

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS  
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

JOÃO VITOR MENEZES CARVALHO BARROS  
VITOR HUGO CASTILHO CORREA

PROPOSTA DE PROJETO E ESTIMATIVA DE REGIMES DE OPERAÇÃO DE SISTEMA  
FOTOVOLTAICO ISOLADO PARA SUPRIMENTO DE CARGAS AUXILIARES EM  
SUBESTAÇÃO DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

GOIÂNIA  
2023



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS  
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

## TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE GRADUAÇÃO NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio do Repositório Institucional (RI/UFG), regulamentado pela Resolução CEPEC no 1240/2014, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei no 9.610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo dos Trabalhos de Conclusão dos Cursos de Graduação disponibilizado no RI/UFG é de responsabilidade exclusiva dos autores. Ao encaminhar(em) o produto final, o(s) autor(a)(es)(as) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

### 1. Identificação do Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação (TCCG)

Nome(s) completo(s) do(a)(s) autor(a)(es)(as): João Vitor Menezes Carvalho Barros e Vitor Hugo Castilho Correa.

Título do trabalho: "Proposta de projeto e estimativa de regimes de operação de sistema fotovoltaico isolado para suprimento de cargas auxiliares em subestação de transmissão de energia elétrica".

### 2. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador) Concorda com a liberação total do documento SIM [ ] NÃO<sup>1</sup>

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante: a) consulta ao(à)(s) autor(a)(es)(as) e ao(à) orientador(a); b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo do TCCG. O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

#### Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro.

**Obs.: Este termo deve ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.**



Documento assinado eletronicamente por **Sergio Pires Pimentel, Professor do Magistério Superior**, em 21/08/2023, às 17:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Vitor Hugo Castilho Corrêa, Discente**, em 22/08/2023, às 10:14, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Joao Vitor Menezes Carvalho Barros, Discente**, em 22/08/2023, às 13:39, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **3977816** e o código CRC **323AC107**.

JOÃO VITOR MENEZES CARVALHO BARROS  
VICTOR HUGO CASTILHO CORREA

PROPOSTA DE PROJETO E ESTIMATIVA DE REGIMES DE OPERAÇÃO DE SISTEMA  
FOTOVOLTAICO ISOLADO PARA SUPRIMENTO DE CARGAS AUXILIARES EM  
SUBESTAÇÃO DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Projeto de final de curso apresentado à Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC) da Universidade Federal de Goiás (UFG) como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Sérgio Pires Pimentel

Co-Orientador: Prof. Enes Gonçalves Marra

GOIÂNIA  
2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Barros, João Vítor Menezes Carvalho

Proposta de projeto e estimativa de regimes de operação de sistema fotovoltaico isolado para suprimento de cargas auxiliares em subestação de transmissão de energia elétrica [manuscrito] / João Vítor Menezes Carvalho Barros, Vítor Hugo Castilho Correa. - 2023. 60 f.

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Pires Pimentel; co-orientador Dr. Enes Gonçalves Marra.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC), Engenharia Elétrica, Goiânia, 2023.

1. Sistemas de armazenamento de energia. 2. Sistema fotovoltaico isolado. 3. Serviços Auxiliares. 4. Baterias. 5. BESS. I. Correa, Vítor Hugo Castilho. II. Pimentel, Sérgio Pires, orient. III. Marra, Enes Gonçalves, co-orient. IV. Título.

CDU 621.3



**UFG**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS  
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**ATA DE AVALIAÇÃO DE PROJETO FINAL**

**CURSO**

<input checked="" type="checkbox"/> Eng Elétrica	<input type="checkbox"/> Eng Mecânica	<input type="checkbox"/> Eng Computação PFC 1 ( ) PFC 2 ( )
--	---------------------------------------	--

**TÍTULO DO TRABALHO**

Proposta de projeto e estimativa de regimes de operação de sistema fotovoltaico isolado para suprimento de cargas auxiliares em subestação de transmissão de energia elétrica

**BANCA AVALIADORA**

Membro 1	Prof. Sérgio Pires Pimentel, EMC/UFG (Orientador)
Membro 2	Prof. Enes Gonçalves Marra, EMC/UFG (Co-orientador)
Membro 3	Eng. Eletr. Marcelo Nogueira Bousquet, Geração Energia
Membro 4	Prof. José Wilson Lima Nerys, EMC/UFG

**DATA DA DEFESA**

21/08/2023 (Segunda-feira)

**DISCENTE**

Matrícula	Nome
201611941	João Vitor Menezes Carvalho Barros
201616723	Vitor Hugo Castilho Correa

NOTAS													
	Membro 1			Membro 2			Membro 3			Membro 4			
Matrícula	NPT	NTE	NAA	NPT	NTE	NAA	NPT	NTE	NAA	NPT	NTE	NAA	Média*
201611941	10,0	6,9	6,5	10,0	6,9	6,5	10,0	6,9	6,5	10,0	6,9	6,5	7,0
201616723	10,0	6,9	6,5	10,0	6,9	6,5	10,0	6,9	6,5	10,0	6,9	6,5	7,0

NPT – Nota plano de trabalho;

NTE – Nota do trabalho escrito;

NAA – Nota de apresentação e arguição

Para Eng. Elétrica, Mecânica e PFC2 da Eng. Da Computação:  $NF = 0,1 \times NPT + 0,45 \times NTE + 0,45 \times NAA$

Para PFC1 da Eng. Da Computação:  $NF = 0,3 \times NPT + 0,7 \times NAA$

\* A APROVAÇÃO DO(S) ALUNO(S) ESTÁ CONDICIONADA À APRESENTAÇÃO DO TRABALHO FINAL AO ORIENTADOR COM TODAS AS CORREÇÕES SUGERIDAS PELA BANCA.

#### OBSERVAÇÕES:

Preencher com modificações solicitadas, caso existam. Em caso de reprovação, informar a justificativa.

---



---



---



---



---



Documento assinado eletronicamente por **Sergio Pires Pimentel, Professor do Magistério Superior**, em 21/08/2023, às 17:46, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Enes Goncalves Marra, Professor do Magistério Superior**, em 21/08/2023, às 18:13, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **José Wilson Lima Nerys, Professor do Magistério Superior**, em 21/08/2023, às 21:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marcelo Nogueira Bousquet, Usuário Externo**, em 22/08/2023, às 10:24, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **3977726** e o código CRC **9753410F**.

## RESUMO

Este estudo se baseia no dimensionamento de um sistema fotovoltaico (SFV) isolado para o fornecimento de energia para alimentar cargas dos serviços auxiliares de uma subestação como o principal escopo a ser atingido para o trabalho. Para atingir o objetivo desejado, como metodologia, foi realizado um estudo de caso em uma subestação no município de Trindade, no Estado de Goiás. De forma a garantir o suprimento de energia as cargas auxiliares por um período de tempo maior, é proposto o dimensionamento de um sistema de armazenamento de energia baseado em baterias do tipo chumbo-ácido. Como resultado, foi possível observar que a implementação do sistema fotovoltaico garante uma fonte adicional de redundância para alimentar as cargas auxiliares, contribuindo para a operação contínua do sistema de proteção e operação da subestação.

**Palavras-Chave:** Sistemas de armazenamento de energia. Sistema fotovoltaico isolado. Serviços Auxiliares. Baterias. BESS.

## ABSTRACT

This study is based on the dimensioning of an isolated photovoltaic system (SFV) for the supply of energy to feed loads of auxiliary services of a substation as the main scope to be achieved for the work. In order to reach the desired objective, as a methodology, a case study was carried out in a substation in the municipality of Trindade, in the State of Goiás. In order to guarantee the supply of energy to the auxiliary loads for a longer period of time, the design of an energy storage system based on lead-acid batteries. As a result, it was possible to observe that the implementation of the photovoltaic system guarantees an additional source of redundancy to feed the auxiliary loads, contributing to the continuous operation of the substation protection and operation system.

**Keywords:** Energy storage systems. Isolated photovoltaic system. Auxiliary services. Energy storage. Batteries. BESS.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Meios para utilização da energia proveniente do sol.	8
Figura 2: Funcionamento de uma célula fotovoltaica	12
Figura 3: Composição de um módulo fotovoltaico	13
Figura 4: Tipos de radiação.	16
Figura 5: Angulação do modulo fotovoltaico.	17
Figura 6: Modelo On-Grid de geração.	21
Figura 7: Modelo Off-Grid de geração.	23
Figura 8: Diagrama simplificado de um serviço auxiliar	27
Figura 9: Imagem aérea do local de instalação do sistema fotovoltaico	30
Figura 10: Irradiação do local de instalação	31
Figura 11: Comparação de irradiação em locais próximos.	32
Figura 12: Diagrama simplificado de um serviço auxiliar com um sistema fotovoltaico com armazenamento de energia em baterias	34

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>5</b>
<b>2. SISTEMA FOTOVOLTAICO</b>	<b>8</b>
2.1 ENERGIA SOLAR	8
2.1.1 Modulo fotovoltaico e irradiação	10
2.1.2 Irradiação solar	14
2.1.3 Inversor fotovoltaico	17
2.1.4 Sistemas fotovoltaicos on-grid e off-grid	20
2.2 SUBESTAÇÕES E A UTILIZAÇÃO DE FONTES CC E CA	24
<b>3. CASO DE ESTUDO: SUBESTAÇÃO FIRMINÓPOLIS</b>	<b>29</b>
3.1 DIMENSIONAMENTO DO BANCO DE BATERIAS	34
3.1.1 Número de elementos da bateria a ser determinado	36
3.1.2 Definição da atuação das cargas durante o ciclo de emergência	36
3.1.3 Determinação das cargas durante o ciclo de emergência	37
3.1.4 Cálculo da capacidade das baterias	39
3.1.5 Cálculo do carregador	40
3.2 DIMENSIONAMENTO SISTEMA FOTOVOLTAICO	41
3.2.1 Dimensionamento do inversor – dimensionado para potência	41
3.2.2 Dimensionamento do banco de baterias da fonte reserva	42
3.2.3 Dimensionamento do gerador fotovoltaico	44
3.3 MODOS DE OPERAÇÃO DE OPERAÇÃO DO SISTEMA	45
<b>4. CONCLUSÃO</b>	<b>48</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>49</b>

## 1. INTRODUÇÃO

As subestações (SEs) de transmissão de energia elétrica são parte essencial na infraestrutura de sistemas elétricos de potência. As SEs integram as redes de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, desempenhando papel estratégico na transformação dos níveis de tensão, nas manobras para reconfiguração do sistema interligado de energia, na recomposição durante possíveis falhas ou contingências, em trechos do sistema e na conexão entre partes distintas da rede.

A falha de uma subestação pode acarretar problemas no fornecimento de energia elétrica com abrangência local ou de proporções maiores (regional, nacional, etc.). Nas subestações existem diversas redundâncias para o suprimento dos serviços auxiliares (MARDEGAN, 2010).

Os serviços auxiliares de uma subestação são sistemas e equipamentos que fornecem suporte necessário para o seu funcionamento adequado, os quais são alimentados em corrente alternada ou contínua, eles são essenciais para garantir a operação segura e confiável da subestação, auxiliando no desempenho de serviços importantes, como monitorar e controlar os equipamentos da subestação, proteger contra falhas elétricas, medir grandezas elétricas, dentre outros.

O serviço auxiliar de uma subestação, comumente, é composto de um TSA (Transformador de Serviço Auxiliar), o qual tem como principal função alimentar os equipamentos da própria subestação, GMG (Grupo Moto Gerador), em que ele tem a mesma função do TSA, só que ele atua em momentos que o TSA não está disponível, e sua fonte de geração de energia é a partir de combustíveis fósseis.

Como na subestação há equipamentos com alimentação em Corrente Alternada (CA) e Corrente Contínua (CC), o retificador é parte importante do serviço auxiliar, em que ele transforma a corrente alternada em corrente contínua. Outro elemento importante é o banco de baterias, o qual armazena energia, alimentando a parte de serviço auxiliar quando não há alimentação por fontes convencionais, como o TSA e GMG.

O Operador Nacional do Sistema Interligado (ONS) exige ao menos três fontes distintas de corrente alternada para suprimento dos serviços auxiliares, além de um banco de baterias capaz de manter a carga do barramento dos serviços auxiliares em

corrente contínua (CC) “Cada conjunto bateria-retificador deve atender a toda a carga prevista para regime contínuo pelo período mínimo de 5 (cinco) horas” (ONS, 2016).

Os serviços auxiliares essenciais são responsáveis pelo suprimento de energia para a sala de controle da SE, para as bobinas de operação dos disjuntores, para motores de acionamento de disjuntores e chaves seccionadoras, iluminação de emergência e atividades remotas de supervisão e de controle.

Normalmente, as fontes de energia em corrente alternada (CA) das subestações são requeridas das seguintes fontes: Transformador de distribuição (TSA) alimentado pelo transformador de força da subestação; Grupo motor gerador a óleo diesel (GMG); Rede de distribuição da concessionária de serviço público (RD). (MAMEDE, 2021).

Os serviços auxiliares são supridos por um barramento de 125 V em corrente contínua, baseado em baterias e normalmente alimentado por dispositivos retificadores. Um ponto de melhora desse aspecto, seria a partir da introdução de mais uma fonte para o suprimento energético do serviço auxiliar, através de um sistema fotovoltaico.

