networks* têm uma abordagem mais

abrangente, conectando um maior número de consumidores e fornecendo um sistema de distribuição de energia elétrica em larga escala.

### 2.2.1.3 Proteção de Sistemas reticulados

O sistema de proteção desempenha um papel fundamental nos sistemas reticulados, conforme mencionado no texto anterior. Um dos componentes centrais desse sistema é o protetor de redes, composto por uma parte comutadora de potência e um controlador, conhecido como relé. O protetor de rede funciona como um religador de baixa tensão com comutação automática, controlado pelo relé. Sua função é interromper a passagem de corrente em situações específicas, como fluxo reverso de potência e diferença de ângulo de fase entre os barramentos.

A norma IEEE Std. C57.12.44, 2014 é uma referência importante para o funcionamento dos protetores de rede em sistemas reticulados. Ela estabelece diretrizes detalhadas para os processos de abertura e fechamento dos contatos de potência do protetor, levando em consideração vários parâmetros importantes.

É importante ressaltar que a norma também aborda alguns ajustes opcionais que podem ser realizados nos protetores de rede. Um desses ajustes é o tempo de retardo de operação, que permite a configuração de um atraso específico para casos de variações cíclicas no fluxo de potência. Outro ajuste é o ângulo de operação em potência não reversa, que indica uma falha no primário do transformador, conhecida como característica Watt-Var. Esse ajuste é especialmente útil quando o sistema é utilizado com cargas especiais que possuem fatores de potência diversos.

O processo de abertura dos contatos de potência nos protetores de rede, conforme descrito na norma, é acionado em determinadas situações. Isso ocorre quando há fluxo de potência da rede de baixa tensão para o transformador, indicando possíveis falhas no circuito primário ou no transformador. Além disso, a abertura dos contatos também é acionada em casos de corrente reversa de magnetização do transformador através dos enrolamentos de baixa tensão. Essa função de abertura tem como objetivo impedir que as correntes provenientes de outros alimentadores sejam conduzidas para o alimentador com falha, garantindo a segurança e o correto funcionamento do sistema de distribuição de energia elétrica.

O processo de fechamento dos contatos de potência ocorre para manter o fluxo de potência ativa ou reativa no sentido do transformador para a rede de baixa tensão. Esse fechamento é realizado quando as condições adequadas são verificadas, como a diferença de tensão e fase entre as tensões trifásicas da rede e do transformador. Para garantir o funcionamento adequado do sistema, o relé de proteção contra fluxo reverso de potência verifica se a tensão eficaz do transformador é ligeiramente superior à da rede e se a diferença de fase está dentro dos parâmetros estabelecidos (geralmente entre  $+85^\circ$  e  $-15^\circ$  em relação à tensão da rede). O fechamento dos contatos de potência visa manter a continuidade do fornecimento de energia elétrica de forma segura e confiável, evitando possíveis interrupções no sistema de distribuição.

Comparando com as redes em malha, os sistemas reticulados possuem uma arquitetura

mais complexa, com interligação entre alimentadores e maior quantidade de protetores de rede. Essa interconexão e redundância dos alimentadores proporcionam uma maior confiabilidade ao sistema, permitindo que o fornecimento de energia seja mantido mesmo em caso de falhas em um ou mais alimentadores. Já nas redes exclusivas, a interconexão é menos complexa, e o sistema é projetado para operar em um arranjo mais linear, o que pode impactar a confiabilidade em caso de falhas. Ambas as abordagens possuem suas vantagens e são aplicadas de acordo com as necessidades específicas de cada sistema de distribuição de energia elétrica.

#### **2.2.1.4 Incompatibilidade do Sistema Reticulado Subterrâneo e o Sistema de Compensação de Energia Elétrica**

A integração de sistemas fotovoltaicos em redes reticuladas apresenta desafios específicos devido às características intrínsecas dessas fontes de energia renovável e às particularidades das redes elétricas existentes. Para garantir a operação segura e eficiente desses sistemas, normas técnicas têm sido estabelecidas, fornecendo diretrizes e requisitos a serem seguidos. A seguir, serão discutidas algumas incompatibilidades comumente encontradas e as normas técnicas utilizadas como parâmetro para a sua mitigação.

Uma incompatibilidade relevante é a variação da tensão na rede elétrica em decorrência da intermitência e imprevisibilidade da geração fotovoltaica. A norma técnica de referência (IEEE 2018) estabelece diretrizes para a interconexão de sistemas de geração distribuída, incluindo sistemas fotovoltaicos, com redes elétricas. Ela define requisitos específicos para a qualidade da energia, incluindo limites de variação de tensão, frequência e distorção harmônica. O cumprimento desses requisitos ajuda a minimizar os impactos da geração fotovoltaica na estabilidade e na qualidade do fornecimento de energia.

Outra incompatibilidade é a possibilidade de fluxo reverso de energia do sistema fotovoltaico para a rede reticulada, especialmente em situações de baixa demanda ou geração em excesso. A norma técnica IEC 62116:2014 aborda a capacidade dos inversores utilizados em sistemas fotovoltaicos de lidar com a potência reativa e o controle de tensão durante essas condições adversas. Essa norma estabelece requisitos de desempenho para garantir que os inversores sejam capazes de operar de forma segura e eficiente, evitando o impacto negativo na rede elétrica.

Além disso, a norma técnica IEC 61727:2016 aborda as questões relacionadas à proteção contra distúrbios de frequência na rede elétrica decorrentes da integração de sistemas fotovoltaicos. Essa norma estabelece critérios e métodos para avaliar o desempenho do sistema fotovoltaico em relação à resposta dinâmica da frequência da rede elétrica. Ela define requisitos para garantir que o sistema fotovoltaico seja capaz de se adequar às variações de frequência, contribuindo para a estabilidade do sistema.

Adicionalmente, a incompatibilidade com o sistema de compensação de energia é uma preocupação significativa. A utilização de sistemas de compensação de energia, como o sistema de créditos de energia (net metering), pode apresentar desafios de integração. Normas técnicas específicas, como a Resolução Normativa ANEEL 482/2012 no Brasil, fornecem diretrizes para a

interconexão de sistemas de geração distribuída e o processo de compensação de energia. Essas normas abordam requisitos técnicos, contratuais e de medição necessários para garantir a correta operação e contabilização da energia injetada e consumida pelo sistema fotovoltaico.

Portanto, a compatibilidade entre um sistema fotovoltaico e uma rede reticulada requer a conformidade com normas técnicas específicas. Essas normas fornecem os parâmetros necessários para garantir a segurança, a eficiência e a qualidade da energia na interconexão desses sistemas. É fundamental que os projetistas, instaladores e operadores de sistemas fotovoltaicos estejam cientes dessas incompatibilidades e adotem as medidas adequadas para atender aos requisitos estabelecidos pelas normas técnicas.

## **2.3 Baterias**

Uma bateria é composta por um agrupamento de células eletroquímicas interconectadas fisicamente e eletricamente em série e/ou paralelo, com o objetivo de gerar um aumento na tensão ou na corrente elétrica. Cada célula individual dentro da bateria é um dispositivo autônomo que converte energia química em energia elétrica por meio do processo de oxirredução. Durante esse processo, ocorre a troca de cargas entre um agente redutor e um oxidante, resultando na geração de corrente elétrica. A tensão elétrica produzida por uma bateria depende tanto da quantidade de células presentes na configuração da bateria quanto do tipo de material utilizado nas reações de oxirredução.

No caso particular dos sistemas fotovoltaicos, a utilização de um banco de baterias é recomendada em duas situações principais. Primeiramente, em sistemas isolados, nos quais não há conexão com a rede elétrica, o banco de baterias desempenha um papel fundamental. Ele armazena o excesso de energia gerada pelos módulos solares durante o dia, permitindo seu uso durante a noite ou em momentos de baixa geração solar.

Em segundo lugar, o banco de baterias pode ser utilizado como uma fonte de energia de backup para cargas prioritárias em casos de falha na rede elétrica. Quando ocorre uma interrupção na rede, o inversor fotovoltaico deve desligar (função anti-ilhamento) para garantir a segurança dos técnicos que trabalham na rede. Nessa situação, mesmo que o sistema fotovoltaico continue gerando energia, a usina será desativada. O banco de baterias entra em ação, fornecendo energia emergencialmente para atender às cargas prioritárias.

Dessa forma, o banco de baterias ou acumuladores de carga podem ser entendidos como um sistema de backup de energia para alimentar cargas prioritárias em sistemas fotovoltaicos. Eles garantem um fornecimento contínuo de energia em situações onde não há acesso à rede elétrica ou em casos de falha na mesma.

### 2.3.1 Dimensionamento de baterias

O dimensionamento do sistema de baterias para sistemas fotovoltaicos deve considerar as diversas especificidades de cada sistema. A quantidade de ciclos de carga-descarga, a profundidade de carregamento, a quantidade de carga desejada para ser utilizada em contingência e a tensão de fornecimento das baterias são fatores a serem considerados no dimensionamento de baterias. Tendo em vista que alguns dos conceitos supracitados são importantes para a compreensão do futuro dimensionamento do banco acumulador de carga, far-se-á um breve resumo de alguns conceitos relativos às baterias diretamente extraídos das referências (PINHO; GALDINO et al., 2014):

- Autodescarga: É um processo de descarregamento espontâneo das baterias. Mesmo que não estejam em uso, as baterias sofrem processos químicos internos que acarretam na perda de sua energia armazenada. A taxa de autodescarga é, normalmente, especificada como uma porcentagem mensal perdida.
- Efeito Memória: Consiste na perda de capacidade de armazenamento de energia. Isso ocorre quando, por exemplo, o sistema de controle ou supervisão indica que a bateria se encontra carregada e no próximo instante já se encontra com aviso de bateria fraca.
- Capacidade: Refere-se à capacidade de carga que uma bateria pode armazenar. Pode ser expressa em termos de ampères-hora (Ah) ou em termos de energia (Wh). A capacidade pode ser subclassificada como:
  - Capacidade Nominal: É a estimativa conservadora do fabricante da quantidade de carga que pode ser retirada de uma bateria considerada nova, considerando determinados fatores como corrente de descarga e temperatura determinados pelo próprio fabricante
  - Capacidade Instalada: Total de carga que pode ser retirada de uma bateria nova, considerando condições operacionais específicas.
  - Capacidade Disponível: Total de carga que pode ser extraído de uma determinada bateria, sob um conjunto específico de condições operacionais, incluindo a taxa de descarga, temperatura, estado inicial de carga e tensão de corte.
- Ciclo: Sequência de carga-descarga de uma bateria até uma determinada profundidade de descarga.
- Estado de Carga (SOC - State of Charge): É a capacidade remanescente disponível em uma bateria ou célula em um determinado momento, expressa em porcentagem da capacidade nominal. A título de exemplo, se a capacidade nominal de uma bateria é de 100 Ah, o consumo de 25 Ah representa uma profundidade de descarga de 25%. Dessa forma, matematicamente o SOC é definido como:

$$S(\%) = 100 \times \frac{C_{\text{remanescente}}}{C_{\text{nominal}}} \quad (2.3.1)$$

- Profundidade de Descarga: É a porcentagem remanescente de energia após uma descarga. Portanto, pode ser definida matematicamente como:

$$P(\%) = 100 - S(\%) \quad (2.3.2)$$

Sendo  $P$  a profundidade de descarga e  $S$  o Estado de Carga mencionado anteriormente, é importante ressaltar a importância da definição e estimativa das profundidades de descarga a serem utilizadas. Além de ser uma quantidade crucial para o dimensionamento adequado das baterias, a profundidade de descarga influencia diretamente no tempo de vida útil da bateria.