O serviço auxiliar desempenha um papel fundamental nas subestações de energia elétrica, garantindo o funcionamento adequado e seguro do sistema como um todo. Esses serviços são responsáveis por fornecer energia elétrica aos equipamentos auxiliares e de controle, além de realizar funções de proteção, controle, monitoramento e comunicação (MAMEDE, 2021).

Nos últimos anos houve um crescimento da produção de energia elétrica através de sistemas fotovoltaicos, com previsão de aumento contínuo para os próximos anos, em solo brasileiro (DANTAS, 2020).

Com esse intuito, o uso de sistemas fotovoltaicos para a geração de energia elétrica é um caminho tecnicamente viável, devido aos seus benefícios, comparadas a outras fontes tradicionais, como utilização de fonte renovável, baixo custo operacional e de manutenção (DANTAS; POMPERMAYER, 2018).

No Brasil, com o objetivo de diversificar a matriz energética através de fontes renováveis, diminuindo a dependência de hidrelétricas, principalmente em períodos de seca, os sistemas fotovoltaicos têm recebido estímulos, como isenções fiscais, para o seu crescimento (BRASIL, 2020).

Assim, este trabalho propõe agregar mais uma fonte de suprimento de energia para o barramento CC de cargas auxiliares, a partir de um sistema fotovoltaico, banco de baterias e inversor fotovoltaico híbrido.

Para desenvolvimento do estudo, foram definidos objetivos específicos, que são: dimensionar o gerador fotovoltaico; dimensionar o banco de baterias; selecionar e dimensionar o inversor híbrido; analisar os modos de operação do sistema.

Como justificativa para a realização desse estudo, ela é baseada no intuito de propor uma solução para aumentar o tempo de alimentação do serviço auxiliar, quando não há mais alimentação pelo TSA (Transformador de Serviço Auxiliar), GMG (Gerador) e rede de distribuição, visto a necessidade e importância do suprimento em CA e CC para o funcionamento de uma subestação.

Assim, com o sistema solar implantado, o gerador entra apenas quando necessário, dado que, quando o TSA não estiver atuando, o sistema fotovoltaico assume o posto de alimentação do serviço auxiliar, permitindo um aumento no período de atuação do banco de baterias, tal qual uma redução nos custos de operação do gerador.

Acredita-se, como conclusões prévias sobre o estudo, que esse pode ser uma importante porta para a evolução e maior autonomia energética das subestações, dado que há sistemas fotovoltaicos que funcionam de forma híbrida, para isso é necessário que haja um dimensionamento adequado da capacidade de geração solar, dentro do pior cenário possível, para assim garantir o funcionamento como o desejado.

Além deste item introdutório, capítulo 1, este texto está organizado nos seguintes capítulos: 2) sistema fotovoltaico; 3) caso de estudo: subestação Firminópolis; 4) conclusão.

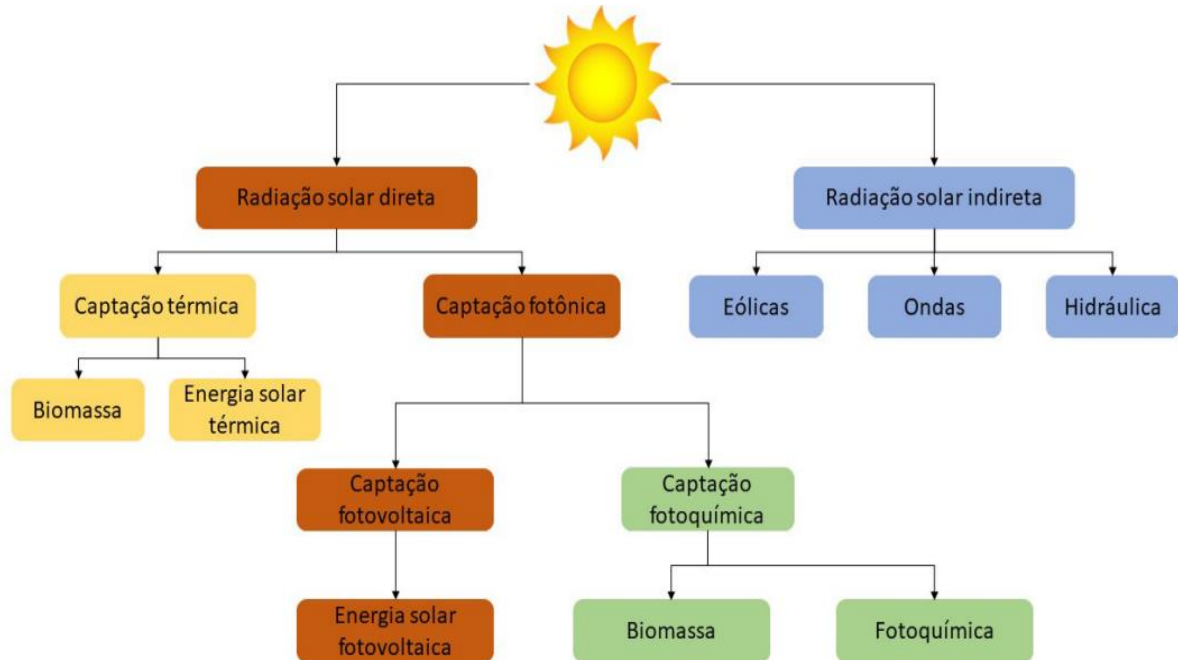
## 2. SISTEMA FOTOVOLTAICO

### 2.1 ENERGIA SOLAR

A grande utilização de fontes fósseis para a produção de energia elétrica no mundo tem estimulado a busca por fontes renováveis como alternativa para a demanda energética, buscando a diversificação da matriz energética (SILVA; BRANDÃO, 2022).

De acordo com Oliveira Júnior (2022), o Sol é uma importante fonte energética para o planeta Terra, em que uma série de eventos naturais são possíveis somente graças à atuação solar. Além disso, o Sol é um importante meio para obtenção de outras fontes de energia, como a elétrica, através de sistemas fotovoltaicos. A descrição realizada anteriormente pode ser visualizada na Figura 1, exposta a seguir.

Figura 1: Meios para utilização da energia proveniente do Sol.



Fonte: Oliveira Júnior (2022).

O crescimento da geração de energia elétrica através da radiação solar é uma realidade, a qual pode ser justificada por uma série de fatores, sustentabilidade e preocupações ambientais, queda nos custos para implementação de um sistema,

incentivos governamentais, dentre outros, dado que a combinação desses aspectos tem impulsionado o crescimento da energia solar, tornando uma das opções mais atrativas e viáveis para diversificação da matriz energética global (SOUSA, 2022).

O cenário no Brasil é favorável para alavancar o mercado de energia solar fotovoltaica, por apresentar condições positivas para o aproveitamento da geração desse tipo de energia, por causa de sua localização geográfica e dos altos índices de irradiação solar. Desde a instalação da primeira usina solar no país, o setor elétrico vem expandindo graças aos programas de incentivo governamentais que viabilizam um mercado mais aprimorado e eficiente. Porém, quando a tecnologia é tratada nos centros urbanos, ela tem sido pouco aproveitada em razão da falta de recursos financeiros para investir nesse sistema de custo elevado ou por conta do desconhecimento a respeito do retorno financeiro que o proprietário terá ao longo dos anos (RIBEIRO FILHO; PEREIRA; VELAZQUEZ, 2023, p. 83).

No Brasil, em conformidade com a Aneel, atualmente, quando comparada a outras fontes, a energia elétrica obtida através da luz solar, representado apenas 2,5% do que é produzido no país (ABSOLAR, 2022). Nos últimos anos, a partir do desenvolvimento das tecnologias presentes em sistemas fotovoltaicos, além de incentivos econômicos, como financiamentos, isenções fiscais, permitiram uma maior popularização de modelos de produção energética (BEZERRA, 2022).

A energia elétrica solar é uma forma de energia elétrica obtida a partir da conversão da energia solar em eletricidade, essa geração se dá por meio do uso de painéis solares, que são dispositivos que contêm células fotovoltaicas, essas são compostas por materiais semicondutores, como o silício, que absorvem a luz solar e a transformam em corrente elétrica. (OLIVEIRA, JÚNIOR, 2022).

A energia elétrica gerada através da conversão direta da radiação solar, é o principal meio para funcionamento dos sistemas fotovoltaicos, para que essa conversão ocorra é utilizado o material comumente chamado de célula fotovoltaica, composta por átomos de silício. Utilizando o efeito fotovoltaico, as células de silício em contato com a radiação solar geram energia elétrica em corrente contínua (SILVA; BRANDÃO, 2022).

Os sistemas fotovoltaicos podem ser classificados pela forma de sua distribuição de energia elétrica gerada, sendo eles divididos em Sistemas conectados à Rede (On-Grid) e Sistemas isolados da rede (Off-Grid). Há também os sistemas híbridos, que utilizam tanto energia externa das distribuidoras de energia quanto um banco de baterias específico para cada projeto. (AZAMBUJA, 2022).

A grande demanda energética no país causada pelo constante desenvolvimento de novas indústrias e um maior uso de equipamentos eletrônicos, faz com que a busca por novas fontes de geração de energia elétrica seja constante, como a Energia Fotovoltaica (OLIVEIRA, JÚNIOR, 2022).

O Brasil é considerado um dos países com maior capacidade de Geração de Energia elétrica via sistemas fotovoltaicos. Grande parte de seu território está localizada em uma região intertropical, próximo a linha do equador, no qual possui uma grande capacidade de captação de radiação solar durante todo o ano (DANTAS, 2020).

Com o desenvolvimento tecnológico aliado a necessidade não só de praticidade, mas também na identificação de problemas em sistemas fotovoltaicos, foram criados equipamentos capazes de otimizar, detectar defeitos e acompanhar de forma virtual a nível modular (microinversores e otimizadores de potência) o funcionamento do sistema. Isso permitiu um ganho de geração, rápida resolução, troca dos equipamentos defeituosos e uma melhor manutenção da usina (SILVA, 2020).

Nos sistemas fotovoltaicos com inversores de parede/string/convencional as placas que ficam em cima do telhado ficam interligadas trabalhando com altas tensões que podem oferecer um risco quando trata-se do assunto segurança. Para solucionar essa problemática, criou-se a tecnologia MLPE (*Module Level Power Electronics*) dos microinversores e otimizadores de potência englobados dentro do sistema de energia solar como uma forma de controlar a tensão acumulada na parte de cima do telhado e diminuir os riscos (SOUZA, 2019).

### 2.1.1 Módulo fotovoltaico e irradiação

Um módulo fotovoltaico, também conhecido como painel solar fotovoltaico ou simplesmente painel solar, é um dispositivo composto por células solares, as quais convertem a luz solar, que incidem diretamente nelas, em eletricidade. Esses módulos são a principal unidade de geração de energia em sistemas solares fotovoltaicos (NOBERTO, LEMOS, 2019).

O termo módulo fotovoltaico, diz respeito a um dispositivo construído a base de semicondutores, em que, por intermédio de uma excitação luminosa dos raios solares,

é possível gerar corrente elétrica (OLIVEIRA, 2022). De acordo com a ABNT (2013), a NBR 10899 traz a definição de módulo fotovoltaico como sendo “unidade básica formada por um conjunto de células fotovoltaicas, interligadas eletricamente e encapsuladas, com o objetivo de gerar energia elétrica”, em complemento, a mesma norma define célula fotovoltaica como sendo “dispositivo fotovoltaico elementar especificamente desenvolvido para realizar a conversão direta de energia solar em energia elétrica”.

As células fotovoltaicas presentes em um módulo são feitas de materiais semicondutores, como o silício, que possuem a propriedade de gerar uma corrente elétrica quando expostas à luz solar, elas são interconectadas em série ou paralelo dentro do módulo para aumentar a tensão e a corrente produzidas (NOBERTO, LEMOS, 2019).

O funcionamento do módulo fotovoltaico se dá através do efeito fotovoltaico, evento que ocorre quando a luz solar incide sobre as células fotovoltaicas presentes no painel, essas formadas por semicondutores, em que a partir da interação com a energia da irradiação solar, é possível produzir energia elétrica (OLIVEIRA, 2022).

Semicondutores são materiais que possuem propriedades elétricas intermediárias entre condutores (como metais) e isolantes (como plásticos ou vidro), em que essa junção permite a capacidade de conduzir eletricidade de forma moderada, dependendo das condições em que se encontram, a passagem de corrente elétrica nos semicondutores é promovida através de um processo denominado dopagem.

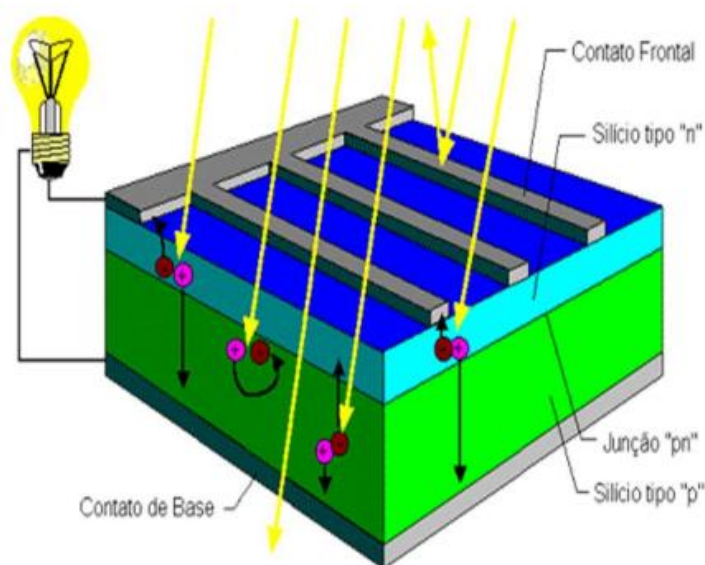
O processo de dopagem em semicondutores é uma etapa essencial na fabricação de células solares fotovoltaicas, que são os componentes principais dos painéis solares usados para produzir energia solar, dado que através da adição de impurezas no semicondutor, é possível criar regiões de características elétricas diferentes, seja com acúmulo ou falta de elétrons, em que essa distinção possibilita a criação de uma corrente elétrica, em condições de estímulos específicos.