Desse modo, considerando todos os aspectos supracitados para dimensionamento de um banco de baterias, sabe-se que a capacidade desse banco é dado por:

$$C_{ap}(Ah) = \frac{C_{carga} T_{autonomia}}{V_{baterias} P_{descarga}} \quad (2.3.3)$$

Sendo  $C_{ap}$  a capacidade da bateria,  $C_{carga}$  o consumo da carga,  $T_{autonomia}$  o tempo de autonomia,  $V_{baterias}$  a tensão nominal do banco de baterias e  $P_{descarga}$  a profundidade de descarga estimada para o banco de baterias. Prevendo-se a capacidade e de acordo com as características de uso da usina pode ser escolhido o tipo adequado de bateria.

## 2.4 Baterias de íon Lítio

As baterias de íon-lítio têm se destacado como uma das grandes conquistas da eletroquímica moderna. Elas desempenham um papel estabelecido no mercado de eletrônicos de consumo e estão se preparando para dominar os mercados de transporte automotivo elétrico e armazenamento de energia renovável. Com avanços contínuos, essas baterias têm demonstrado vantagens significativas.

Uma das principais vantagens das baterias de íon-lítio é sua alta densidade de energia, o que as torna compactas e leves, permitindo seu uso em dispositivos portáteis. Além disso, elas possuem uma taxa de autodescarga baixa e uma eficiência de carga e descarga superior a outras tecnologias de baterias recarregáveis (SCROSATI; GARCHE, 2010).

O uso de baterias de íon-lítio apresenta desafios a serem superados. É necessário o emprego de um Sistema de Gestão de Baterias (BMS) para garantir a utilização ideal da bateria, reduzindo riscos de danos e prolongando sua vida útil. No entanto, essas baterias geralmente possuem um preço mais elevado em comparação com outras tecnologias disponíveis. Além disso, elas são sensíveis a altas temperaturas, o que pode resultar em degradação mais rápida. Sobrecargas podem levar à perda de capacidade ou até mesmo a fugas térmicas nas baterias de íon-lítio, exigindo cuidados extras. Portanto, é essencial desenvolver soluções para lidar com essas questões, como melhorias no design das baterias, sistemas de gerenciamento avançados e medidas de controle de temperatura, a fim de maximizar a segurança, eficiência e longevidade dessas baterias.

## 2.5 Microrrede

As microrredes são sistemas de geração, armazenamento e distribuição de energia elétrica que operam de forma independente ou conectados à rede elétrica principal. Elas são compostas por uma combinação de fontes de energia, como geradores distribuídos, sistemas de armazenamento de energia e cargas locais, coordenados por um sistema de gerenciamento energético (HATZIARGYRIOU, 2014).

Uma microrrede pode funcionar de duas maneiras: em paralelo com a rede de distribuição principal ou de forma isolada, conhecida como modo ilhado. No modo paralelo, a microrrede está interconectada com a rede elétrica principal, permitindo o compartilhamento de energia bidirecional entre a microrrede e a rede (HATZIARGYRIOU, 2014). Isso possibilita que a microrrede aproveite os recursos disponíveis na rede elétrica e forneça energia adicional quando necessário. Além disso, no modo paralelo, a microrrede pode fornecer serviços auxiliares à rede elétrica, como regulação de frequência e compensação de reativos. Por outro lado, no modo ilhado, a microrrede é desconectada da rede elétrica principal e opera de forma autônoma. Ela utiliza seus próprios recursos de geração de energia, como módulos solares, turbinas eólicas ou sistemas de armazenamento de energia, para suprir as demandas internas da microrrede.

Uma microrrede deve equilibrar a geração e a demanda de energia para manter a estabilidade da frequência e tensão. Quando a geração é maior que a demanda, ocorre um desequilíbrio que pode levar a problemas de controle de frequência e tensão. Para resolver isso, técnicas avançadas de controle e gerenciamento de energia, como algoritmos de previsão de demanda e geração, e estratégias de controle inteligentes, são utilizadas.

A proteção em microrredes é um aspecto fundamental para garantir a operação segura e confiável desses sistemas de distribuição de energia. A proteção em microrredes deve ser capaz de lidar com falhas tanto na rede elétrica principal quanto dentro da própria microrrede. Em caso de falha na rede elétrica, é necessário isolar rapidamente a microrrede da rede principal para proteger as cargas da microrrede (HATZIARGYRIOU, 2014). Isso requer o desenvolvimento e a instalação de dispositivos de proteção adequados, como chaves estáticas eletrônicas ou disjuntores operados eletricamente, combinados com proteção de sobrecorrente direcional. Por outro lado, se ocorrer uma falha dentro da microrrede, o sistema de proteção deve ser capaz de isolar a menor seção possível do alimentador de distribuição para eliminar a falha. Além disso, a proteção em microrredes precisa lidar com os desafios adicionais causados pela presença de recursos de energia distribuída, que podem alterar a magnitude e a direção das correntes de falha, afetando a operação dos dispositivos de proteção convencionais (HATZIARGYRIOU, 2014).

As microrredes geralmente incorporam fontes de energia renovável, como sistemas fotovoltaicos, que são suscetíveis a flutuações e incertezas na geração de energia devido às variações climáticas. O desafio é integrar essas fontes de energia renovável de maneira eficiente, garantindo a estabilidade e confiabilidade da microrrede. Soluções incluem o uso de técnicas avançadas de controle de energia, como o armazenamento de energia para compensar a variabilidade da geração solar, e o desenvolvimento de algoritmos de previsão mais precisos (HATZIARGYRIOU,

2014).

Em conclusão, as microrredes oferecem uma abordagem inovadora para o fornecimento de energia elétrica, proporcionando maior autonomia, flexibilidade e eficiência energética. No entanto, é necessário enfrentar os desafios técnicos e operacionais para garantir a viabilidade e a adoção generalizada das microrredes em diferentes contextos e aplicações.

## 3 Proposta Metodológica

O objetivo desta seção é propor metodologias que possam ser aplicadas em um caso real, para que desta maneira possam ser levantadas alternativas para o uso desta energia não aproveitada pela usina fotovoltaica,

Para resolver esse desafio, a abordagem considerada é a implementação de um sistema de armazenamento de energia, permitindo o uso de energia excedente ou a atenção às cargas prioritárias durante as contingências de energia. Este estudo será realizado como um estudo de caso de uma usina solar fotovoltaica não identificada localizada em uma região atendida por um sistema de distribuição reticulado em Brasília-DF.

Assim, o contexto inicial fornecido nesta seção nos permitirá avançar para a descrição das metodologias adotadas neste estudo.

### 3.1 Fluxograma do trabalho

Como este trabalho inclui uma abrangência de diversos dados e conceitos que podem se embaralhar pela quantidade de processos e análises que serão realizados. Para ilustrar a metodologia do trabalho, segue na figura 15 o fluxograma que explicita mais didaticamente o trabalho.

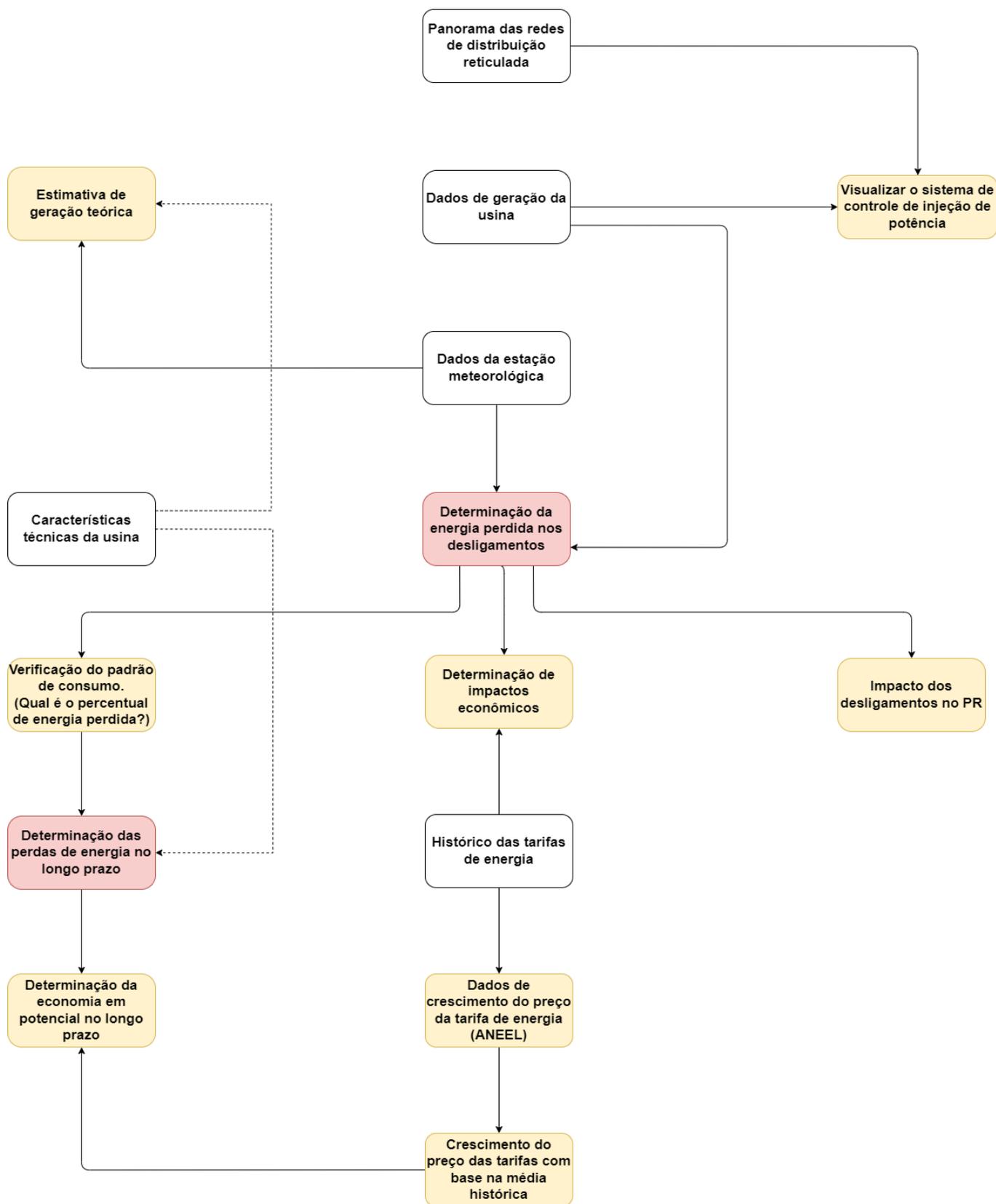


Figura 15: Fluxograma do trabalho

O esquema de cores da figura 15 funciona da seguinte maneira:

- As caixas de cor brancas ilustram a matéria prima do trabalho, são dados e/ou informações cruciais de fontes primárias para se dar início ao processo.
- As caixas de cor amarela ilustram análises intermediárias, que foram realizadas a partir das informações iniciais. É possível extrair novas informações que não são o foco de conclusão do trabalho mas que irão ser fundamentais para os resultados mais relevantes
- Por último, as caixas em vermelho são os resultados mais relevantes do trabalho, que aglutinam diversas informações e processos para convergir em uma conclusão intermediária ou definitiva.

### 3.2 Metodologia de cálculo de energia perdida pelos desligamentos

Para obter os valores teóricos de geração de energia, será utilizado o software de simulação SAM (*System Model Advisor*). Esse software é amplamente reconhecido no setor de energia renovável e permite modelar o desempenho de sistemas fotovoltaicos com base em dados climáticos e características técnicas específicas da usina.

Com base nos dados climáticos da estação meteorológica associada à estação de Brasília do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), configuramos o SAM para calcular os valores teóricos de geração de energia solar. O software leva em consideração parâmetros como radiação solar incidente, inclinação dos painéis solares, eficiência do sistema, sombreamento, localização geográfica, entre outros fatores relevantes. Dessa forma, podemos estimar a quantidade de energia que seria gerada idealmente pela usina em cada dia.

Após obter os valores teóricos de geração de energia solar para cada dia através do software SAM, compara-se esses valores com os dados reais de geração obtidos a partir das medições realizadas na usina. Esses dados reais são geralmente obtidos diretamente do inversor ou de um medidor localizado no padrão de entrada da edificação.

Ao comparar o valor teórico com o valor real de geração de energia em um determinado dia, é possível quantificar a quantidade de energia que foi perdida devido aos desligamentos ocorridos nesse período. Essa diferença entre os valores teórico e real representa a energia que não foi produzida devido ao sistema de controle, que desliga o inversor para atender as recomendações da rede de distribuição.

$$E_n = E_{teorica} - E_{real} \quad (3.2.1)$$

Em que,  $E_n$  é a energia não utilizada em kWh,  $E_{teorica}$  é a energia teórica de simulação em kWh, e  $E_{real}$  é a energia medida em pelo inversor em kWh.

É importante ressaltar que o cálculo da energia perdida diariamente considera apenas os desligamentos que afetaram diretamente a geração de energia solar. Outros fatores que possam

causar variações na geração podem ser tratados em análises complementares, mas estão fora do escopo desta subseção.

Dessa forma, a metodologia adotada permite estimar a quantidade de energia perdida diariamente em decorrência dos desligamentos, proporcionando uma avaliação precisa do desempenho da usina e identificando oportunidades de melhoria na operação e manutenção dos sistemas fotovoltaicos.

### 3.3 Determinação do padrão de consumo da edificação no longo prazo

Após a determinação dos valores de energia não utilizado, é necessário procurar um padrão, uma regra básica, que demonstre quando a usina funcionará em sua plenitude e quando o sistema de controle de injeção de potência age. A determinação desse padrão é fundamental para realizar uma projeção futura. De antemão, a partir de conversa com os gestores da edificação e de uma análise preliminar dos dados, é possível definir um padrão, em regra a usina gera normalmente nos dias úteis e gera um valor mínimo, na maior parte vezes nulo, no restante do ano.

Esse padrão se deve a quantidade de pessoas circulando na área. A maior carga de energia da unidade consumidora é com a refrigeração do local. Portanto, a usina tende a funcionar nos dias úteis e em horário comercial (momentos em que há maior quantidade de pessoas e, por consequência, maior demanda), com exceções a eventos ou outras ocasiões especiais.

Como se tem um padrão estabelecido dos momentos em que há e que não há geração, será adotada uma premissa para prever o padrão de energia não utilizada à longo prazo. Como premissa, será levado em conta o seguinte cenário: **a proporção entre a energia teórica gerada e a energia não utilizada permanecerá constante ( $\beta$ )**. Isso se deve pela expectativa de que não haja uma mudança brusca no padrão de geração da usina e nem no padrão de consumo da unidade consumidora, o que gera uma previsibilidade à longo prazo.

Para determinar a energia não utilizada em um ano, será necessário determinar a proporção  $\beta$  de energia que não é utilizado em uma ano. E para determinar essa constante serão utilizados os valores do ano de referência.

$$\beta = \frac{En}{E_t} \quad (3.3.1)$$

Em que  $E_t$  é a estimativa de geração teórica em kWh e  $En$  é energia não utilizada em kWh. Com isso, a partir dessa equação é possível dar prosseguimento a uma análise de longo prazo, uma vez que a partir da equação é possível determinar a energia não gerada em qualquer ano. Para encontrar esse valor será necessário a constante  $\beta$ , que será calculada com base a ser analisado, e do valor teórico de geração no ano a ser analisado.

### 3.4 Dimensionamento das baterias

Como já citado anteriormente, a usina possui um padrão de geração, gera normalmente em dias úteis e é desligada nos finais de semana e nos feriados. É necessário levar essa informação em conta no dimensionamento das baterias, desta forma as baterias armazenariam a energia dos dias em que a usina não geraria deve ser gasta nos dias úteis seguintes ao armazenamento.

Assim, pode-se reduzir o ciclo de armazenamento nas seguintes etapas: as baterias são recarregadas em finais de semana e feriados, nos dias úteis, a microrrede alimentaria a edificação de forma paralela a concessionária com essa energia armazenada, o que descarrega as baterias, que estarão aptas à próxima recarga.

Existem uma variedade de critérios para determinar o valor do dimensionamento das baterias, o ideal seria ter as informações de consumo da edificação, para a elaboração de um critério mais robusto. Pois, teria como traçar as curvas de geração e de consumo e realizar análises mais complexas.

Com base nesse ciclo e nas informações disponíveis, tem-se uma base para adotar um critério para o dimensionamento. **O critério a ser adotado para o dimensionamento serão os três dias com os maiores valores de energia não utilizada, que é a diferença do valor de geração teórico e o valor medido de geração.** A razão do número de três dias se dá de maneira a incluir a maior parte dos feriados que são emendados com o final de semana. E o motivo da escolha dos três maiores, é uma tentativa de garantir que a energia desses feriados emendados sempre seja armazenada e que períodos de recesso ou de feriados mais prolongados tenham parte de sua energia armazenada. Além disso, outra razão de ser escolher os maiores valores e não o valor médio, por exemplo, é que na escolha do valor médio não atenderá os dias em que a geração superar a média, ou seja, ainda haverá uma quantidade relevante de energia não utilizada. E também garantir que não haja um sobre dimensionamento e ter uma parcela de carga do banco que não seja utilizada, o que não seria economicamente interessante, uma vez que seria comprado um sistema de armazenamento que seria subutilizado. O preço a ser adotado é de US\$ 250,00 por kWh, pela projeção aproximada para o ano de 2024 pela figura 24 de um dos trabalhos de referência (HANNAN et al., 2018). A cotação do dólar no dia em que esse parágrafo foi redigido, dia 29/07/2023, é de aproximadamente R\$ 4,72. Portanto, com essa cotação o custo da bateria é de R\$ 1181,19 por kWh.

Em suma, o critério adotado visa trazer um equilíbrio dentre o padrão de consumo, da energia não utilizada em finais de semana e feriados, da energia não utilizada em feriados mais longos e de fatores econômicos no caso de um sobredimensionamento.

### 3.5 Energia não utilizada ao longo do tempo

Como já foi elucidado anteriormente, a equação base que dita a energia gerada por um módulo fotovoltaico (2.1.3) compreende diversos fatores que mudam ao longo do tempo. Dentre

esses fatores temos: a radiância efetiva transmitida a célula ( $G$ ), a temperatura da célula ( $T_c$ ) e a eficiência do módulo ( $\eta_m$ ).

A maior parte das grandezas supracitadas não tem um padrão definido de comportamento que se possa prever com a tecnologia atual, são frutos de condições climáticas. Para contornar esse problema e ter a capacidade de gerar uma previsão de energia será feita a mais uma simulação, mas com uma mudança nos dados climáticos.

Para estimar a geração no longo prazo, será necessário determinar um ano meteorológico típico, *Typical Meteorological Year*, que é um compilado de dados climáticos referentes a diversos anos, neste caso será utilizado um arquivo que retrata dos anos de 2007 a 2021 da cidade de Brasília. E a partir desses dados será possível determinar uma geração teórica típica via SAM.

Dentre essas grandezas da equação de energia do módulo, apenas a eficiência do módulo varia de maneira estabelecida, varia de acordo com a degradação anual do módulo, que é demonstrado na tabela 2, que decai um percentual determinado ao longo do tempo, sendo de 2,5% no primeiro ano e de 0,5% nos demais.

A partir dessas informações, se terá a informação da energia total gerado em um ano típico e a partir da equação 3.3.1, é possível definir a energia não utilizada em um ano típico como demonstrado abaixo:

$$E(t) = E_{tt} * (1 - d_{mt})^t \quad (3.5.1)$$

Em que  $E(t)$  é a energia teórica no ano futuro em kWh,  $E_{tt}$  é a energia simulada em um ano típico em kWh,  $d_{mt}$  é o decaimento do módulo.

E a partir da combinação das equações 3.5.1 e 3.3.1 é possível chegar a uma equação final que estima o valor da energia não utilizada ao decorrer do tempo

$$E_n = \beta E_{tt} * (1 - d_{mt})^t \quad (3.5.2)$$

### 3.6 Metodologia referente à estimativa de economia da utilização de energia perdida

Prever a economia da utilização da energia não aproveitada não é uma tarefa trivial, uma vez que é uma questão multifatorial desde o valor do dólar, passando pelo recurso hídrico do país ao padrão de consumo da usina. E essas grandezas não possuem um padrão óbvio de evolução ao longo do tempo e nem uma relação de dependência visível.

Partindo da seguinte equação:

$$V_{ecn} = \sum_{t=1}^T E_{nt} P_{et} \quad (3.6.1)$$

Em que:

- $V_{ecn}$  é o valor economizado em R\$.
- $T$  número de meses a ser avaliado.
- $E_n$  é a energia não utilizada pela usina no ano  $t$ .
- $P_e$  é o preço da tarifa de energia no ano.

Tem-se dois termos que variam ao longo do tempo, a energia não utilizada depende do padrão de consumo da unidade, do irradiação e de outros fatores climáticos como a velocidade do vento. Já o preço da tarifa depende de políticas públicas, do valor do dólar, pois o Brasil importa parte de sua energia, da disponibilidade de recursos hídricos. Além de fatores imponderáveis como uma pandemia ou uma guerra.

Para ilustrar a ausência de padrão do crescimento do preço da tarifa, a figura 16 mostra o crescimento acumulado da tarifa de energia residencial.

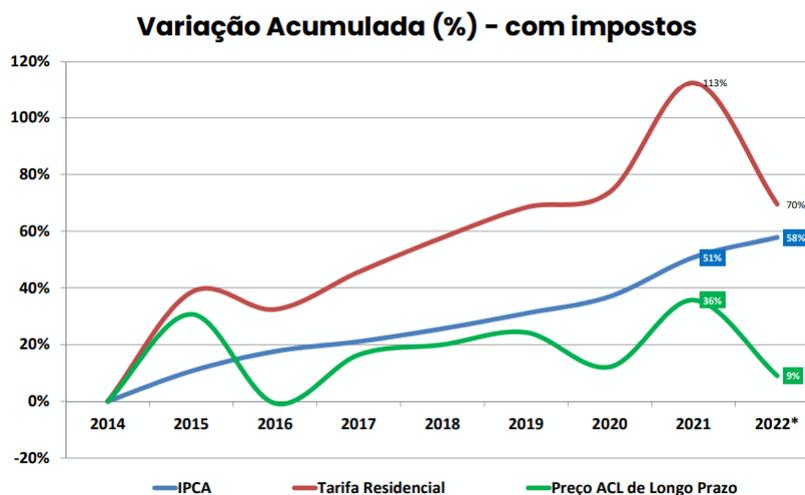


Figura 16: Variação da tarifa residencial de 2014 a outubro de 2022. Fonte:(ABRACEEL, 2023)

A partir da observação da figura nota-se um crescimento acelerado de 2020 para 2021 e mostra uma queda abrupta de 2021 para 2022. A queda se deve pela redução da carga tributária da energia e pela melhora do cenário hidrológico (ABRACEEL, 2023).