Nas células solares fotovoltaicas, geralmente são utilizados semicondutores à base de silício. O silício puro é um semicondutor intrínseco, ou seja, não possui impurezas adicionadas. Para criar uma célula solar eficiente, o silício é dopado de forma controlada para criar camadas com diferentes características elétricas, que quando excitadas produzem energia elétrica (NOBERTO; LEMOS, 2019).

Para o silício, é o semicondutor mais empregado em módulos fotovoltaicos atualmente, em que a sua utilização só é possível graças ao processo de dopagem, que permite a produção de corrente elétrica, por intermédio da criação de diferenças de potenciais, através da absorção da energia luminosa proveniente do sol (AZAMBUJA, 2022).

Do ponto de vista da atuação do funcionamento dos módulos fotovoltaicos, a excitação necessária para a geração elétrica se baseia nos fótons presentes nos raios solares, os quais precisam ser absorvidos pelos semicondutores, em que eles transferem essa energia para os elétrons presentes nos seus átomos, permitindo que ocorra a movimentação, criando regiões com polaridades distintas, logo o evento de uma diferença de potencial elétrico entre as camadas positiva e negativa da célula fotovoltaica, essa diferença de potencial gera uma corrente elétrica contínua, que pode ser usada como eletricidade (FAUSTINO, 2018). O evento de funcionamento de uma célula fotovoltaica é ilustrado na Figura 2, apresentada a seguir, com a movimentação dos elétrons através da excitação da luz solar.

Figura 2: Funcionamento de uma célula fotovoltaica

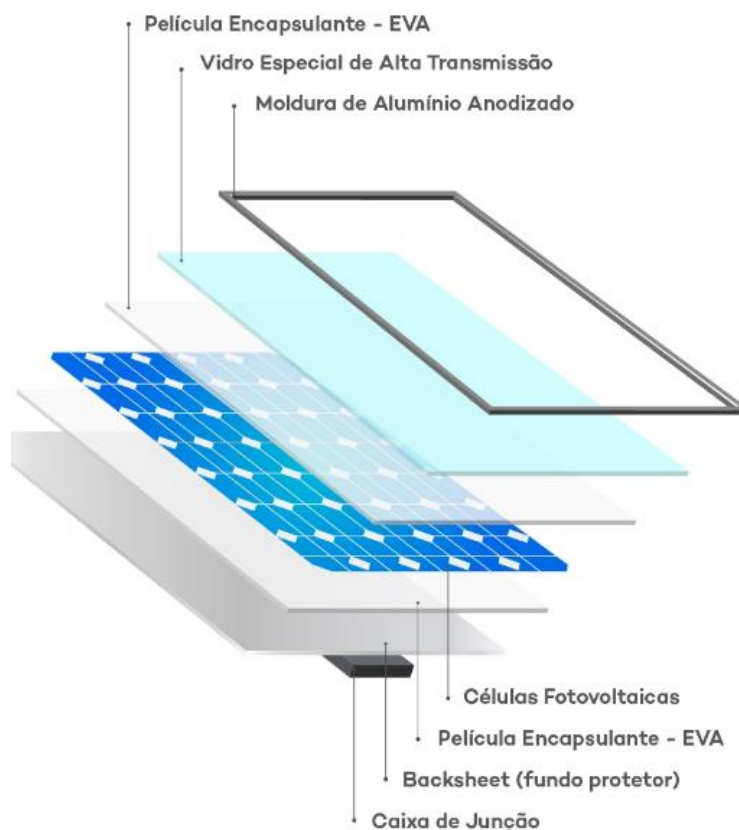


Fonte: Noberto e Lemos (2019).

A camada das células fotovoltaicas é fundamental para o desempenho do painel solar, visto que é responsável por fazer a conversão de energia solar em elétrica através do efeito fotovoltaico, sendo situada no centro, e corresponde a maior parte do custo do módulo (CORREA, 2019). De modo a ilustrar a composição de um módulo

fotovoltaico de silício, o estudo, através da Figura 3, ilustra a composição de um módulo fotovoltaico, conforme pode ser verificado a seguir.

Figura 3: Composição de um módulo fotovoltaico



Fonte: KWE Solar Engenharia (2023).

O vidro especial, contido na face inferior e superior do módulo, possui esse nome devido a sua composição que se destina a facilitar a entrada da luz solar, por isso ele possui um grau de pureza elevado e baixo percentual de ferro, evitando a incidência de reflexões solares, além de realizar um papel de protetivo das células fotovoltaicas contra avarias, como chuva de granizo (FAUSTINO, 2018).

Em relação a degradação proveniente de questões ambientais, como temperatura e umidade, o filme encapsulante (EVA) participa da composição do módulo com o intuito de fornecer a proteção citada, sendo localizado abaixo das células fotovoltaicas (OLIVEIRA, 2018). Para o desempenhar a função de isolante elétrico se tem o revestimento de material plástico branco ou backsheet, o qual fica localizado na parte de trás do módulo fotovoltaico (CORREA, 2019).

A caixa de junção fica localizada na parte traseira do módulo fotovoltaico onde os circuitos elétricos das células fotovoltaicas estão conectados eletricamente em série, ela possui no seu interior diodos de passagem ou bypass com a função de prevenir o surgimento de um determinado ponto de sobreaquecimento ou hotspots oferecendo segurança, as molduras de alumínio anodizado ou frame são responsáveis pela proteção da parte estrutural externa do painel solar e contra desgastes causados por oxidação (RODRIGUES, 2019).

Os módulos fotovoltaicos, podem ser policristalinos ou monocristalinos, a principal diferença entre eles está na estrutura, no processo de fabricação dos semicondutores e na eficiência resultante, os monocristalinos tendem a ser mais eficientes, mas também são geralmente mais caros, já os policristalinos são mais acessíveis, mas apresentam uma eficiência ligeiramente inferior, a escolha entre os dois depende das necessidades, orçamento e preferências individuais do projeto de energia solar (OLIVEIRA, 2022). No que tange a produção energética dos módulos fotovoltaicos, a irradiação torna-se um conceito de relevância para o tema tratado.

### 2.1.2 Irradiação solar

A irradiação solar é um fator crucial que influencia diretamente a produção de energia de um sistema fotovoltaico, dado que a quantidade de irradiação solar recebida pelo sistema afeta diretamente a quantidade de energia elétrica que pode ser gerada, sendo essa influenciada por fatores como a localização geográfica, estação do ano, horário do dia, cobertura de nuvens e inclinação/orientação dos painéis solares (AZAMBUJA, 2022).

A atuação do sol, no planeta terra, é um elemento de grande relevância, dado que ele é a principal fonte de energia. A partir da radiação solar é que se tem a existência do ecossistema terrestre, interferindo em aspectos como clima, duração dos dias, evaporação (OLIVEIRA, 2022).

Há diferentes tipos de radiação solar, os quais são classificados quanto a sua forma de atenuação e reflexão, assim tem-se a radiação direta, a qual não sofre nenhuma forma de reflexão ou atenuação ao incidir no plano terrestre, a radiação difusa, que é aquela que sofre atenuação, como nuvens, antes de chegar no solo

terrestre, e a radiação refletida, a qual é direcionada em outra trajetória, a depender da superfície a qual ela incide (MAGARREIRO; FREITAS; BRITO, 2021).

A atuação do sol, no planeta terra, é um elemento de grande relevância, dado que ele é a principal fonte de energia, a partir da radiação solar é que se tem a existência do ecossistema terrestre, interferindo em aspectos como clima, duração dos dias, evaporação, dentre outros, conforme explana (ALBUQUERQUE, 2023).

O sol é a principal estrela do sistema solar, em que outros planetas orbitam sobre ele, sendo esse uma estrela com composição gasosa, a qual emite energia através de ondas eletromagnéticas, a partir da sua atuação luminosa (ANDRADE, 2020).

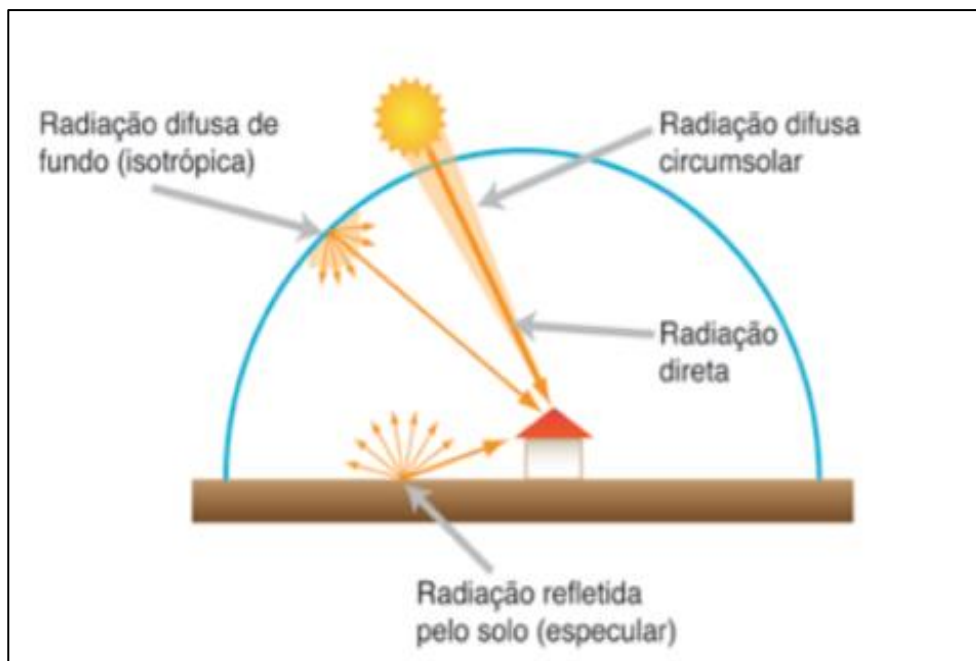
Para haver a emissão de energia, por intermédio dos raios solares, não é necessário que se tenha um meio para a sua propagação, em que a partir dessa energia luminosa, incidindo sobre os painéis fotovoltaicos, é que se tem a produção de energia elétrica. (SILVA, 2020).

A radiação solar é a principal fonte de energia primária do planeta, devido a sua participação em uma série de processos físicos, químicos e biológicos, sendo um dos pilares da vida na terra. Ela pode ser definida como uma radiação eletromagnética, que propaga energia, proveniente das reações físico-químicas do sol (GOMÉZ et al., 2018).

(ALBUQUERQUE, 2023) pondera que irradiação solar é quando se trata da energia que incide em uma determinada área ( $W/m^2$ ), já quando analisa-se a potência, ou seja, a incidência da energia que incide em uma determinada área durante determinado, denomina-se irradiância solar ( $Wh/m^2$ ).

Há diferentes tipos de radiação solar, os quais são classificados quanto a sua forma de atenuação e reflexão, assim tem-se a radiação direta, a qual não sofre nenhuma forma de reflexão ou atenuação ao incidir no plano terrestre, a radiação difusa, que é aquela que sofre atenuação, como nuvens, antes de chegar no solo terrestre, e a radiação refletida, a qual é direcionada em outra trajetória, a depender da superfície a qual ela incide (MAGARREIRO; FREITAS; BRITO, 2021). A Figura 4, exposta a seguir, ilustra essas três tipologias de radiação.

Figura 4: Tipos de radiação.



Fonte: Magarreiro, Freitas e Brito (2021).

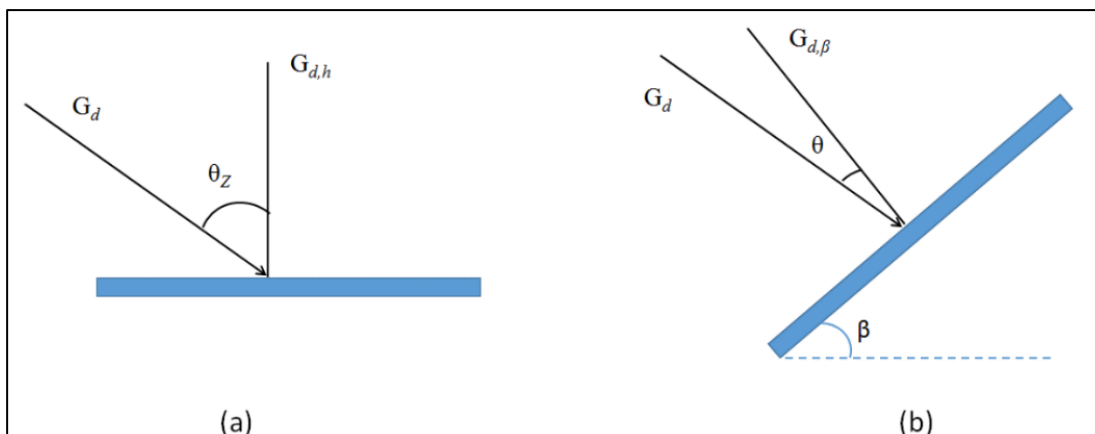
O formato geóide da terra gera diferentes índices de radiação, quanto maior o grau da latitude, ou seja, quanto mais distante da Linha do Equador ( $0^\circ$ ), menor será o índice de radiação do lugar. A radiação solar é um aspecto afetado por uma série de elementos, como a composição atmosférica, partículas de vapores de água, dentre outros (ANDRADE, 2020).