Como a evolução de preço das tarifas é bastante imprevisível será adotado um cenário em que o crescimento médio das tarifas se mantém à longo prazo. Desta forma basta resgatar o histórico de preço das tarifas e determinar esse crescimento médio

O site da ANEEL disponibiliza o histórico de tarifas para cada concessionária, para cada modalidade e cada subgrupo. A partir da conta de energia do edifício em questão, foi analisado o valor da tarifa da Neo energia, modalidade azul do subgrupo "AS" do ano de 2012 a novembro 2022 (tabela 1). Desta maneira, é possível determinar o crescimento médio da tarifa nos últimos 10 anos.

Tabela 1: Histórico de tarifas. Fonte ANEEL

Sigla	Resolução ANEEL	Início Vigência	Base Tarifária	Modalidade	Posto	TE(R\$/MWh)
Neoenergia Brasília	REH N° 1.335	26/08/2012	Tarifa de Aplicação	Azul	Fora ponta	145.98
Neoenergia Brasília	REH N° 1.446	24/01/2013	Tarifa de Aplicação	Azul	Fora ponta	128.06
Neoenergia Brasília	REH N° 1.589	26/08/2013	Tarifa de Aplicação	Azul	Fora ponta	139.04
Neoenergia Brasília	REH N° 1.779	26/08/2014	Tarifa de Aplicação	Azul	Fora ponta	174.66
Neoenergia Brasília	REH N° 1.858	02/03/2015	Tarifa de Aplicação	Azul	Fora ponta	189.34
Neoenergia Brasília	REH N° 1.937	26/08/2015	Tarifa de Aplicação	Azul	Fora ponta	234.21
Neoenergia Brasília	REH N° 2.161	22/10/2016	Tarifa de Aplicação	Azul	Fora ponta	257.49
Neoenergia Brasília	REH N° 2.214	01/04/2017	Tarifa de Aplicação	Azul	Fora ponta	252.19
Neoenergia Brasília	REH N° 2.316	22/10/2017	Tarifa de Aplicação	Azul	Fora ponta	270.88
Neoenergia Brasília	REH N° 2.406	22/06/2018	Tarifa de Aplicação	Azul	Fora ponta	302.89
Neoenergia Brasília	REH N° 2.471	22/10/2018	Tarifa de Aplicação	Azul	Fora ponta	306.44
Neoenergia Brasília	REH N° 2.625	22/10/2019	Tarifa de Aplicação	Azul	Fora ponta	256.38
Neoenergia Brasília	REH N° 2.789	22/10/2020	Tarifa de Aplicação	Azul	Fora ponta	230.83
Neoenergia Brasília	REH N° 2.965	22/10/2021	Tarifa de Aplicação	Azul	Fora ponta	288.66
Neoenergia Brasília	REH N° 3.131	22/10/2022	Tarifa de Aplicação	Azul	Fora ponta	288.66
Neoenergia Brasília	REH N° 3.134	03/11/2022	Tarifa de Aplicação	Azul	Fora ponta	335.75

A partir da tabela 1, observa-se que a tarifa determinada em agosto de 2012 a tarifa de energia aplicada de R\$ 145,98 por MWh e em novembro de 2022 foi de R\$ 335,75 por MWh. Desta maneira o crescimento total nesses 10 anos foi de aproximadamente de 129,99%, portanto o crescimento médio é aproximadamente de 8,68%.

A partir desses contexto e do artigo (SHOUMAN; El Shenawy; KHATTAB, 2016) é possível deduzir uma fórmula para esse cenário de economia a longo prazo, utilizando os resultados da metodologia da seção 3.2.

$$V_{ecn} = \sum_{t=0}^T \frac{\beta E_{tt} * (1 - d_{mt})^t P_{et} * (1 + c_{mt})^t}{(1 + T_d)^t} = \sum_{t=0}^T \frac{E_{nt} P_{et} * (1 + c_{mt})^t}{(1 + T_d)^t} \quad (3.6.2)$$

Em que os, termos  $d_{mt}$ ,  $c_{mt}$  e  $T_d$  significam respectivamente, a degradação do módulo do ano em questão e o crescimento do preço da tarifa e a taxa de desconto. A taxa de desconto adotada será de 10%, utilizada em análise econômica na instalação de uma usina fotovoltaica na região sul (DASSI et al., 2015).

Em suma, o método consiste em utilizar os resultados do ano de referência para determinar a constante  $\beta$ , que uma constante que demonstra o percentual de energia não utilizada no ano de referência. A partir da premissa que o padrão da usina permanece o mesmo a constante permanecerá com mesmo valor ao longo do tempo. Para determinar energia não utilizada serão usados a constante  $\beta$ , o valor de geração total de um ano típico é o desgaste do módulo do ano específico. Por último, o preço da tarifa será determinado a partir do ano base junto ao crescimento médio dos últimos 10 anos, que é aproximadamente 8,68%.

### 3.7 Sugestão de outras propostas de metodologia

Nesta seção, será abordado outras ideias de maneira mais geral para serem exploradas em outros contextos em que seja possível obter mais informações sobre a unidade consumidora, como a curva de demanda e maior número de tarifas de energia.

A primeira ideia a ser explorada é a de usar as baterias para abater a energia consumida no horário de ponta. A grande vantagem dessa ideia é poder diminuir a quantidade de baterias para visualizar um horizonte econômico mais interessante, uma vez que o investimento inicial certamente será menor. Mas, a desvantagem é que, em termos técnicos, a usina ainda terá um potencial a ser utilizado. Para determinar o dimensionamento, será necessário analisar as tarifas do local para estimar a energia consumida em horário de ponta. Contudo, só foi cedido apenas uma tarifa de energia, o que não assegura a precisão necessária para realizar tal análise.

Para essa usina, a análise será feita a partir das tarifas e do padrão de geração da usina, de gerar em dias úteis e não gerar durante os feriados e finais de semana. O conceito básico é determinar, a partir das tarifas, o consumo nos horários de ponta diário. A partir desses valores, selecionar um valor suficientemente grande para determinar a energia no horário de ponta utilizada durante o período de 5 dias (quantidade de padrão de dias úteis em uma semana). Em seguida, verificar se o potencial de geração da usina supre essa necessidade, seja totalmente ou parcialmente. Por fim, deve-se dimensionar as baterias para atender a necessidade. A partir dos dados de algumas tarifas, é possível realizar essa análise. Mas, não será possível realizar uma análise com a precisão desejada devido a pouca quantidade de tarifas que foram cedidas, realizar essa análise com um histórico mais robusto seria o ideal.

Outra ideia que pode ser utilizada é armazenar essa energia para reduzir o valor da demanda contratada, em que as vantagens e desvantagens são as mesmas da ideia anterior. A coleta de dados para estabelecer a curva de carga pode determinar se há viabilidade ou não. Outro ponto a ser levado em conta é tomar ciência do direcionamento das normas técnicas com relação a possibilidade de redução do valor da demanda contratada. Como não foram cedidos os dados para se estabelecer uma curva de carga, torna-se impossível explorar essa ideia neste trabalho.

É possível também combinar essas duas ideias, para averiguar se em conjunto elas podem ser viáveis também. Uma questão a ser levada em conta é que o dimensionamento das baterias será maior do que cada uma dessas ideias individualmente, o que aumenta o investimento inicial e pode aumentar o tempo de retorno.

## 4 Aplicação em caso real

### 4.1 Materiais

Nesta seção, apresentaremos uma introdução à usina anônima, cujos detalhes específicos não serão revelados por questões de confidencialidade. A única informação a ser apresentada já foi mencionada que a usina se localiza em Brasília

A usina foi instalada no telhado de laje do respectivo local em 2020 mas seu funcionamento só foi iniciado em 2021, com o objetivo principal de gerar energia elétrica renovável. No entanto, devido ao sistema reticulado em que está inserida, não é possível realizar a injeção de energia excedente na rede da concessionária distribuidora local (Neoenergia Distribuição).

O sistema fotovoltaico da usina anônima é composto por diversos elementos essenciais. Isso inclui módulos fotovoltaicos, equipamentos conversores de energia (inversores), estruturas metálicas de fixação para os módulos, condutores elétricos como cabos CC, CA e para aterramento, dispositivos de proteção da instalação (disjuntores termomagnéticos, dispositivos de proteção contra surtos - DPSs), estação meteorológica e um sistema de monitoramento.

A usina anônima possui uma potência de 117,81 kWp (potência de pico dos módulos) e 100 kW (potência nominal máxima do inversor). O sistema de geração é composto por 357 módulos de 330 Wp (modelo JA Holdings JAP72S01) e um inversor de 100 kW de potência nominal (modelo Ingecon Sun 100TL da Ingeteam). É importante destacar que a usina possui uma relação de *oversizing* de 17,81%.

Os módulos fotovoltaicos estão instalados sobre estruturas metálicas anguladas, fixadas em contrapesos sobre uma laje plana no formato de "trilhos", com uma inclinação aproximada de 15 graus, de acordo com a latitude local. Quanto à orientação azimutal, a usina foi subdividida em 3 zonas de distribuição dos módulos. O SAM não permite a criação a criação de subdivisão da usinas sem que haja aumento na quantidade de MPPT do inversor. Desta forma, para manter respeitar as características do inversor, será calculada uma orientação azimutal média. A orientação será calculada a partir de uma média ponderada, o peso sendo a quantidade de módulos em cada zona, como mostra a equação:

$$\alpha_{zm} = \frac{1}{n} \sum_{z=1}^Z n_z \alpha_z \quad (4.1.1)$$

Em que:

- $\alpha_{zm}$  é a orientação azimutal média.
- $n$  é o número total de módulos.
- $Z$  é o número de zonas diferentes na usina.
- $n_z$  é o número de módulos presentes naquela zona.

- $\alpha_z$  é a orientação azimutal daquela zona.

Com essa contextualização inicial, podemos prosseguir para a descrição dos materiais utilizados e a metodologia adotada neste estudo relacionado à usina.

#### 4.1.1 Características dos Módulos

Como já mencionado anteriormente, a usina fotovoltaica é composta por 357 módulos fotovoltaicos de silício policristalino, os quais possuem uma vida útil estimada de mais de 25 anos. A Tabela 1 apresenta um resumo das principais características técnicas dos módulos.

Tabela 2: Características elétricas dos módulos

Características Elétricas dos Módulos	
Fabricante	JA Solar
Modelo	JAP72S01 -330/SC
Tecnologia	Silício policristalino
Potência Máxima	330 Wp
Rendimento	16.99%
Tensão nominal	37.65
Tensão em aberto	46.40
Corrente nominal	8.77
Dimensões	1960×991 × 40mm
Peso	22.5 kg±3%
Degradação anual (primeiro ano)	2.5%
Degradação anual (demais anos)	0.5%

#### 4.1.2 Características do Inversor

A usina possui um inversor fotovoltaico, com potência nominal de 100 kW, que é conectado à rede. A tabela 3 expõe as principais informações técnicas em relação ao inversor.

Tabela 3: Características técnicas do inversor

<b>Características Técnicas do Inversor Fotovoltaico</b>	
Fabricante	Ingeteam
Modelo	Ingecon Sun 100TL
Entrada MPPT	1
Potência Nominal CC	101.2 - 145 kWp
Potência Nominal CA	100 kW
Intervalo de Tensão CC	570 - 850 V
Tensão Nominal CA	400 V
Tensão Máxima CC	1100 V
THD	<3%
Rendimento	98,5%

#### 4.1.3 Características da estação meteorológica e do sistema de controle de fluxo de potência

A usina em questão é responsável por gerar energia solar para um órgão público, e possui um sistema de controle e aquisição de dados que desempenha várias funções. Dentre elas, podemos destacar o armazenamento de informações coletadas por medidores da usina e estação meteorológica, o cálculo de desempenho, o histórico de dados e a geração de gráficos. Essas informações são fundamentais para a operação e manutenção da usina, e para a avaliação do seu desempenho ao longo do tempo.

Entre as grandezas monitoradas pelo sistema, podemos citar a tensão, corrente, energia importada, energia exportada, temperatura ambiente, irradiância, potência ativa e reativa, velocidade do vento, entre outras. Esses dados são coletados e armazenados em tempo real, ou seja, a cada instante há uma atualização das informações, permitindo que se tenha um acompanhamento preciso do funcionamento da usina.

No entanto, essa usina enfrenta um problema: a incapacidade de injetar potência na rede da concessionária. Um sistema de controle é responsável por detectar uma diminuição na corrente importada da rede de distribuição, e então comunica ao inversor, que é desativado. Quando a diferença entre a potência gerada e a consumida é de 50 kW, a usina é desligada e toda a carga é suprida exclusivamente pela rede de distribuição. Nesse momento, toda a energia solar não é mais utilizada, pois a usina é completamente desligada.

Para evitar o desperdício de energia, é necessário que se tenha um sistema de armazenamento de energia, capaz de guardar a energia gerada pela usina durante os momentos em que a injeção de potência ativa na rede da concessionária de distribuição é impedida. A estratégia para calcular a energia a ser armazenada no banco de baterias consiste em identificar os dias e horários em que ocorreu a impossibilidade de injeção de potência, para posteriormente dimensionar um banco de baterias adequado. Levando em consideração a importância nacional e a vitalidade do

fornecimento de energia elétrica para esse órgão, o sistema de armazenamento de energia, além de evitar o desperdício, poderia proporcionar maior confiabilidade no fornecimento.

Em resumo, o sistema de controle e aquisição de dados da usina solar é essencial para garantir o seu bom funcionamento e permitir a análise do seu desempenho. No entanto, o problema na injeção de potência ativa na rede da concessionária de distribuição pode levar a desperdício de energia, o que pode ser evitado com o uso de um sistema de armazenamento de energia. É importante destacar que a implementação desse sistema pode trazer benefícios tanto para a eficiência energética da usina quanto para a confiabilidade do fornecimento de energia elétrica para o órgão federal que a utiliza.

## 4.2 Funcionamento do sistema de controle de injeção de potência

Para ilustrar o funcionamento do sistema de controle de potência e como ele atua num dia em que é demandado. Para exemplificar, foram levantados os dados de geração por hora no dia 03/06/2022. A figura e a figura mostram o efeito do sistema na geração durante o dia.

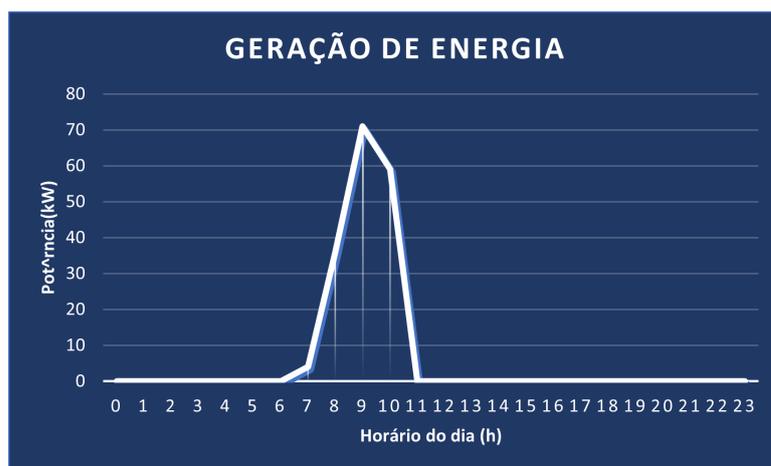


Figura 17: Geração de energia 03/06



Figura 18: Irradiância 03/06

Note que pela equação 2.1.2 é esperado que a potência seja proporcional a irradiação transmitida, portanto a curva de geração deveria ter o mesmo formato da curva de irradiação com mudança na amplitude. Mas a partir das 11 horas desse dia, o sistema de controle de potência entra em ação, desliga o inversor e portanto faz com o que a energia gerada vá a 0.

Para demonstrar como seriam esse gráficos em um dia típico, serão levantados os mesmos dados do dia 17/01/2022 nas figuras 19 e 20. Note que as curvas tem formatos semelhantes, a principal divergência se dá na magnitude das curvas, o que mostra na realidade que existe uma proporção que relaciona essas grandezas.

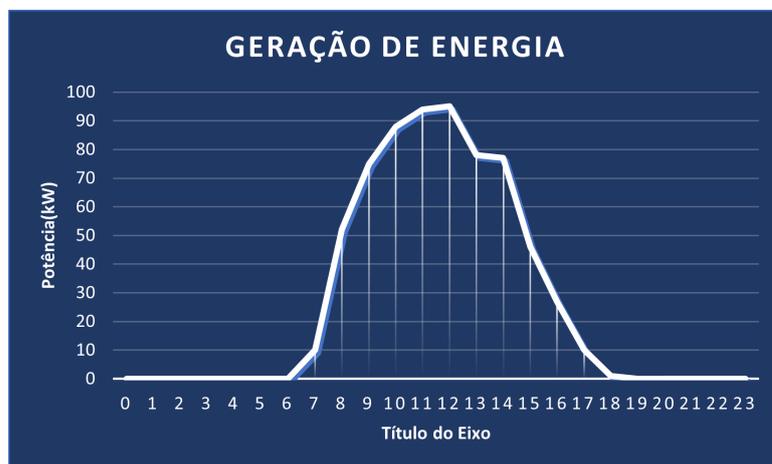


Figura 19: Geração de energia 17/01

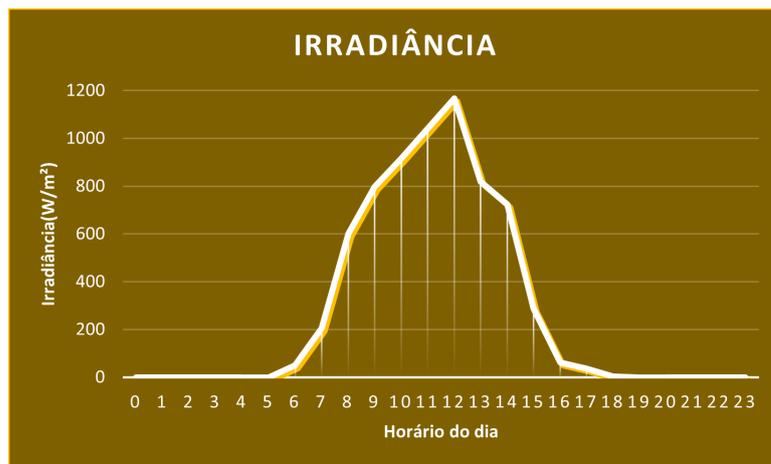


Figura 20: Irradiância 17/01

Note que a curva de geração tende a seguir o mesmo formato, mesmo que com algumas diferenças. Mas é notável a relação entre as curvas, note que a curva de geração cresce enquanto a curva de irradiância cresce e começa a diminuir quando a curva de irradiância diminui.

### 4.3 Estimativa de energia não utilizada

A partir dos dados de irradiância obtidos do piranômetro foi possível fazer a simulação pra determinar os valores teórico de geração em escala anual e ainda é possível extrair os dados em geração diária e horária. Combinando esses dados de simulação com os dados do inversor é possível determinar a energia não utilizada em escala diária como mostra a tabela 4.

Tabela 4: Tabela de geração teórica, real e de energia não utilizada(En)

Data	Irradiação Wh/m <sup>2</sup>	Real (kWh)	Teórico (kWh)	En(kWh)
03/08/2021	5676.11476	584	569.983574	0
04/08/2021	5586.6709	579	572.405733	0
05/08/2021	5284.44825	588	527.633257	0
06/08/2021	4153.61469	410	407.064107	0
07/08/2021	3924.44901	9	388.997917	379.997917
08/08/2021	6177.50489	0	599.794038	599.794038
09/08/2021	5264.45052	610	536.705992	0
10/08/2021	5187.50395	511	515.546942	0
11/08/2021	5673.6157	529	571.00028	0
12/08/2021	6202.2275	635	615.8227	0
13/08/2021	6256.6707	649	621.04261	0
14/08/2021	6290.838	417	615.30083	198.30083
15/08/2021	6218.3398	0	615.28477	615.28477
16/08/2021	6069.4483	620	601.89755	0

Tabela 4: Tabela de geração teórica, real e de energia não utilizada(En)

Data	Irradiação Wh/m <sup>2</sup>	Real (kWh)	Teórico (kWh)	En(kWh)
17/08/2021	6156.1151	638	594.7126	0
18/08/2021	6325.0057	658	603.65509	0
19/08/2021	6469.1706	673	613.55249	0
20/08/2021	6432.2278	666	623.91516	0
21/08/2021	6607.7838	0	639.70072	639.70072
22/08/2021	6518.6152	0	670.2682	670.2682
23/08/2021	6109.4493	633	595.45985	0
24/08/2021	5380.5597	621	519.84271	0
25/08/2021	6363.0602	645	621.88788	0
26/08/2021	5782.2264	558	557.66626	0
27/08/2021	6228.8936	623	600.44796	0
28/08/2021	6319.7279	0	593.70562	593.70562
29/08/2021	5975.561	3	602.50475	599.50475
30/08/2021	5675.8364	576	572.94627	0
31/08/2021	6563.8933	680	635.28827	0
01/09/2021	6251.3923	652	627.87803	0
02/09/2021	5998.6182	633	582.57121	0
03/09/2021	6282.7822	613	598.82603	0
04/09/2021	6811.1159	0	682.92636	682.92636
05/09/2021	5459.7264	0	553.37375	553.37375
06/09/2021	5758.8938	2	570.20488	568.20488
07/09/2021	6417.2261	0	626.95535	626.95535
08/09/2021	6176.9492	608	619.06726	0
09/09/2021	6472.5049	624	652.40129	0
10/09/2021	6225.8375	601	606.52225	0
11/09/2021	6485.5617	0	643.15769	643.15769
12/09/2021	6363.3378	0	624.6338	624.6338
13/09/2021	6870.8378	665	654.73301	0
14/09/2021	6247.5048	600	610.94874	0
15/09/2021	6630.8376	624	656.03736	0
16/09/2021	6682.2286	647	633.50188	0
17/09/2021	6884.7291	683	664.46425	0
18/09/2021	7269.1726	0	683.26554	683.26554
19/09/2021	7071.6724	0	663.03122	663.03122
20/09/2021	6941.396	662	654.08626	0
21/09/2021	5235.0028	523	499.04496	0
22/09/2021	5455.0048	537	533.75694	0
23/09/2021	5736.6709	552	587.62242	0

Tabela 4: Tabela de geração teórica, real e de energia não utilizada(En)