A distância entre o sol e a terra, visto que ela realiza uma trajetória elíptica em referência solar, é um dos fatores que influenciam na irradiação que atinge o planeta terra, variando de acordo com o decorrer do ano (ANDRADE, 2020). De acordo com o Silva (2006), a terra realiza um movimento de translação em torno do sol, quanto mais próxima do sol, maior será a atuação solar no planeta.

Em relação a irradiância solar, o ângulo zenital é de grande importância, pois a partir dele é possível verificar em qual ângulo que se tem a incidência solar de forma perpendicular, oferecendo assim os melhores índices de radiação nesse ângulo (ALBUQUERQUE, 2023).

A questão de ter uma posição zênite, influencia diretamente no processo de geração de energia por módulos fotovoltaicos, os quais devem estar em uma posição que acompanhem o ângulo do sol (ângulo zenital), para uma melhor geração (COSTA et al. 2022). A Figura 5 expressa o modelo citado anteriormente.

Figura 5: Angulação do módulo fotovoltaico.



Fonte: Pinho e Galdino (2014).

Em relação ao processo de geração de módulos fotovoltaicos, em relação a irradiação, esse processo é realizado de modo a verificar as regiões de maior irradiação durante o ano e a melhor época, sendo esse um aspecto de difícil modificação, dado que a região possui bons índices de radiação ou não, já a questão de disposição angular dos módulos solares, de acordo com o ângulo zenital, é importante para a melhor geração, visto que é bom o operador da instalação ter a ciência de qual o ângulo indicado para a sua região (ALBUQUERQUE, 2023).

### 2.1.3 Inversor fotovoltaico

A conversão de Energia dos painéis fotovoltaicos da radiação solar para energia elétrica gera corrente contínua (CC). Contudo, na maioria dos equipamentos industriais, eletrodomésticos, entre outros, é utilizado energia na forma de Corrente Alternada (CA). Portanto, existe a necessidade de um equipamento que faça essa conversão/inversão de Energia CC para Energia CA, chamado Inversor (SILVA, 2020).

Entretanto, para que o Inversor funcione corretamente, em casos de sistemas conectados à rede elétrica da distribuidora de energia, a tensão de saída deste equipamento e sua frequência deve ser sincronizada com a tensão da rede. (ALBUQUERQUE, 2023).

O inversor, por ser considerado parte importante do sistema fotovoltaico, essa parte passou por constantes evoluções em termos tecnológicos, a fim de trazer avanços em alguns aspectos como eficiência de geração, segurança, dentre outros aspectos (SANTOS, 2021).

Durante os últimos anos, devido ao crescimento da utilização da energia solar, novas tecnologias foram sendo introduzidas, principalmente aquelas com o enfoque no inversor, que é considerado um dos principais elementos do sistema fotovoltaico, realizando a conversão da corrente CC em CA, conforme pondera Godoi (2018).

Nos últimos anos a evolução tecnológica nos inversores foi de modo que a geração de energia garantisse uma maior eficiência, visto que um dos meios para atingir esse aspecto foi a partir da segmentação do sistema, capacitando o controle de geração módulo por módulo (SOUZA, 2019).

Dentro do ponto de vista de geração em sistemas fotovoltaicos, as strings podem ser compreendidas como um conjunto de módulos fotovoltaicos, que trabalham em conjunto, assim, caso haja uma barreira que reduza a produção de um módulo do conjunto, todos os outros módulos sentiram o mesmo efeito, dado que eles devem estar no mesmo MPPT (Maximum Power Point Tracking), reduzindo a geração do sistema durante dia (SILVA, 2020).

O MPPT (Maximum Power Point Tracking) de um módulo fotovoltaico é a potência máxima de geração de acordo com as condições que ele é exposto, assim, em uma situação hipotética, um módulo de 600 Watts, em condições ideais, produzirá o seu valor nominal, caso haja alguma interferência, como sombreamentos por nuvens, o MPPT dele reduzirá, por exemplo a 450 Watts, interferindo assim na sua geração (SOUZA, 2019).

Já nos inversores multistring, começou a haver uma segmentação do sistema, podendo alojar mais de uma fileira (conjunto de módulos) no sistema, havendo um controle independente da produção de cada uma das fileiras, assim a produção de uma string não afeta todo o sistema, possibilitando maior geração de energia (SILVA, 2020).

Uma grande evolução na atuação dos inversores, diz respeito ao controle individual de cada módulo, controlando a produção de cada módulo, de forma independente, tirando o máximo da produção de acordo com as condições que cada módulo está submetido, sendo esse conceito denominado de Modulo Level Power Electronics (Eletrônica de potência à nível de módulo) (SOUZA, 2019).

Dentro desse conceito, uma das tipologias disponíveis diz respeito a inversores simplificados com otimizador de potência, em que há um inversor, o qual continua centralizando a conversão de corrente CC em CA, mas há otimizadores de potência em cada um dos módulos, permitindo uma geração independente em cada um deles, conseguindo trabalhar com um MPPT individual (SANTOS, 2021).

Os otimizadores de potência são dispositivos utilizados para maximizar a eficiência de cada painel solar em atuação, eles são instalados no nível de cada painel solar e funcionam individualmente para rastrear o ponto de máxima potência, independentemente das condições de sombreamento, sujeira ou desgaste do sistema (SILVA, 2020).

Outra topologia que cumpre esse papel de produção individualizada do sistema fotovoltaico é representada pelos microinversores, em que nela a cada par ou quarteto de módulos, há um inversor de menor proporção que consegue controlar a produção individual de cada módulo, em que os microinversores ficam próximos aos módulos e além do controle de produção individual ele também realiza a conversão de CA em CC (GODOI, 2017).

Microinversores são dispositivos eletrônicos utilizados em sistemas fotovoltaicos para converter a energia gerada pelos painéis solares de corrente contínua (DC) para corrente alternada (AC) no próprio nível de cada painel solar, tal fato permite que cada painel opere de forma independente e otimize sua produção de energia, mesmo em condições de sombreamento ou desgaste desigual do sistema (SILVA, 2020).

A fim de ilustrar, de modo mais pormenorizado as características encontradas em cada tipo de inversor, na Tabela 1, exibida a seguir, é apresentado um comparativo entre as topologias, sendo possível ter uma maior compreensão de como ocorre a atuação de cada uma delas.

Tabela 1: Comparação entre inversores de string, microinversores e otimizadores.

<b>Quesitos</b>	<b>String</b>	<b>Microinversores</b>	<b>Otimizadores</b>
<b>Funcionamento</b>	Uma ou várias fileiras são conectadas a um inversor	Geralmente um ou dois módulos FV são conectados a um microinversor	Geralmente um ou dois módulos FV são conectados a um otimizador
<b>Sombreamento Parcial</b>	Impacta todo o conjunto de módulos	Impacta somente os módulos sombreados	Impacta somente os módulos sombreados
<b>Desempenho com sombras</b>	Baixo	Mais eficiente	Mais eficiente
<b>Desempenho com módulos FV em diferentes direções ou telhados irregulares</b>	Baixo	Alto	Médio
<b>Segurança na instalação</b>	Padrão	Alta	Alta
<b>Custo</b>	Baixo	Alto	Médio

Fonte: Silva (2020)

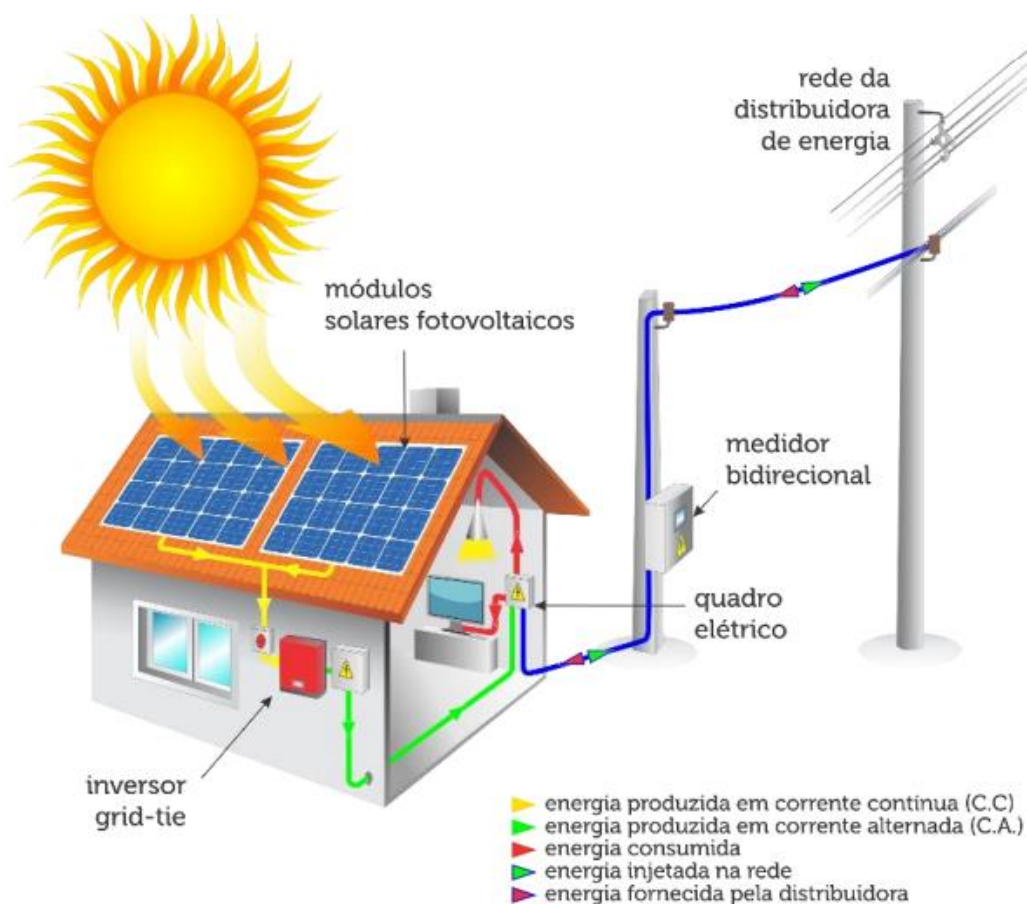
#### 2.1.4 Sistemas fotovoltaicos on-grid e off-grid

Em relação ao processo de geração de energia elétrica através de módulos fotovoltaicos, o modelo que se dá o consumo energético é uma forma de se classificar o sistema, em que há três tipologias, que são os sistemas on-grid, sistemas off-grid e o sistema híbrido, que utiliza atua através da junção dos dois sistemas anteriormente citados (SANTOS; SOUZA, 2022).

Um sistema fotovoltaico isolado, também conhecido como sistema fotovoltaico off-grid, é um sistema de geração de energia solar que opera de forma independente da rede elétrica pública. Nesse tipo de sistema, painéis solares são utilizados para converter a luz solar em eletricidade, e essa energia é armazenada em baterias para ser utilizada quando não há luz solar disponível (COLARES, 2022).

De acordo com (ALBUQUERQUE, 2023), o sistema de geração on-grid é aquele que está ligado à rede da concessionária, em que a energia produzida pelo sistema é entregue para a concessionária, assim esse modelo de produção energética fotovoltaica não necessita de um banco de baterias. A Figura 6 ilustra um sistema baseado na topologia on-grid.

Figura 6: Modelo On-Grid de geração.



Fonte: (ALBUQUERQUE, 2023).

O modelo on-grid, é aquele conectado à rede de distribuição, assim, as cargas contidas no local em que está instalado o sistema fotovoltaico consome o necessário, e em momentos em que há uma demanda energética maior, como em horários de

pico, a concessionária de energia fornece o necessário conforme explana Colares (2022).

O sistema on-grid realiza um balanço entre a energia gerada e consumida para assim contabilizar a fatura de energia do cliente que possui o sistema fotovoltaico, assim caso haja um excedente de energia, o cliente recebe créditos, ao contrário, ele arca com o débito de energia consumido na sua fatura, de acordo com (ALBUQUERQUE, 2023).

Em relação ao sistema on-grid, ele possui algumas vantagens como a possibilidade de acumular créditos durante determinado período e compartilhar eles com outras unidades consumidoras, além de não haver necessidade de colocar baterias no sistema, em contrapartida, há desvantagens, dependência da rede da concessionária e sem possibilidade de armazenar energia (COLARES, 2022).

A tipologia off-grid é aquela que não há uma conexão entre a rede da concessionária, ou seja, a energia produzida pelo sistema é destinada para a demanda energética do local instalado e o excedente é armazenado dentro de baterias (ALBUQUERQUE, 2023). A Figura 7 ilustra um sistema baseado na topologia off-grid.