Data	Irradiação Wh/m <sup>2</sup>	Real (kWh)	Teórico (kWh)	En(kWh)
24/09/2021	4972.5041	495	521.43395	0
25/09/2021	2566.668134	3	257.56556	254.56556
26/09/2021	5033.6145	5	496.20977	491.20977
27/09/2021	6621.3945	646	664.50033	0
28/09/2021	6665.8375	655	650.26347	0
29/09/2021	5694.1707	546	555.96953	0
30/09/2021	5271.9505	493	521.86524	0
01/10/2021	3875.0022	398	383.61713	0
02/10/2021	2910.002	0	300.6379	300.6379
03/10/2021	5779.4483	0	605.5236	605.5236
04/10/2021	6005.0035	573	592.6363	0
05/10/2021	6652.783034	633	659.85537	0
06/10/2021	6979.1733	656	692.51551	0
07/10/2021	5184.4492	500	520.80324	0
08/10/2021	5458.6152	505	539.83782	0
09/10/2021	6108.339878	0	613.13834	613.13834
10/10/2021	4393.89271	0	442.17342	442.17342
11/10/2021	3388.058	82	346.46443	264.46443
12/10/2021	5450.56041	0	541.68596	541.68596
13/10/2021	5051.11569	467	500.31466	0
14/10/2021	4674.169278	450	460.55396	0
15/10/2021	6899.454998	657	670.698355	0
16/10/2021	4947.226678	0	494.7372	494.7372
17/10/2021	5880.557578	0	608.41563	608.41563
18/10/2021	3512.5034	337	366.11365	0
19/10/2021	4187.2254	404	432.63566	0
20/10/2021	6719.17315	599	685.979475	0
21/10/2021	4591.391424	427	448.99326	0
22/10/2021	4437.22509	421	426.985107	0
23/10/2021	7474.458	0	724.580676	724.580676
24/10/2021	5783.06077	0	580.548201	580.548201
25/10/2021	5223.339034	469	534.98848	0
26/10/2021	5570.27597	505	540.748392	0
27/10/2021	7114.17278	644	679.891442	0
28/10/2021	8099.45712	732	772.103098	0
29/10/2021	7724.175228	256	746.787782	0
30/10/2021	5997.78335	1	606.485213	605.485213
31/10/2021	2488.33452	17	261.222194	244.222194

Tabela 4: Tabela de geração teórica, real e de energia não utilizada(En)

Data	Irradiação Wh/m <sup>2</sup>	Real (kWh)	Teórico (kWh)	En(kWh)
01/11/2021	5388.059994	63	533.89299	470.89299
02/11/2021	4737.78207	0	497.223803	497.223803
03/11/2021	5374.17081	501	548.747196	0
04/11/2021	3490.28274	333	370.699671	0
05/11/2021	2775.55637	259	295.325744	0
06/11/2021	6341.66822	0	642.394252	642.394252
07/11/2021	3457.50291	0	364.727874	364.727874
08/11/2021	2267.22273	222	239.712768	0
09/11/2021	4942.78259	447	506.296037	0
10/11/2021	4953.61535	447	518.127033	0
11/11/2021	3156.946634	315	339.00898	0
12/11/2021	3092.500988	297	334.53062	0
13/11/2021	2941.94683	0	311.116574	311.116574
14/11/2021	2468.058224	0	264.976236	264.976236
15/11/2021	2952.50313	0	319.320709	319.320709
16/11/2021	2889.16809	290	309.126644	0
17/11/2021	4019.168904	401	430.3321	0
18/11/2021	2165.55664	214	232.26221	0
19/11/2021	4983.89219	460	526.605036	0
20/11/2021	3966.9475	7	424.157887	417.157887
21/11/2021	3053.614138	0	329.71521	329.71521
22/11/2021	5176.39351	483	538.327829	0
23/11/2021	5614.45027	493	578.371367	0
24/11/2021	7593.06721	678	768.41352	0
25/11/2021	7883.61608	692	793.82471	0
26/11/2021	6955.28247	653	752.042984	0
27/11/2021	6013.34057	0	661.69476	661.69476
28/11/2021	5926.116738	0	654.26142	654.26142
29/11/2021	4475.55376	419	481.108319	0
30/11/2021	4949.44696	0	547.04038	547.04038
01/12/2021	5408.33909	447	570.712714	0
02/12/2021	3281.39155	349	350.618951	0
03/12/2021	4777.78419	412	510.86319	0
04/12/2021	5689.72264	0	579.57572	579.57572
05/12/2021	4563.33627	0	485.43702	485.43702
06/12/2021	6303.05716	565	656.354467	0
07/12/2021	6086.3932	569	648.11452	0
08/12/2021	3531.94721	335	383.35447	0

Tabela 4: Tabela de geração teórica, real e de energia não utilizada(En)

Data	Irradiação Wh/m <sup>2</sup>	Real (kWh)	Teórico (kWh)	En(kWh)
09/12/2021	5276.3934	484	568.98426	0
10/12/2021	5528.33782	441	618.757325	0
11/12/2021	5133.893564	27	543.675547	516.675547
12/12/2021	6110.56165	0	662.067289	662.067289
13/12/2021	4609.169046	462	511.105137	0
14/12/2021	6051.94975	547	674.180111	0
15/12/2021	3463.335154	351	394.89159	0
16/12/2021	3608.88995	325	403.036038	0
17/12/2021	5774.72818	526	624.694136	0
18/12/2021	4793.05901	3	529.959457	526.959457
19/12/2021	3787.22371	0	429.354698	429.354698
20/12/2021	4626.39356	420	516.860541	0
21/12/2021	5856.11771	253	632.471888	0
22/12/2021	6105.8379	11	654.685044	643.685044
23/12/2021	5310.28304	340	582.827528	0
24/12/2021	2226.111864	0	251.08743	251.08743
25/12/2021	7453.3405	0	819.488152	819.488152
26/12/2021	7526.12259	0	800.79248	800.79248
27/12/2021	6282.503	0	682.491897	682.491897
28/12/2021	5110.55955	0	566.337987	566.337987
29/12/2021	4709.44737	0	518.94196	518.94196
30/12/2021	2772.22479	0	314.87553	314.87553
31/12/2021	2552.502278	0	290.25568	290.25568
01/01/2022	2688.335078	0	288.41676	288.41676
02/01/2022	4449.170656	0	467.44588	467.44588
03/01/2022	5732.783578	411	575.87556	0
04/01/2022	5317.782656	474	539.19188	0
05/01/2022	7334.44451	498	737.48279	0
06/01/2022	5817.504	476	597.99115	0
07/01/2022	2017.78	203	212.52874	0
08/01/2022	3339.72553	0	370.10244	370.10244
09/01/2022	2004.166778	0	195.73463	195.73463
10/01/2022	3115.5574	303	328.76067	0
11/01/2022	3150.834578	244	341.8267	0
12/01/2022	3871.1151	308	415.24262	0
13/01/2022	5447.2264	353	570.0226	0
14/01/2022	7977.78851	629	791.949435	0
15/01/2022	8651.1207	0	877.9977	877.9977

Tabela 4: Tabela de geração teórica, real e de energia não utilizada(En)

Data	Irradiação Wh/m <sup>2</sup>	Real (kWh)	Teórico (kWh)	En(kWh)
16/01/2022	7189.7265	0	753.1737	753.1737
17/01/2022	7205.5666	653	738.37971	0
18/01/2022	7523.062078	613	770.24561	0
19/01/2022	7331.9498	635	738.49669	0
20/01/2022	8532.5103	724	844.6454	0
21/01/2022	5585.8397	462	594.50059	0
22/01/2022	7394.4511	7	756.45726	749.45726
23/01/2022	8363.6185	0	847.16481	847.16481
24/01/2022	7586.1173	650	807.2715	0
25/01/2022	4887.5087	421	509.51035	0
26/01/2022	4618.6156	405	459.1243	0
27/01/2022	5439.7267	503	568.65321	0
28/01/2022	6349.4497	559	675.23855	0
29/01/2022	6780.8386	2	697.74767	695.74767
30/01/2022	6298.0607	22	635.31062	613.31062
31/01/2022	4876.3936	436	518.03351	0
01/02/2022	6670.5619	425.52	718.4301	0
02/02/2022	4687.7827	431.033	487.61901	0
03/02/2022	4924.7261	438.456	488.17891	0
04/02/2022	4244.7253	396.132	426.29424	0
05/02/2022	4811.3927	0	501.16111	501.16111
06/02/2022	3538.33599	0	355.657156	355.657156
07/02/2022	4001.11572	342.545	439.94805	0
08/02/2022	3508.3363	291.077	391.93389	0
09/02/2022	6236.6721	614.243	661.89783	0
10/02/2022	5041.1144	503.669	524.51321	0
11/02/2022	4213.89204	401.065	455.76979	0
12/02/2022	4681.3912	0	501.86747	501.86747
13/02/2022	4314.1708	0	456.44187	456.44187
14/02/2022	5507.2269	536.366	592.95043	0
15/02/2022	4325.2818	401.295	445.17845	0
16/02/2022	4022.5022	364.034	421.57665	0
17/02/2022	3088.61384	310.588	333.677324	0
18/02/2022	5031.949	478.24	510.74837	0
19/02/2022	2615.5576	0	272.49142	272.49142
20/02/2022	4410.8372	0	458.73111	458.73111
21/02/2022	4576.39379	423.748	482.3481	0
22/02/2022	5834.73035	550.046	592.03369	0

Tabela 4: Tabela de geração teórica, real e de energia não utilizada(En)

Data	Irradiação Wh/m <sup>2</sup>	Real (kWh)	Teórico (kWh)	En(kWh)
23/02/2022	5685.0038	567.531	619.85184	0
24/02/2022	5116.393	455.484	555.06956	0
25/02/2022	6824.45015	690.101	713.81043	0
26/02/2022	6601.3955	0	687.73649	687.73649
27/02/2022	7191.396	0	745.61302	745.61302
28/02/2022	7124.7301	0	732.96014	732.96014
01/03/2022	6719.1712	0	674.86624	674.86624
02/03/2022	4556.39258	0	463.970671	463.970671
03/03/2022	4286.67038	406	441.52256	0
04/03/2022	5194.72657	496	556.26832	0
05/03/2022	6410.8394	0	640.65141	640.65141
06/03/2022	5082.78283	0	531.54563	531.54563
07/03/2022	6501.1148	612	691.63117	0
08/03/2022	6477.5054	584	665.53549	0
09/03/2022	7777.7846	731	788.14111	0
10/03/2022	5895.28825	559	591.69011	0
11/03/2022	6508.89666	553	665.03873	0
12/03/2022	4643.893	129	437.10801	0
13/03/2022	4205.27971	0	430.38221	430.38221
14/03/2022	3664.72441	330	327.9177	0
15/03/2022	3946.94894	332	381.833343	0
16/03/2022	5009.72588	560	492.68237	0
17/03/2022	6973.34264	649	658.50703	0
18/03/2022	5193.33544	491	527.95928	0
19/03/2022	7406.11227	0	709.05532	709.05532
20/03/2022	7335.28427	0	678.95608	678.95608
21/03/2022	6936.67327	684	671.36725	0
22/03/2022	5646.67092	501	538.74847	0
23/03/2022	5422.22681	544	538.42525	0
24/03/2022	5215.28308	546	522.05489	0
25/03/2022	5350.5581	591	514.17512	0
26/03/2022	6328.06117	0	625.25817	625.25817
27/03/2022	6153.05961	0	606.68077	606.68077
28/03/2022	6271.67277	640	603.36389	0
29/03/2022	6976.67467	688	670.90542	0
30/03/2022	5753.058578	546	571.85055	0
31/03/2022	6821.94725	666	672.86606	0
01/04/2022	5802.22659	583	542.05847	0

Tabela 4: Tabela de geração teórica, real e de energia não utilizada(En)