Figura 7: Modelo Off-Grid de geração.



Fonte: (ALBUQUERQUE, 2023).

Para (ALBUQUERQUE, 2023), a tipologia off-grid possui algumas vantagens como a possibilidade de gerar energia para consumo próprio em regiões que a concessionária não atende, não depende da concessionária para o sistema funcionar, permite armazenar energia, em contrapartida há algumas desvantagens, como o custo mais elevado, em relação ao sistema off-grid, e menor eficiência.

Também é possível fazer um sistema híbrido, o qual conta com as duas topologias citadas, atuando de modo conjunto, ou seja, o sistema contará com a conexão a rede da concessionária, além de possuir um banco de baterias, o qual realizará o armazenamento da energia produzida, sendo esse um sistema mais flexível (COLARES, 2022).

## 2.2 SUBESTAÇÕES E A UTILIZAÇÃO DE FONTES CC E CA

Dentro do sistema de energia, uma parte fundamental para o seu funcionamento se refere a aplicação de subestações, visto que elas são aplicadas no processo de distribuição, transmissão e geração de energia, sendo esse o principal elo de conexão entre a geração até o consumidor final, garantindo a eficiência e segurança do sistema elétrico (MAMEDE, 2021). Em discussão ao tema abordado, Kfourri faz a seguinte consideração,

Quando se fala em sistema elétrico, está se fazendo referência ao Sistema Elétrico de Potência – SEP. O SEP atualmente é um conjunto de instalações, equipamentos e procedimentos, que operando de maneira coordenada são destinados à geração, transmissão de energia elétrica, distribuição e medição, com resultado final o fornecimento de energia aos consumidores, instante a instante dentro de padrões de confiabilidade, disponibilidade e segurança (KFOURI, 2018, p. 05).

A produção de energia começa a partir de unidades de geração, como hidroelétricas, termoeletricas, dentre outras, as quais fazem a ligação com as redes que realizam a transmissão de energia, percurso em que se tem o registro de altas tensões, a fim de reduzir as perdas, geralmente, durante o caminho a energia passa por um processo de redução de tensão até chegar nas concessionárias de energia, dando continuidade no processo de redução de tensão, até ser entregue no consumidor final, toda essa rede possui nós ou fronteiras do sistema, como pontos de convergência, entrada e saída, cada um desses pontos é encontrado uma subestação com finalidade específica (FÉLIX, 2022).

Em continuidade, Oliveira (2022) pondera que as subestações é um importante mecanismo que permite a viabilidade econômica da transmissão de energia elétrica dentro de uma rede, sobretudo, no processo de redução e elevação de tensão, a fim de evitar perdas por efeito joule.

Conforme estabelece Campos e Estevam (2020), diante das finalidades de aplicação das subestações, elas podem destinadas a transformação de tensão, realizando o aumento ou redução da tensão, distribuição de energia, seccionamento de linhas de transmissão, conversão de corrente, conversão de frequência, esses últimos dois casos a sua aplicação são mais raros.

Por ser uma parte de grande relevância para o sistema elétrico, as subestações possuem diversas classificações relacionadas quanto a funcionalidade, visto que por ser um elemento de grande importância, a introdução de novas subestações ou ampliação, essa é uma operação complexa, que exige uma equipe capacitada para desenvolver todo o sistema da melhor forma possível, garantindo a sua eficiência e segurança.

De acordo com Oliveira (2022) as subestações podem ser classificadas quanto ao seu nível de tensão, em relação a sua tensão de entrada e saída, quanto a sua funcionalidade dentro do sistema de energia nacional, relacionado aos processos de transmissão e distribuição.

Sob a ótica de Félix (2022), as subestações podem ser classificadas através de alguns parâmetros, como a relação entre os níveis de entrada e saída, papel desempenhado dentro do sistema elétrico, tipo de instalação, tipo construtivo e forma de operação.

Em relação a classificação de uma subestação quanto aos níveis de entrada e saída, ela pode ser uma subestação de manobra, a qual objetiva ramificar determinado ponto para que ele possa percorrer mais trechos de menor comprimento, subestação de transformação, essa separada em subestações elevadoras e abaixadoras.

Conforme explica Félix (2022), as subestações abaixadoras realizam um processo de redução da tensão, assim elas estão localizadas próximo a locais de demanda de carga, como cidades ou indústrias, já o modelo de subestação elevadora, realiza o processo de aumento da tensão, se encontrando próximo a unidade de geração, como hidroelétricas.

Quando o assunto é a classificação das subestações quanto a forma de atuação dentro do sistema elétrico, elas podem ser divididas em subestação de distribuição, que possui uma tensão até 34,5kV, sendo ela que entrega a energia a concessionária de energia da região, entregando ao consumidor, já as subestações de subtransmissão e transmissão, em que a primeira corresponde a tensões de 69 até 138 kV, já a segunda tipologia se refere a tensões superiores a 138kV (CAMPOS; ESTEVAM, 2020).

As subestações exercem um papel de grande importância no funcionamento do sistema elétrico, em que cada uma possui determinada função, dado que para a execução ou ampliação de uma subestação uma série de processos devem ser

respeitados e estabelecidos, para que ela possa cumprir seu papel com eficiência e segurança (CAMPOS; ESTEVAM, 2020).

Dentro de uma subestação há uma série de equipamentos que auxiliam no seu funcionamento e segurança, como disjuntores, para-raios, seccionadoras, painéis de controle, banco de capacitores, transformadores, dentre outros, onde cada um desses elementos possui determinada função para a operação da subestação (OLIVEIRA, 2022).

Há uma série de equipamento de alta tensão dentro de uma subestação que precisam ser energizados para o seu bom funcionamento, por exemplo, os disjuntores precisam que suas bobinas, molas sejam alimentadas para que ele possa realizar a sua abertura ou fechamento, quando necessário, há uma série de comandos realizados remotamente, os quais precisam de alimentação para ocorrer, sinalizações, iluminações de pátio, refrigeração, enfim, há uma série de elementos que precisam ser energizados, seja na corrente CA ou CC, para que eles possam exercer seu papel dentro da subestação (MAMEDE, 2021).

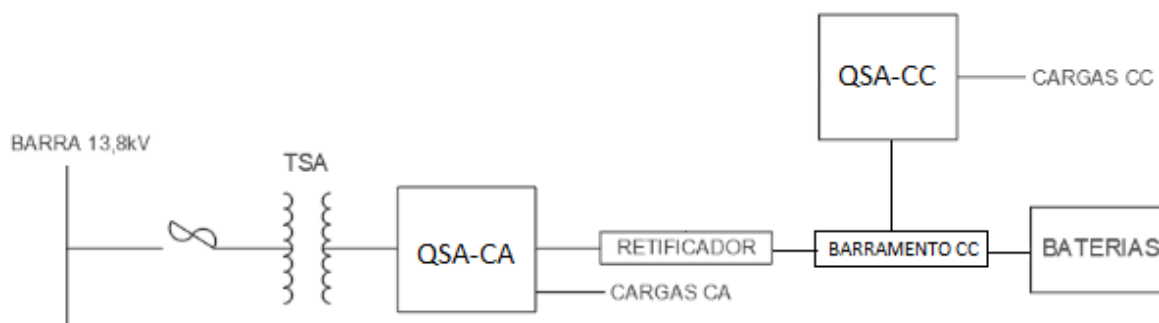
O serviço auxiliar é todo o sistema que oferece suporte para a subestação, apoiando o funcionamento dos circuitos de alta tensão, seja na alimentação, comando, sinalização, dentre outras funções, comumente esse sistema é formado por um transformador, comumente denominado de TSA (Transformador de Serviço Auxiliar), um painel de serviço auxiliar CA, além de contar com uma parte CC, a qual contém um retificador, para realizar a transformação das correntes CA e CC, além de haver um painel dedicado a corrente CC (OLIVEIRA, 2022). Em relação a atuação do TSA, Mamede pondera que,

É aquele utilizado para suprir as cargas de iluminação e serviços diversos da subestação. O transformador de serviço auxiliar em geral, uma única unidade, é alimentado pelo secundário do transformador de potência da subestação. Seu secundário está conectado ao barramento do Quadro de Serviços Auxiliares de Corrente Alternada (QSACA) que por sua vez alimenta todas as cargas em tensão alternada e o(s) retificador(es) carregador(es) do banco de baterias. Sua capacidade nominal é calculada considerando todas as cargas de corrente contínua, alimentadas através do retificador carregador, e as cargas em corrente alternada da subestação (MAMEDE, 2021, p. 110).

A seguir na Figura 8, apresenta um esquema simples de um diagrama que ilustra o serviço auxiliar de uma subestação, com o transformador TSA reduzindo a tensão para os níveis utilizados em CA, o retificador fazendo a conversão da corrente

CA para CC, armazenando em baterias e distribuindo para o painel CC, que conseqüentemente, distribui para as cargas em corrente CC.

Figura 8: Diagrama simplificado de um serviço auxiliar



Fonte: Produzido pelo autor (2021).

De acordo com Mamede (2021), o arranjo do sistema de serviço auxiliar vai depender das características da subestação a qual ele está aplicado, assim, em subestações menores, há apenas o TSA para realizar o suprimento de energia para as cargas CA, em subestações de médio porte, pode haver a aplicação de grupo geradores para fornecer energia, quando não há alimentação do TSA, em subestações maiores, além da aplicação de um grupo gerador, o sistema pode ser conectado a rede de distribuição da concessionária de energia local.

De acordo com Soares (2017), o dimensionamento do TSA que integra a subestação deve ser realizado de acordo com a demanda energética das cargas CA e CC, há vários elementos dentro da subestação que são alimentados, assim os de corrente contínua são alimentados em 125V, comumente, já os de corrente alternada, 220V/380V.

Conforme pondera Mamede (2021), o retificador carregador é um equipamento destinado para utilização na parte de serviço auxiliar de uma subestação, o qual alimenta o banco de baterias, realizando a conversão entre corrente contínua e corrente alternada, em que ele deve alimentar, quando necessário, todas as cargas CA e CC.

De acordo com o Soares (2017), o banco de baterias deve ser projetado de modo a garantir que ele atue por um período mínimo de tempo, em vista da ausência de fontes de redundância para a alimentação da subestação, como TSA, gerador

motor, sendo a última porção para atender as necessidades da subestação durante o seu ciclo de emergência.

De acordo com Mamede (2021), o ciclo de emergência dentro de uma subestação diz respeito a condição falta de suprimento energético de fontes CA, inviabilizando o funcionamento da subestação, assim o banco de baterias atua de modo a fornecer energia em situação de emergência para as manobras de recomposição da subestação. Conforme pondera o Operador Nacional do Sistema Elétrico, a partir dos requisitos mínimos para o funcionamento de subestações e seus equipamentos,

Os serviços auxiliares de corrente contínua (CC) para alimentação dos sistemas de proteção, supervisão e controle devem ter dois conjuntos independentes de bancos de baterias com retificadores, alimentando cargas independentes, e cada conjunto deve ser dimensionado para suprir toda a carga prevista em regime contínuo (ONS, 2021, p. 22).

A atuação do banco de baterias é destinada para eventos de ausência de fontes de CA, alimentando os equipamentos da subestação de modo emergencial, para que manobras como abertura e fechamento de disjuntores, sinalização, dentre outros sejam realizadas, em que o período de suprimento energético das baterias deve respeitar um período mínimo. De acordo com o Operador Nacional do Sistema Elétrico, a partir dos requisitos mínimos para o funcionamento de subestações e seus equipamentos, estabelece que,

Em caso de falta de alimentação em CA, os bancos de baterias devem ter autonomia para realizar as manobras de recomposição da subestação. Cada conjunto bateria-retificador deve atender toda a carga prevista para regime contínuo pelo período mínimo de 5 (cinco) horas (ONS, 2021, p. 22).

É de suma relevância a atuação do banco de baterias, visto que é esse componente que suprir a demanda energética da subestação em situações emergenciais, conforme pondera Soares (2017).

### **3. CASO DE ESTUDO: VÃO DE ENTRADA DA LINHA DE TRANSMISSÃO TRINDADE-FIRMINÓPOLIS**

Ter uma área com boas dimensões de tamanho é importante para instalar uma usina fotovoltaica por algumas razões, dado que uma área maior oferece um espaço adequado para instalar um maior número de painéis solares, permitindo maior capacidade de geração de energia da usina fotovoltaica, em caso de expansão da usina, isso resulta em uma produção de energia mais significativa e maior retorno sobre o investimento.