Data	Irradiação Wh/m <sup>2</sup>	Real (kWh)	Teórico (kWh)	En(kWh)
02/04/2022	6918.89507	0	625.58442	625.58442
03/04/2022	6900.00449	0	660.81467	660.81467
04/04/2022	6599.44991	658	642.4378	0
05/04/2022	6878.05977	681	635.97852	0
06/04/2022	5670.560856	599	549.22494	0
07/04/2022	6114.7275	573	621.19217	0
08/04/2022	4900.28314	489	480.950438	0
09/04/2022	6043.6151	0	648.16731	648.16731
10/04/2022	4771.113278	0	490.21241	490.21241
11/04/2022	3664.72614	357	381.059783	0
12/04/2022	4331.949018	446	404.039703	0
13/04/2022	3385.0014	364	328.5191	0
14/04/2022	5268.616278	340	531.57891	0
15/04/2022	4225.5606	0	416.81484	416.81484
16/04/2022	6145.8383	0	585.48308	585.48308
17/04/2022	4764.1718	0	462.174021	462.174021
18/04/2022	5681.94909	589	549.792939	0
19/04/2022	5686.3946	563	547.32377	0
20/04/2022	6257.7839	646	583.73104	0
21/04/2022	5690.0041	0	567.03598	567.03598
22/04/2022	5596.9502	504	546.35309	0
23/04/2022	4857.2261	0	495.95618	495.95618
24/04/2022	5445.0049	0	540.72254	540.72254
25/04/2022	6382.5037	613	617.77554	0
26/04/2022	5929.4494	615	590.68286	0
27/04/2022	6112.5043	625	592.74666	0
28/04/2022	6227.7819	609	587.01718	0
29/04/2022	5385.8384	583	531.82671	0
30/04/2022	6376.1178	0	640.40955	640.40955
01/05/2022	5385.5611	0	530.40738	530.40738
02/05/2022	5193.8933	534	501.09607	0
03/05/2022	5254.726	508	544.067992	0
04/05/2022	4679.1721	446	484.18636	0
05/05/2022	3791.11334	270	377.499405	0
06/05/2022	4325.5595	597	436.968051	0
07/05/2022	4795.2809	7	452.29627	445.29627
08/05/2022	5061.66897	0	466.037966	466.037966
09/05/2022	5480.55813	564	522.796339	0

Tabela 4: Tabela de geração teórica, real e de energia não utilizada(En)

Data	Irradiação Wh/m <sup>2</sup>	Real (kWh)	Teórico (kWh)	En(kWh)
10/05/2022	5631.95012	557	546.384909	0
11/05/2022	4301.3927	342	426.65024	0
12/05/2022	4233.892	520	425.139861	0
13/05/2022	4987.22557	502	477.77338	0
14/05/2022	5070.55948	521	489.325888	0
15/05/2022	4238.05874	0	412.938873	412.938873
16/05/2022	4129.44841	401	391.988536	0
17/05/2022	4744.17019	441	449.319292	0
18/05/2022	5408.33656	568	524.226819	0
19/05/2022	5951.39208	606	590.77561	0
20/05/2022	5459.17125	551	518.471476	0
21/05/2022	5832.22636	0	533.251335	533.251335
22/05/2022	5727.50452	0	528.150819	528.150819
23/05/2022	4846.94828	508	448.004016	0
24/05/2022	5213.33817	530	492.050917	0
25/05/2022	5639.44939	591	536.110829	0
26/05/2022	5534.72535	549	529.624671	0
27/05/2022	5020.28263	520	461.040429	0
28/05/2022	5196.11667	0	508.640244	508.640244
29/05/2022	5474.72603	550	519.493798	0
30/05/2022	5333.89307	540	507.093574	0
31/05/2022	5336.39345	546	504.815778	0
01/06/2022	5417.22797	543	503.207152	0
02/06/2022	5241.66995	516	501.207861	0
03/06/2022	5274.44999	170	502.05928	0
04/06/2022	5270.00339	0	491.337395	491.337395
05/06/2022	4668.3372	0	432.01063	432.01063
06/06/2022	5356.39238	473	493.812893	0
07/06/2022	5223.06027	526	488.342033	0
08/06/2022	5212.78174	534	500.771773	0
09/06/2022	5223.89204	535	494.670728	0
10/06/2022	4621.39034	470	449.622622	0
11/06/2022	4720.83594	0	440.755507	440.755507
12/06/2022	3349.16874	0	325.315932	325.315932
13/06/2022	4371.94714	487	412.628787	0
14/06/2022	4626.39185	387	451.944832	0
15/06/2022	4371.39211	568	408.4391847	0
16/06/2022	5213.33892	0	478.788679	478.788679

Tabela 4: Tabela de geração teórica, real e de energia não utilizada(En)

Data	Irradiação Wh/m <sup>2</sup>	Real (kWh)	Teórico (kWh)	En(kWh)
17/06/2022	5283.89215	0	490.437329	490.437329
18/06/2022	5047.5043	0	472.576734	472.576734
19/06/2022	5178.61605	0	472.552769	472.552769
20/06/2022	5213.33787	550.223	486.296634	0
21/06/2022	5298.06087	548	496.343549	0
22/06/2022	5296.94739	538	492.087258	0
23/06/2022	5128.05948	538	481.470891	0
24/06/2022	5255.00457	535	484.802241	0
25/06/2022	5368.06027	0	485.848271	485.848271
26/06/2022	5289.72692	0	502.987772	502.987772
27/06/2022	5318.89239	545	491.674464	0
28/06/2022	5286.94759	538	477.368442	0
29/06/2022	4693.61557	467	441.042025	0
30/06/2022	5222.78109	530	488.2522498	0
01/07/2022	5282.22511	548.2	493.2153551	0
02/07/2022	5307.22651	0	497.228965	497.228965
03/07/2022	5427.22731	0	507.9028541	507.9028541
04/07/2022	5450.83932	573.2	504.583142	0
05/07/2022	5322.50631	540.8	495.5075966	0
06/07/2022	5418.060534	491.6	493.1045	0
07/07/2022	4821.949934	402.3	434.4029	0
08/07/2022	5293.338034	426.3	489.7322	0
09/07/2022	5378.05842	0	504.763654	504.763654
10/07/2022	5265.55891	0	496.7748695	496.7748695
11/07/2022	5260.83492	435.3	494.081979	0
12/07/2022	4785.28109	482.5	455.527064	0
13/07/2022	5413.33817	458.6	509.588275	0
14/07/2022	5176.94839	431.4	478.867924	0
15/07/2022	5335.83609	549.7	486.842984	0
16/07/2022	5406.39411	0	503.829237	503.829237
17/07/2022	5170.561876	0	497.487656	497.487656
18/07/2022	5639.725334	523.7	525.9952	0
19/07/2022	4995.56051	445.2	463.3290067	0
20/07/2022	5492.50481	501.7	497.3048458	0
21/07/2022	5545.28101	510	518.4155575	0
22/07/2022	5532.50461	549.1	516.2818552	0
23/07/2022	5530.55847	0	513.444457	513.444457
24/07/2022	5614.449156	0	535.9119	535.9119

Tabela 4: Tabela de geração teórica, real e de energia não utilizada(En)

Data	Irradiação Wh/m <sup>2</sup>	Real (kWh)	Teórico (kWh)	En(kWh)
25/07/2022	5623.05869	546	520.887465	0
26/07/2022	5720.28151	442	532.8570276	0
27/07/2022	5703.33909	436.6	524.155576	0
28/07/2022	5712.50459	434.2	553.762668	0
29/07/2022	5560.00552	499.8	521.771105	0
30/07/2022	5121.11615	0	488.401278	488.401278
31/07/2022	5477.22785	0	497.423773	497.423773
01/08/2022	4849.17115	504	480.751783	0
02/08/2022	5251.44882	557	513.172384	0

É importante salientar que estão sendo comparados os valores reais, com base em informação do inversor e da estação meteorológica, com dados de simulação feitos a partir de dados teóricos dos componentes e da irradiação. Isso implica dizer que o valor simulado, em alguns casos, pode ser menor que o valor gerado o que daria uma energia não utilizada negativa. Para contornar essa inconsistência, todas as vezes em que o valor da energia não usada foi menor que zero o valor considerado será nulo. Outra inconsistência que pode ser notada são os dias em que não houve atuação do sistema de controle de potência, que são dias de geração plena, dessa maneira a energia não utilizada nesses dias também é zero.

Com essa base de dados, é possível aglutinar a energia gerada ao longo do ano analisado para ficar mais fácil de visualizar a estimativa de economia. Para fazer essa previsão de economia em potencial foram utilizadas as tarifas coletadas da conta de energia durante o ano de análise. Os dados mensais são abordados na tabela:

Tabela 5: Estimativa de economia mensal.

Mês	Ano	Geração(kWh)	Valor teórico de simulação(kWh)	Energia não utilizada (kWh)	Valor tarifa	Diferença percentual(beta)	Economia
1	2022	9991	18224.52304	5858.55147	R\$ 0.7680070	32.15%	R\$ 4.499.41
2	2022	8621.173	14574.48966	4712.659786	R\$ 0.7523079	32.33%	R\$ 3.545.37
3	2022	11838	17890.95862	5361.366501	R\$ 0.7880458	29.97%	R\$ 4.225.00
4	2022	10437	16397.66462	6133.375001	R\$ 0.6557329	37.40%	R\$ 4.021.86
5	2022	12269	15136.62713	3424.722887	R\$ 0.5635111	22.63%	R\$ 1.929.87
6	2022	9998.223	14138.65592	4592.611018	R\$ 0.5127399	32.48%	R\$ 2.354.81
7	2022	10228.2	15553.38287	5043.168644	R\$ 0.5163233	32.42%	R\$ 2.603.91
8	2022	1061	993.924167	0	R\$ 0.5110931	0.00%	R\$ -
8	2021	13115	16804.03413	4296.556845	R\$ 0.6316333	25.57%	R\$ 2.713.85
9	2021	12069	17896.81833	5791.32392	R\$ 0.6594405	32.36%	R\$ 3.819.03
10	2021	9733	16781.67146	6025.612764	R\$ 0.7109721	35.91%	R\$ 4.284.04
11	2021	7674	14113.38486	5480.522095	R\$ 0.7898378	38.83%	R\$ 4.328.72
12	2021	6867	16776.85276	8088.025891	R\$ 0.7898378	48.21%	R\$ 6.388.23

É importante salientar que a análise começa em agosto de 2021 e termina em agosto de 2022. Os meses estão organizados na ordem que ocorrem durante o ano. Assim, o mês 1 é janeiro, o mês 2 é fevereiro e assim sucessivamente. Além da economia, é possível determinar a constante  $\beta$ , a constante da proporção descrita na equação 3.3.1 no mês específico. Depois de combinar esses dados para ter uma base geral do primeiro ano, têm-se os seguintes resultados:

Tabela 6: Dados gerais primeiro ano

Geração(kWh)	Valor teórico (kWh)	En (kWh)	Diferença percentual(beta)	Economia	PR Ideal	PR Real
123,901.60	195,282.99	64,808.50	33.19%	R\$ 44,714.10	84.04%	56.86%

A tabela 6, mostra em linhas gerais os dados da usina em seu primeiro ano de funcionamento. Dentre as grandezas calculadas a diferença do PR é uma que se mostra gritante, é uma diferença de aproximadamente 27%, o que mostra que a usina está operando tecnicamente abaixo. Além disso a constante de proporção( $\beta$ ), mostra que aproximadamente 33% da energia que poderia ser gerada não é aproveitada pela unidade consumidora.