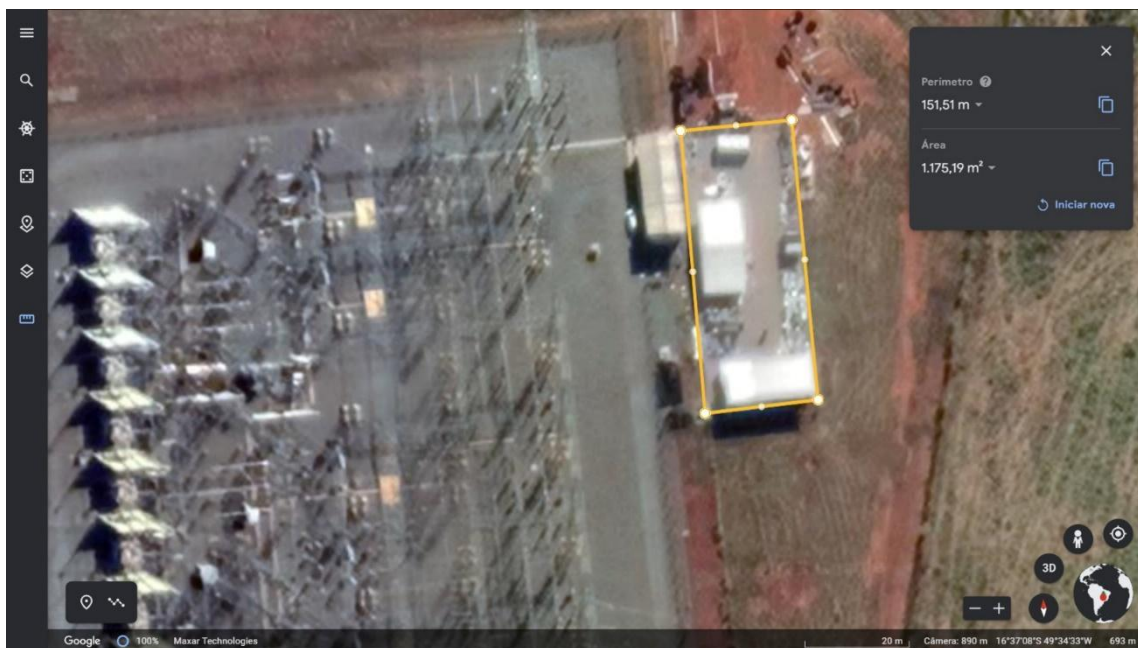
A área em que vai ser implementado o sistema fotovoltaico é importante pois permite uma distribuição mais eficiente dos painéis solares, tendo um espaço maior para a otimização do layout dos painéis, maior capacidade de evitar sombreamentos, um layout bem projetado pode facilitar a manutenção e o acesso aos painéis solares.

Assim, perante a proposta de projeto de uma usina fotovoltaica com armazenamento de energia direcionada à subestação Trindade de 1600 MVA e com uma tensão de operação de 500/230-13,8kV, especificamente a uma das linhas de 230 kV que parte da SE Trindade em direção à SE Firminópolis, na Cidade de Firminópolis - GO. A SE Trindade é operada pela empresa Goiás Transmissão e a subestação Firminópolis, pela empresa EDP.

Para o estudo, foram utilizadas ferramentas on-line como o Google Maps e a página oficial (web) do Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (CRESESB).

Para obter uma visão do local onde foi instalada a subestação, tal qual a área em que será instalado o sistema fotovoltaico, foi utilizado o Google Maps, em que, através de imagens, foi possível especificar o local onde será uma área disponível na casa de comando, com 152 m lineares de perímetro e 1.775 m<sup>2</sup> de área, marcada em amarelo, como demonstra a Figura 9, apresentada a seguir.

Figura 9: Imagem aérea do local de instalação do sistema fotovoltaico

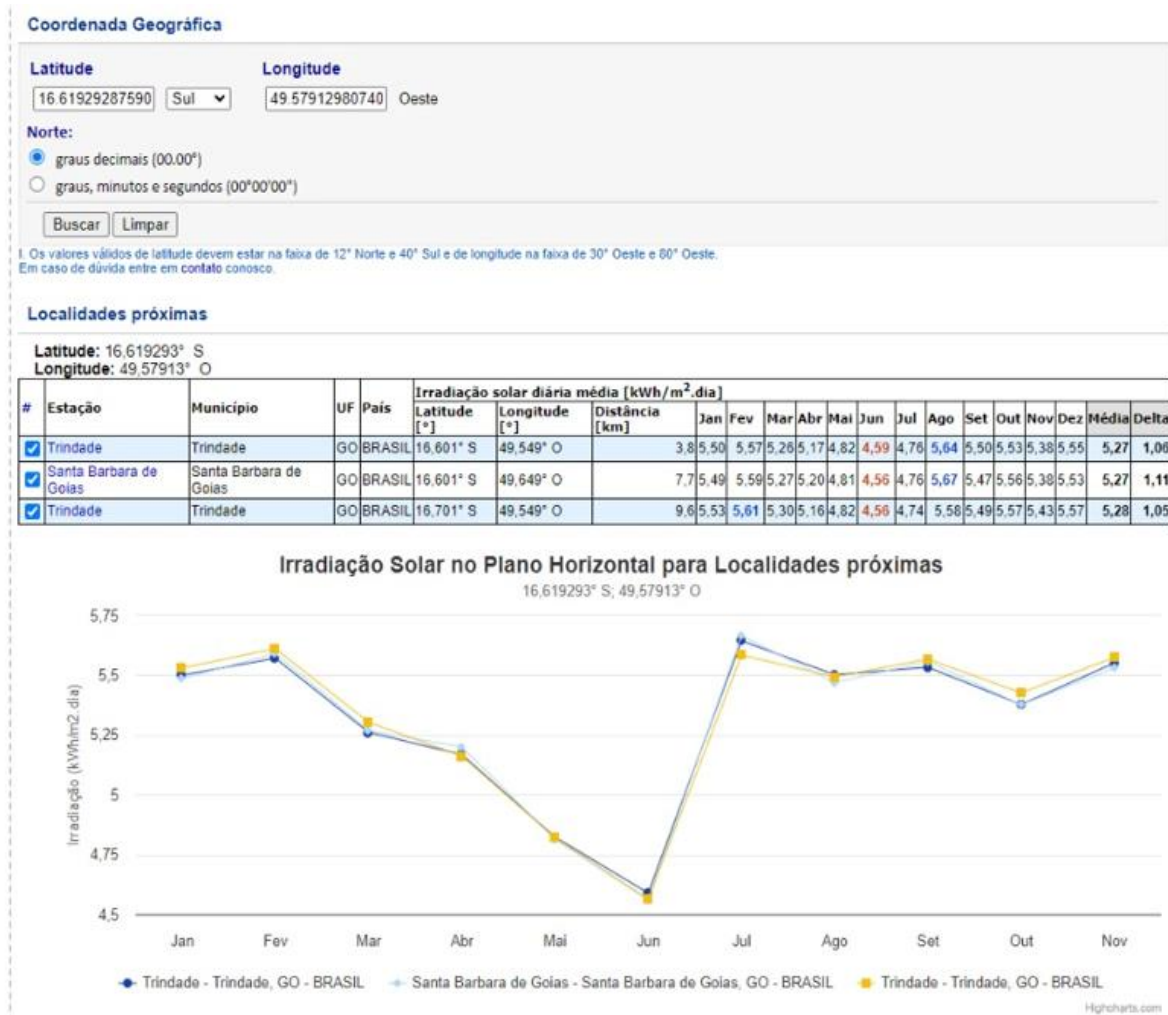


Fonte: Google Maps (2023)

Segundo estimativa, dos 1.775 m<sup>2</sup> disponíveis para construção da usina fotovoltaica, serão necessários cerca de 600 m<sup>2</sup> para construção da UFV, mostrando que há espaço suficiente para a construção. Outro fator relevante, como demonstrado, a orientação e a inclinação dos painéis solares têm um impacto significativo na quantidade de energia gerada, a área de instalação deve ser projetada de maneira a otimizar a exposição dos painéis solares à luz solar direta

A principal fonte de energia para as usinas fotovoltaicas é a luz solar, portanto, é essencial que a área escolhida receba uma quantidade adequada de radiação solar durante o ano, regiões com altos níveis de irradiação solar são mais propícias para a instalação de usinas fotovoltaicas, tendo uma melhor geração anual. Assim, para obter os dados de irradiação no local da subestação, foi utilizado o Website CRESESB, em que a partir das coordenadas geográficas, o site faz uma projeção da irradiação naquele local, com base em um histórico de incidência em anos, décadas passadas, a partir dessa projeção foi possível estabelecer uma estimativa da geração do sistema fotovoltaico. Portanto, foi mensurada a radiação solar a partir das coordenadas geográficas do local escolhido, as Figuras 10 e 11 demonstram a irradiação do local.

Figura 10: Irradiação do local de instalação



Fonte: CRESESB (2023)

Figura 11: Comparação de irradiação em locais próximos.

**Cálculo no Plano Inclinado**

**Estação:** Trindade  
**Município:** Trindade , GO - BRASIL  
**Latitude:** 16.601° S  
**Longitude:** 49.549° O  
**Distância do ponto de ref. ( 16,619293° S; 49,57913° O ):** 3,8 km

#	Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [kWh/m <sup>2</sup> .dia]												Média	Delta
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez		
<input checked="" type="checkbox"/>	Piano Horizontal	0° N	5,50	5,57	5,26	5,17	4,82	4,59	4,76	5,64	5,50	5,53	5,38	5,55	5,27	1,06
<input checked="" type="checkbox"/>	Ângulo igual a latitude	17° N	5,06	5,33	5,32	5,62	5,62	5,55	5,67	6,37	5,72	5,39	5,00	5,05	5,47	1,37
<input checked="" type="checkbox"/>	Maior média anual	18° N	5,03	5,31	5,31	5,63	5,65	5,59	5,71	6,40	5,73	5,37	4,97	5,01	5,48	1,43
<input checked="" type="checkbox"/>	Maior mínimo mensal	10° N	5,28	5,47	5,34	5,48	5,33	5,19	5,34	6,12	5,68	5,49	5,19	5,29	5,43	,93

**Estação:** Santa Barbara de Goias  
**Município:** Santa Barbara de Goias , GO - BRASIL  
**Latitude:** 16.601° S  
**Longitude:** 49.549° O  
**Distância do ponto de ref. ( 16,619293° S; 49,57913° O ):** 7,7 km

#	Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [kWh/m <sup>2</sup> .dia]												Média	Delta
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez		
<input checked="" type="checkbox"/>	Piano Horizontal	0° N	5,49	5,59	5,27	5,20	4,81	4,56	4,76	5,67	5,47	5,56	5,38	5,53	5,27	1,11
<input checked="" type="checkbox"/>	Ângulo igual a latitude	17° N	5,05	5,35	5,33	5,65	5,61	5,50	5,67	6,40	5,69	5,41	5,00	5,03	5,47	1,40
<input checked="" type="checkbox"/>	Maior média anual	18° N	5,01	5,33	5,32	5,67	5,64	5,55	5,71	6,43	5,69	5,39	4,97	5,00	5,48	1,46
<input checked="" type="checkbox"/>	Maior mínimo mensal	11° N	5,24	5,47	5,34	5,54	5,37	5,21	5,39	6,19	5,65	5,50	5,17	5,24	5,44	1,02

**Estação:** Trindade  
**Município:** Trindade , GO - BRASIL  
**Latitude:** 16.701° S  
**Longitude:** 49.549° O  
**Distância do ponto de ref. ( 16,619293° S; 49,57913° O ):** 9,6 km

#	Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [kWh/m <sup>2</sup> .dia]												Média	Delta
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez		
<input checked="" type="checkbox"/>	Piano Horizontal	0° N	5,53	5,61	5,30	5,16	4,82	4,56	4,74	5,58	5,49	5,57	5,43	5,57	5,28	1,05
<input checked="" type="checkbox"/>	Ângulo igual a latitude	17° N	5,09	5,37	5,36	5,61	5,61	5,51	5,65	6,30	5,71	5,42	5,04	5,07	5,48	1,26
<input checked="" type="checkbox"/>	Maior média anual	18° N	5,05	5,34	5,35	5,62	5,65	5,56	5,69	6,33	5,72	5,40	5,01	5,03	5,48	1,32
<input checked="" type="checkbox"/>	Maior mínimo mensal	11° N	5,26	5,49	5,38	5,49	5,37	5,22	5,37	6,09	5,68	5,51	5,21	5,28	5,45	,88

Fonte: CRESESB (2023)

Outros pontos importantes estão relacionados ao sombreamento, sendo que esse fato se refere a condição em que partes ou todo o painel solar é afetado pela sombra de objetos próximos, como árvores, edifícios ou outras estruturas, ele também pode ocorrer devido a fatores temporários, como nuvens, neve ou folhas que cobrem os painéis, interferindo negativamente no desempenho e na eficiência do sistema fotovoltaico (MARIANO, 2022).

Quando uma parte de um painel solar é sombreada, a produção de energia do painel é afetada, visto que os módulos fotovoltaicos são compostos por células solares conectadas em série ou em paralelo para formar uma matriz, se uma ou mais células solares forem sombreadas, elas podem se tornar um gargalo para a produção de energia de todo o painel (ANDRADE, 2022).

O sombreamento em um único painel pode levar o mesmo efeito nos painéis conectados em série, uma vez que quando um painel é sombreado, sua tensão de saída diminui, o que pode levar a uma queda na tensão em toda a cadeia de painéis

conectados em série. Isso resulta em uma diminuição da produção de energia de todos os painéis afetados pelo sombreamento (ANDRADE, 2022).

Em vista da funcionalidade das subestações é imprescindível que o seu funcionamento seja constante e interrupto perante a sua função no sistema elétrico, dado que qualquer evento que inviabilize o funcionamento da subestação pode provocar a ausência de suprimento energético em determinadas regiões.

Devido a importância citada, muitas subestações contam com elementos de redundância, que garantem o seu funcionamento, mesmo que em situações de manutenção ou outros eventos, mas em alguns momentos, mesmo com as redundâncias, pode haver situações que provoca a parada da subestação.

Para o funcionamento da subestação, uma série de equipamentos, sinalizações, comandos, dentre outros, devem ser alimentados, visto que essa porção é responsabilidade do serviço auxiliar, o qual conta como principal elemento o transformador de serviço auxiliar, sendo esse o responsável por reduzir a tensão do barramento de menor tensão para níveis de tensão em corrente alternada utilizada pela subestação em cargas CA, o mesmo processo é realizado para o suprimento de cargas CC, através da conversão da corrente CA em CC pelo retificador, alimentando também o banco de baterias.

Em situações que não há suprimento energético proveniente do TSA, grupo gerador ou da concessionária, o banco de baterias utiliza a energia armazenada para alimentar as cargas CC, realizando as manobras necessárias para a recomposição da subestação.

Assim, mediante as recomendações dos órgãos que controlam o sistema elétrico do Brasil, o banco de baterias, mediante a um ciclo de emergência, deve oferecer energia durante um intervalo de 5 horas no mínimo.

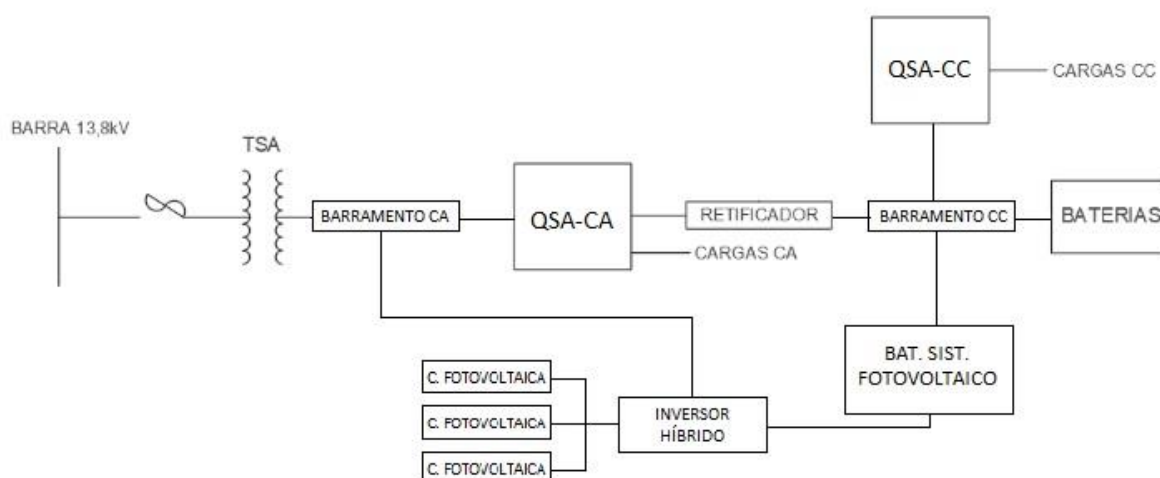
Tal proposição, conforme apresentado no referencial do estudo, se baseia a partir da relevância que os sistemas fotovoltaicos possuem, dado que a introdução de um elemento dessa tipologia, destinado a recarregar o banco de baterias na subestação, representa ganhos, sobretudo em situações de ciclos de emergência, em condições ambientais que permite a geração de energia por parte dos módulos fotovoltaicos, podendo aumentar a duração de fornecimento de carga durante um ciclo de emergência, já que haverá produção energética por parte dos módulos fotovoltaicos. Além desse fato, o projeto dimensionado utiliza a metodologia híbrida,

ou seja, conectado com a rede e o sistema de baterias, o que permite também que o excedente produzido seja injetado na rede da concessionária.

### 3.1 DIMENSIONAMENTO DO BANCO DE BATERIAS

A seguir na Figura 12, apresenta um esquema simples de um diagrama que ilustra o serviço auxiliar de uma subestação (já mostrado anteriormente) em conjunto a um sistema fotovoltaico com armazenamento de energia em baterias. Utilizando um inversor híbrido, o sistema trabalha on-grid com o inversor funcionando como uma fonte injetando corrente no barramento CA quando o sistema fotovoltaico está ativo. Já quando este não está disponível, ele funciona como uma fonte de tensão proveniente das baterias que foram carregadas pelo barramento CC.

Figura 12: Diagrama simplificado de um serviço auxiliar com um sistema fotovoltaico com armazenamento de energia em baterias



A metodologia de dimensionamento apresentada neste capítulo se refere a um sistema adicional de um banco de baterias destinado a uma subestação em operação. Desta forma, todos os sistemas sugeridos neste documento respondem a equipamentos adicionais àqueles já disponíveis na subestação.

Este estudo baseia-se na metodologia proposta pelo Prof. Enes Gonçalves Marra que se baseou no livro de subestações de alta tensões de João Mamede Filho (MAMEDE FILHO, 2021). A metodologia apresentada pelo Prof. Enes Gonçalves

Marra compreende o conjunto de atividades vinculadas à execução do projeto de pesquisa e desenvolvimento (P&D) nº PD-07351-0001/2022 intitulado “Sistema de armazenamento de energia em baterias íon-lítio com geração fotovoltaica associada para black start e suprimento de cargas essenciais dos serviços auxiliares de subestações”, em vigência e devidamente cadastrado junto à ANEEL (MARRA, 2023). Na condição de co-orientador deste trabalho, o Prof. Enes sugeriu aos autores deste documento utilizassem a mesma metodologia.

O sistema de corrente contínua da subestação foi dimensionado para conter dois conjuntos bateria-carregador, com tensão nominal 125 Vcc, com capacidade individual para atender a totalidade das cargas, visto que cada conjunto bateria-carregador alimenta uma barra de operação do Quadro de Corrente Contínua da Subestação – QDC1 e QDC2.

Desse modo, para realizar o dimensionamento, alguns critérios foram estabelecidos, em que a partir deles dimensionou-se o sistema de banco de baterias a ser utilizado, em que serão utilizadas baterias do tipo chumbo-ácido seladas, cada uma projetada para atender um ciclo de emergência de 5 horas (300 minutos). Além disso, os carregadores serão capazes de fornecer simultaneamente a carga total do sistema de 125 Vcc durante a operação normal e também carregar a bateria em regime de flutuação.

Durante o ciclo de emergência, a tensão final de descarga por elemento será mantida em 1,75 V, enquanto a tensão média por elemento será de 2,00 V. Para garantir a flutuação adequada, a tensão por elemento será ajustada para 2,23 V. Na conversão das cargas em Amperes, a tensão média de 121,25 V será considerada no cálculo

Assim tem-se que:

$$I = \frac{W}{V} = \frac{W}{121,25} \approx 0,0082W \text{ em amperes}$$

Onde W é o valor da carga em Watts

### 3.1.1 Número de elementos da bateria a ser determinado

Para o cálculo do número de elementos da bateria é preciso estabelecer através da tensão máxima, por intermédio da tensão de flutuação da bateria (1), e em relação tensão mínima, por intermédio da tensão final (2), em que o número de elementos será dado pelo o valor médio no intervalo obtido pela tensão de flutuação e tensão final.

$$V_{max} = n_1 \times V_{fl} \quad (1)$$

$$V_{min} = n_1 \times V_{fl} \quad (2)$$

De acordo com o cálculo do número de elementos aplicados, conforme o exemplo escolhido para o estudo, tem-se que a tensão final da bateria é 105 V e com a tensão mínima de 1,75V por elemento, obtém um resultado de 60 elementos para bateria, já considerando a máxima tensão admissível no sistema 137,5V (1,10 x 125V) e a tensão em regime de flutuação por elemento de 2,23V, obtém o resultado de 61 elementos para a bateria. Como a escolha para o número de elementos se baseia no resultado médio dentro do intervalo obtido e visando a facilidade de instalação das baterias no armário, utilizou-se  $n = 60$  elementos.

### 3.1.2 Definição da atuação das cargas durante o ciclo de emergência

Para avaliar a atuação do ciclo de emergência, foram divididos em cinco ciclos com diferentes operações:

- Carga permanente antes da saída do carregador (C1).
- A condição mais severa ocorre quando há perda de alimentação do sistema de 13,8kV devido à operação da proteção da barra de 230 kV com a abertura de 7 disjuntores de 230 kV (C2).
- No início do ciclo, a iluminação de emergência entra em operação (C3).
- Também no início do ciclo, há uma carga momentânea associada à partida dos registradores de perturbações (C4).

- No final do ciclo, considera-se o fechamento de 1 (um) disjuntor de 230 kV (C5).

### 3.1.3 Determinação das cargas durante o ciclo de emergência

De acordo com os ciclos definidos anteriormente, conforme a atuação dos equipamentos, foi estabelecido uma análise da corrente requisitada pelo sistema, em relação a cada um dos equipamentos com atuação presente em cada um dos ciclos definidos,

$$P_{min} = V_{med} \times I_{cargas\ do\ ciclo} \quad (3)$$

Assim, as cargas presentes no ciclo (C1) são apresentadas a seguir:

- **Carga C1:**

- Painel de proteção - 16 x 120 W = 1920 W
- Painel de Controle - 16 x 120 W = 1920W
- Painel de Serviços Auxiliares - 650 W
- Painel de Sistema de Supervisão e Controle - 1000 W
- Registrador de Perturbações - 235 W
- Comutadores transformador 3 conjuntos. 3 x 150 W = 450W
- Equipamento de teleproteção Carrier. 2x 100 W = 200W

Total C1: 6375 Watts

Aplicando a formula (3) foi possível verificar que a intensidade de corrente requisitada pelo sistema, durante o ciclo (C1) é igual a 52 Amperes, em que o processo semelhante foi aplicado para os outros ciclos (C2), (C3), (C4) e (C5), com os resultados apresentados a seguir:

- **Carga C2**

- Circuitos de disparos dos disjuntores 230 kV - 7 x 1320 W = 9240W

Total C2: 9240 Watts

Aplicando a formula (3) foi possível verificar que a intensidade de corrente requisitada pelo sistema, durante o ciclo (C2) é igual a 76 Amperes.

- Carga C3

A. Iluminação de emergência Casa de Controle -  $8 \times 60 \text{ W} = 480 \text{ W}$

B. Iluminação de emergência guarita -  $1 \times 60 \text{ W} = 60 \text{ W}$

C. Iluminação de emergência Casa do Diesel -  $1 \times 60 \text{ W} = 60 \text{ W}$

Total C3: 600 Watts

Aplicando a formula (3) foi possível verificar que a intensidade de corrente requisitada pelo sistema, durante o ciclo (C3) é igual a 5 Amperes.

- Carga C4

A. Partida registradores -  $1 \times 150 \text{ W} = 150 \text{ W}$

Total C4: 150 Watts

Aplicando a formula (3) foi possível verificar que a intensidade de corrente requisitada pelo sistema, durante o ciclo (C4) é igual a 1,3 Amperes.

- Carga C5

A. Circuito de fechamento (um) disjuntor 230 kV -  $1 \times 1340 \text{ W} = 1340 \text{ W}$

Total C5: 1340 Watts

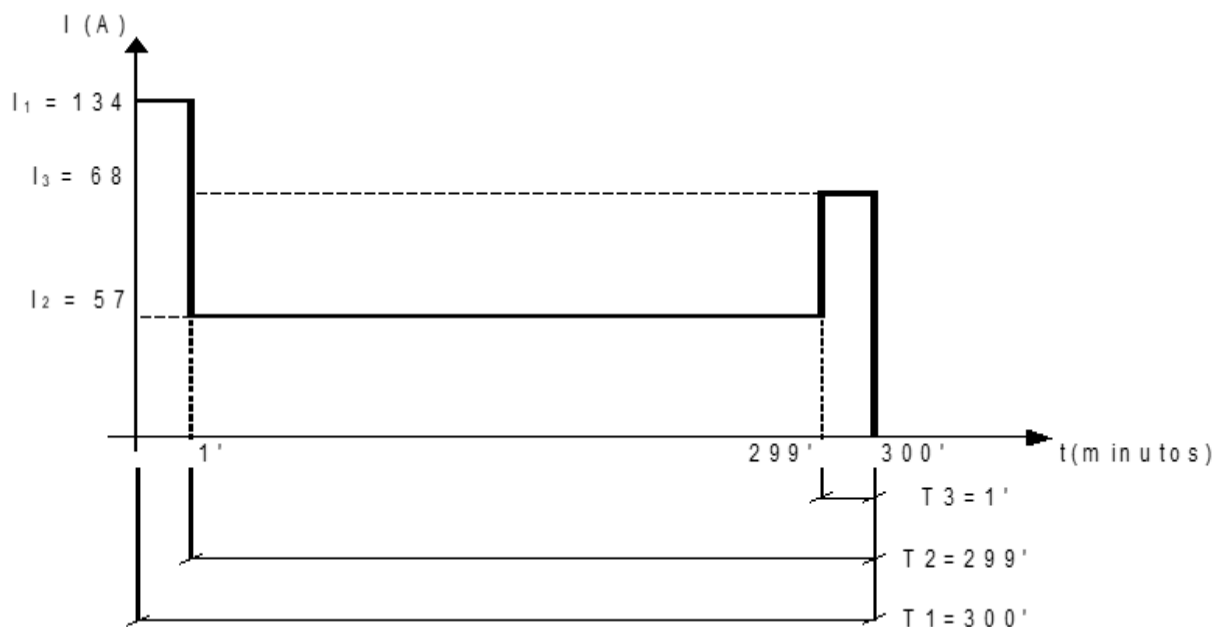
Aplicando a formula (3) foi possível verificar que a intensidade de corrente requisitada pelo sistema, durante o ciclo (C5) é igual a 11 Amperes.