#### 4.4 Dimensionamento das baterias

No caso do dimensionamento a ser adotado para as baterias que irão alimentar o edifício nos momentos em que a geração for cessada, ou não for suficiente, será adotado o critério exposto na seção 3.4. Para fins de recordação, o critério adotado é a somatória dos três maiores valores de energia não aproveitada. Os dias que satisfazem esse critérios estão relacionados e foram extraídos da tabela 4.

Tabela 7: Maiores valores de energia não utilizada

Data	Mês	Ano	Irradiação	Geração	Simulação	Energia não utilizada
15/01/2022	1	2022	8651.1207	0	877.9977	877.9977
23/01/2022	1	2022	8363.6185	0	847.16481	847.16481
25/12/2021	12	2021	7453.3405	0	819.488152	819.488152

Com base nos dados da tabela 7, é possível concluir o dimensionamento das baterias. A justificativa para esse critério, é uma tentativa garantir que a energia gerada nos finais de semana e em feriados que sejam em dias adjacentes(segunda ou sexta) possam ser armazenados sem muitos empecilhos. Vale ressaltar novamente que essa energia que seria armazenada deve ser gasta durante a semana, para que o sistema de armazenamento possa executar sua função de maneira devida no final de semana subsequente. Por fim, com base nos critérios adotados o dimensionamento do banco deve ser de **2.544,65 kWh**, que teria um custo estimado, de acordo com o valor do kWh estabelecido na seção 3.4, de **R\$ 3.005.715,92**.

Baseado nas características da usina e pela adequações do sistemas. O ideal seria uma bateria que tivesse uma alta densidade de carga e permitem uma descarregar profunda. Por conta desses fatores, as baterias de íon lítio se mostram adequadas para essa situação.

## 4.5 Estimativa de economia a longo prazo

A primeira etapa é tentar simular a geração futura da usina, ao longo dos anos. Para estimar essa geração será utilizada uma base de dados que aglutina os dados climáticos dos anos de 2007 a 2021 para definir o que seria um ano típico meteorológico de Brasília. O resultado da simulação com esses dados está explicitado na tabela 8.

Tabela 8: Geração de energia em um ano meteorológico típico

Energia AC ( <i>kWh</i> )	211.306
Fator de Capacidade DC (%)	20,5
Energia Produzida ( <i>kWh</i> )	1.793
Razão de Desempenho	0,87

A partir dessa informação, é possível aplicar a equação 3.6.2, uma vez que se já foi relatado a constante  $\beta$  (6), o decaimento (tabela 2), e agora com a energia total esperada. E, a partir desses resultados com a taxa de desconto de 10%, já estipulada, é possível estimar a economia anual não realizada pela usina na tabela 9.

Tabela 9: Economia em potencial à longo prazo anual

Ano	Energia não utilizada	Decaimento módulo	Preço médio tarifa	Crescimento estimado tarifa	Taxa de desconto	Economia
0	65.688.34	0	R\$ 0.68	8.68%	0.00%	R\$ 44.549.78
1	68.372.90	2.5%	R\$ 0.74	8.68%	10.00%	R\$ 45.813.99
2	68.338.71	0.05%	R\$ 0.80	8.68%	10.00%	R\$ 45.241.59
3	68.304.54	0.05%	R\$ 0.87	8.68%	10.00%	R\$ 44.676.34
4	68.270.39	0.05%	R\$ 0.95	8.68%	10.00%	R\$ 44.118.16
5	68.236.25	0.05%	R\$ 1.03	8.68%	10.00%	R\$ 43.566.95
6	68.202.14	0.05%	R\$ 1.12	8.68%	10.00%	R\$ 43.022.62
7	68.168.03	0.05%	R\$ 1.21	8.68%	10.00%	R\$ 42.485.10
8	68.133.95	0.05%	R\$ 1.32	8.68%	10.00%	R\$ 41.954.29
9	68.099.88	0.05%	R\$ 1.43	8.68%	10.00%	R\$ 41.430.11
10	68.065.83	0.05%	R\$ 1.56	8.68%	10.00%	R\$ 40.912.48
11	68.031.80	0.05%	R\$ 1.69	8.68%	10.00%	R\$ 40.401.32
12	67.997.78	0.05%	R\$ 1.84	8.68%	10.00%	R\$ 39.896.55
13	67.963.79	0.05%	R\$ 2.00	8.68%	10.00%	R\$ 39.398.08
14	67.929.80	0.05%	R\$ 2.17	8.68%	10.00%	R\$ 38.905.84
15	67.895.84	0.05%	R\$ 2.36	8.68%	10.00%	R\$ 38.419.75
16	67.861.89	0.05%	R\$ 2.57	8.68%	10.00%	R\$ 37.939.74
17	67.827.96	0.05%	R\$ 2.79	8.68%	10.00%	R\$ 37.465.72
18	67.794.05	0.05%	R\$ 3.03	8.68%	10.00%	R\$ 36.997.62
19	67.760.15	0.05%	R\$ 3.30	8.68%	10.00%	R\$ 36.535.37

A partir destes dados, é possível estimar uma economia total de **R\$ 823.731,39**, e vale ressaltar que essa não é a economia prevista da geração da usina. Esse valor é uma estimativa do que poderia ser economizado se a usina não perdesse energia com os desligamentos.

Neste caso, a possibilidade de armazenar e utilizar essa energia em uma microrrede se mostra economicamente inviável uma vez que o custo das baterias supera uma possível economia em um cenário de longo prazo.

## 5 Conclusão

A demanda por eletricidade continua a aumentar em todo o mundo, impulsionada pelo crescimento da população, urbanização e desenvolvimento econômico. A projeção é de um crescimento contínuo, com um cenário em que a demanda de energia em 2050 é mais do que dobrada em relação ao que foi em 2015. Ao mesmo tempo, preocupações com a diminuição dos combustíveis fósseis e o impacto ambiental causado pela queima desses combustíveis levaram a um impulso global em direção às fontes de energia renovável. A transição para fontes de energia renovável, em particular a energia solar, tem se tornado cada vez mais popular devido à sua abundância, acessibilidade e escalabilidade.

No contexto das fontes de energia renovável, a energia solar fotovoltaica se destaca como uma das opções mais promissoras. Os avanços tecnológicos nas últimas décadas têm contribuído para tornar os módulos fotovoltaicos mais eficientes e econômicos, impulsionando o crescimento da energia solar fotovoltaica como uma das fontes de energia renovável de crescimento mais rápido. No entanto, apesar do seu potencial significativo, existem desafios a serem abordados, especialmente no que diz respeito à integração de sistemas fotovoltaicos em redes elétricas reticuladas.

Na metodologia proposta aliada com sua aplicação em um caso real de uma usina fotovoltaica em rede elétrica reticulada, são analisados os dados de desempenho teórico e real da usina ao longo de um período de um ano. Gráficos e tabelas são utilizados para facilitar a compreensão dos resultados e são discutidas possíveis soluções para aprimorar o desempenho da usina. Além disso, são propostas recomendações práticas e sustentáveis para aprimorar a eficiência energética da usina fotovoltaica e contribuir para a expansão da matriz energética renovável e a redução das emissões de gases de efeito estufa.

Apesar das intenções de aprimoramento técnico, a partir dessa metodologia não foi possível chegar a uma solução economicamente viável para esse caso em específico. Dentre as possíveis causas pode ser destacadas:

- O preço das baterias dolarizado e influenciado diretamente pela taxa de câmbio.
- A falta de uma pesquisa de mercado robusta sobre o preço das baterias no Brasil, para trazer um preço mais adequado.
- A falta de informações cedidas para aplicar as outras metodologias citadas na seção 3.7 e averiguar se a questão viabilidade econômica teria uma resposta diferente.

Vale ressaltar de que existem vários termos que não possuem natureza determinística, como os preços das tarifas ou a cotação do dólar. E que dado a natureza estocástica dessas grandezas o projeto pode se tornar viável ou mesmo apresentar uma inviabilidade ainda maior.

A partir desse trabalho é possível trazer sugestões para trabalhos futuros. Dentre as sugestões têm-se:

- Fundamentar os métodos da seção 3.7, realizar uma análise de caso real e comparar todos os métodos em parâmetros econômicos.
- Projetos executivos de implementação e operação de microrrede.
- Impacto ambiental da perda de energia de sistemas fotovoltaicos inseridos em rede reticulada.
- Estudos voltados ao dispositivo de proteção de rede reticulada, afim que o dispositivo tenha um sistema de controle que permita o fluxo reverso de potência em casos de sistemas de geração de energia distribuída.

Em conclusão, a integração de usinas fotovoltaicas em redes elétricas reticuladas é um desafio complexo. Este estudo contribui para o entendimento dessas questões e fornece recomendações práticas para melhorar o desempenho técnico das usinas fotovoltaicas nesse contexto. Projetos futuros têm o potencial de expandir ainda mais o conhecimento e impulsionar a transição para uma matriz energética mais sustentável e resiliente.

## Referências

- ABNT. *NBR 10899-Energia Fotovoltaica - Terminologia*: Terceira edição. [S.l.], 2020. 10
- ABRACEEL. Inflação e energia elétrica. 2023. 3, 36
- BARRETO, G. d. A. *Metodología de aplicação de geração distribuída fotovoltaica em baixa tensão nos reticulados subterrâneos das distribuidoras de energia elétrica*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2014. 6
- DASSI, J. A. et al. Análise da viabilidade econômico-financeira da energia solar fotovoltaica em uma instituição de ensino superior do sul do brasil. In: *Anais do congresso Brasileiro de Custos-ABC*. [S.l.: s.n.], 2015. 37
- EMPRESA, D. P. E. *Cenários de Demanda para o PNE 2050, 2018*. 2021. 6
- ENERGÉTICA, E. de P. Pne 2050. plano nacional de energia. *Brasília: Plano Nacional de Energia*, 2020. 6
- GILMAN, P. et al. Sam photovoltaic model technical reference update. *NREL: Golden, CO, USA*, 2018. 16
- HANNAN, M. A. et al. State-of-the-art and energy management system of lithium-ion batteries in electric vehicle applications: Issues and recommendations. *IEEE Access*, v. 6, p. 19362–19378, 2018. 34
- HATZIARGYRIOU, N. *Microgrids: architectures and control*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2014. 28, 29
- IEEE Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces. *IEEE Std 1547-2018 (Revision of IEEE Std 1547-2003)*, p. 1–138, 2018. 19, 20, 24
- MA, T.; YANG, H.; LU, L. Solar photovoltaic system modeling and performance prediction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 36, p. 304–315, 2014. 3, 14, 15, 16
- PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. et al. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. *Rio de Janeiro*, v. 1, p. 47–499, 2014. 3, 10, 11, 13, 14, 26
- RASHID, M. H. *Power electronics handbook*. [S.l.]: Butterworth-heinemann, 2017. 3, 17, 18
- SCROSATI, B.; GARCHE, J. Lithium batteries: Status, prospects and future. *Journal of power sources*, Elsevier, v. 195, n. 9, p. 2419–2430, 2010. 27
- SHOUMAN, E. R.; El Shenawy, E.; KHATTAB, N. Market financial analysis and cost performance for photovoltaic technology through international and national perspective with case study for egypt. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 57, p. 540–549, 2016. ISSN 1364-0321. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115014574>>. 37
- SOLAR, S.; AG, T. Performance ratio-quality factor for the pv plant. *Sma*, v. 1, 2016. 19
- WHITE, D. P. *Química a ciência central*: 16ª edição. [S.l.]: Prentice Hall, 2016. 11