De acordo com a atuação do ciclo de emergência, para que ele possa ser separado em períodos, utilizou-se a classificação de cargas momentâneas, permanentes e de tempo limitado. Segundo Silva (2022), as cargas permanentes são aquelas que durante todo o período do ciclo de emergência estão ativadas, assim a sua atuação se dá forma constante durante esse período, já as cargas temporárias são aquelas em que o seu tempo de atuação é limitado por um período de tempo durante o ciclo de emergência.

Assim, o ciclo de emergência foi separado em três fases, conforme apresentado pelo Gráfico 1, em que a primeira fase (T1) diz respeito a atuação de

todos os elementos necessários para o estabelecimento do ciclo de emergência, atuação dos disparos protetivos, como abertura dos disjuntores, cargas permanentes de 125 Vcc e iluminação de emergência, sendo que esse período dura 1 minuto.

Gráfico 1: Fases de atuação das cargas



Fonte: Produzido pelo autor

Já na segunda fase, a atuação se dará apenas pelas cargas permanentes, que atuarão de forma contínua durante todo o ciclo de emergência, tendo um funcionamento isolado, sendo que esse período corresponde a 298 minutos, sendo essa a fase (T2).

No terceiro e último período (T3), a aplicação é da fase de recuperação da subestação, que compreende ao reestabelecimento do serviço auxiliar CA, logo ela diz respeito ao fechamento de disjuntores, que antes estavam abertos para a proteção, cargas permanentes de 125 Vcc e a iluminação de emergência, sendo que essa fase tem a duração de 1 minuto, conforme é apresentado no Gráfico 1

### 3.1.4 Cálculo da capacidade das baterias

Para o dimensionamento da capacidade das baterias foi utilizado o método de Hoxie, sendo esse um método que parte de uma análise do tempo de descarga,

separando-as em períodos, em que cada período possui uma corrente de descarga, diferente (NETO, 2006), dado que a partir da proposição descrita, formula-se

$$C = (I_1)K1 + (I_2 - I_1)K2 + (I_3 - I_2)K3 \dots + (I_n - I_{n-1})Kn \quad (4)$$

Deste modo tem-se que K é uma constante, que fornece o inverso da amperagem da placa positiva do elemento considerado, para um tempo determinado a uma tensão final pré-estabelecida (conforme curvas da IEEE Std 485).

Aplicando a formula (4) foi possível verificar, que a partir dos tempos analisados, T1; T2 e T3, conforme apresentado pelo Gráfico 1, o período T1 possui 300 minutos, logo uma constante K1 de 5,4, o período T2 possui 299 minutos, logo uma constante K2 de 5,3, já o período T1 possui 1 minuto, logo uma constante K3 de 0,9, a partir da aplicação da formula do método de Hoxie, foi possível um resultado de 325 Ah, de acordo com o expressado a seguir.

$$Cb = (I1)K1 + (I2 - I1)K2 + (I3 - I2)K3$$

$$Cb = 134 \times 5,4 + (57 - 134) \times 5,3 + (68 - 57) \times 0,9$$

$$Cb = 723,6 - 408,1 + 9,9$$

$$Cb = 325 \text{ Ah}$$

Sendo assim, considerando um fator de envelhecimento de 25%, fator de segurança 10% e um fator de temperatura para 10° C de 4%, foi obtido um resultado de 465Ah, logo, para cobrir esse valor, foi escolhida a utilização de uma bateria de 500 Ah, a qual tem a previsão de duração de 10 horas.

### 3.1.5 Cálculo do carregador

Para estabelecer qual carregador será utilizado no sistema, foi utilizada a seguinte formula:

$$I_C = I_P + 1,1 \times C_{BT}/TC \quad (5)$$

onde:

$I_C$  = Capacidade do carregador

$I_p$  = Corrente permanente

$C_{BT}$  = Capacidade da bateria

$TC$  = Tempo de carga, considerado 10 horas

Desse modo, aplicando a formula (5), tem-se o seguinte resultado.

$$I_c = 57 + 1,10 \times 500/10$$

$$I_c = 112 \text{ A}$$

Logo, para o carregador vai ser utilizado um carregador padronizado de 125 A.

### 3.2 DIMENSIONAMENTO SISTEMA FOTOVOLTAICO

De acordo com o proposto pelo estudo, a alimentação das cargas CC da subestação é fornecida através da energia produzida pelo sistema fotovoltaico, assim, para esse dimensionamento utilizou, como base para cálculos, a energia gasta dentro de um ciclo de emergência.

Tem-se em mente, que perante a dificuldade em estimar o um histórico de consumo energético da estação, visto que a sua energização é recente, o consumo energético do ciclo de emergência pode ser utilizado como estimativa base, assim a quantidade de módulos fotovoltaicos aplicados ao sistema foi com base a atuação dos equipamentos durante o ciclo de emergência.

#### 3.2.1 Dimensionamento do inversor – dimensionado para potência

Seja a corrente de cada retificador/carregador de baterias  $I_{CC} = 125 \text{ A}$  e a tensão nominal dos retificadores em corrente contínua é  $V_{CC} = 125 \text{ V}$ . A potência a ser suprida aos dois retificadores é  $P_{CCTot} = 2 \times 125 \text{ V} \times 125 \text{ A} = 31250 \text{ W}$ .

Considerando-se a perdas na instalação, perdas de chaveamento, perdas térmicas e degradação, utiliza-se rendimento de 90% ( $\eta = 0,9$ ), logo a potência nominal trifásica em corrente alternada (CA) do inversor é

$$P_{CA3\phi} = \frac{31250}{0,9} \approx 34722W \approx 35kW$$

### 3.2.2 Dimensionamento do banco de baterias da fonte reserva

Seja a potência a ser suprida aos sistemas auxiliares  $P_{CA3\phi} \approx 34722W$ . Considerando-se um fator de degradação com temperatura de 10% e um fator de segurança de 5%, a potência do banco de baterias da fonte reserva será

$$P_{BAT} = 34722 \times 1,10 \times 1,05 = 40103,91W \approx 40kW$$

Considerando-se a potência do banco de baterias, a potência do inversor será redimensionada, adotando-se o maior valor entre a potência para atender as cargas auxiliares e para atender o banco de baterias, assim temos que o  $P_{CA3\phi} = 40W$ , sendo essa a nova potência para o inversor.

A energia do banco de baterias dependerá do tempo de sustentação pretendido pelo sistema de reserva. Realizando-se o dimensionamento a partir do limite orçamentário disponível de R\$ 225.000,00 para investimento no banco de baterias, considerando-se um custo médio de R\$ 1.500/kWh para baterias de Íon-Li do tipo LiFeO4 (LFP ou LiFe), têm-se a capacidade de armazenamento do banco de baterias.

$$EA_{BAT} \approx 150 kWh$$

A partir do monitoramento das cargas auxiliares instaladas em subestação pertencente ao vão de entrada da linha de transmissão Trindade-Firminópolis durante 18 dias com medidor de qualidade de potência e energia (Fluke 435-II), será considerada uma potência média de 6,25 kW para alimentação das cargas auxiliares. Embora a demanda máxima das cargas auxiliares seja de 31,25 kW, a potência média de 7 kW é um critério conservador, tendo-se em conta que a média das potências ativas máximas registradas foi de 6,45 kW, e que a média das potências aparentes máximas registradas foi de 9,5 kVA.

Para efeito de armazenamento de energia, a potência ativa deve ser considerada como o parâmetro de potência que influencia o ciclo de carga e descarga do banco de baterias. Desta forma, o tempo de descarga (TD) será:

$$T_D = \frac{150 \text{ kWh}}{7 \text{ kW}} \approx 21 \text{ h}$$

Tempo de descarga aproximado de 21 horas. Destaca-se que após decorrido o tempo de descarga, ainda haverá o banco de baterias de chumbo ácido da subestação com capacidade de sustentação de 10 horas.

Adotando-se a tensão nominal contínua típica para o banco de baterias do sistema de reserva  $V_{CC} = 600 \text{ V}$ , a capacidade da corrente do banco de baterias deve ser de

$$C_{BAT} = \frac{150.000 \text{ VAh}}{600 \text{ V}} = 250 \text{ Ah}$$

A taxa de descarga da bateria deve atender a corrente prevista para a descarga ( $I_D$ ) com potência de 40 kW. Para descarga com potência de 40 kW, então,

$$I_D = \frac{40 \text{ KWh}}{600 \text{ V}} = 67 \text{ A}$$

A partir da corrente de descarga, determina-se o valor mínimo da taxa CR do banco de baterias (C-Rate ou Charge Rate) logo,

$$CR = \frac{67}{250} \approx 0,27$$

Adotando-se tempo de carregamento (TC) supondo-se uma janela de disponibilidade solar de 4 horas, tem-se a corrente média de carregamento ( $I_C$ ),

$$T_C = \frac{C_{BAT}}{I_C}; I_C = \frac{250}{4} = 62,5 \text{ A}$$

A taxa de carga  $CR = \frac{I_{carga}}{CAP} = \frac{62,5}{250} = 0,25$  com corrente de carregamento de 62,5 A e tempo de carregamento de 4 horas. Considerando que o processo de carregamento é mais crítico que a descarga, pode-se adotar a especificação 0.25C ou C/4 como a taxa CR para o bando de baterias.

Por outro lado, baterias com taxa CR de 0.5C ou C/2 são amplamente disponíveis no mercado com preços competitivos, deste modo recomenda-se que o banco de baterias tenha especificação mínima CR de 0.5C ou C/2.

### 3.2.3 Dimensionamento do gerador fotovoltaico

O Gerador Fotovoltaico deve ser dimensionado de forma a suprir as cargas auxiliares (7 kW médios) e carregar a bateria (150 kWh em 4 horas) ao longo do período solar de um dia.

Considerando-se de forma conservadora, que o rendimento global (ou taxa de desempenho) do gerador fotovoltaico é de 70% ( $PR = TD = 0,70$ ), período de sol pleno médio anual para a cidade de trindade igual 5,4 horas para superfície inclinada na latitude local de 16°, segundo o Atlas Brasileiro de Energia Solar do INPE, tem-se a seguinte potência nominal para o gerador fotovoltaico:

$$E_{dia} = PR \times H_{SP} \times P_{FV}$$

$$(7 \text{ kW} \times 10h + 37,5 \text{ kW} \times 4h) = 0,70 \times 5,4 \times P_{FV}$$

$$P_{FV} = \frac{220 \text{ kWh}}{0,70 \times 5,4} \approx 58,2 \text{ kW}$$

A potência do gerador fotovoltaico para suprir 220 kWh por dia será então adotada como  $P_{FV} = 60 \text{ kW}$ . A área ocupa pelo gerador fotovoltaico seria de aproximadamente 600 m<sup>2</sup>.

Recomenda-se a utilização de módulos monocristalinos, com tecnologias de meia célula, bifaciais e potência nominal de 650 W. Adotando-se um módulo fotovoltaico típico com tensão de máxima potência  $V_{MP} = 45,5 \text{ V}$  e corrente de máxima potência  $I_{MP} = 13,2 \text{ A}$  e considerando que uma série (string) fotovoltaica deve ter tensão mínima de 600 V em corrente contínua e cada série fotovoltaica deve ser

formada por 14 módulos, resultando em máxima potência STC de 9100 kW por série fotovoltaica (string).

A potência fotovoltaica do gerador é de 60 kW, então, serão necessárias 7 séries fotovoltaicas em paralelo para atingir esta potência, totalizando 98 módulos, resultando em uma potência instalada de todo o arranjo igual a 63,7 kW de máxima potência CC (aproximadamente 63,7 kWp).

Considerando-se custo médio de R\$ 3.500,00/kWp no lado CC, então, o custo do gerador fotovoltaico deve ser em torno de R\$ 223.000,00. Tendo-se o custo do banco de baterias mais gerador fotovoltaico, o custo parcial do sistema, sem o inversor e demais componentes e dispositivos da instalação, tem previsão em torno de R\$ 450 mil.

### 3.3 MODOS DE OPERAÇÃO DE OPERAÇÃO DO SISTEMA

Os sistemas fotovoltaicos, que utilizam painéis solares para a conversão direta da luz solar em eletricidade, podem operar em diferentes modos, dependendo das necessidades específicas e das condições do ambiente. Os modos de operação desempenham um papel fundamental no desempenho e na eficiência desses sistemas.

Em primeiro lugar, é importante destacar os dois modos de operação mais comuns em sistemas fotovoltaicos. O primeiro modo é o de alimentação direta, onde a energia gerada pelos painéis solares é utilizada imediatamente para suprir a carga elétrica do local, seja residencial, comercial ou industrial. Nesse modo, a energia solar é aproveitada de forma imediata, reduzindo a dependência da rede elétrica convencional e contribuindo para a sustentabilidade energética. O segundo modo de operação é o de armazenamento, em que a energia gerada pelos painéis fotovoltaicos é direcionada para um banco de baterias, que acumula o excedente de energia para uso posterior. Esse modo permite o armazenamento e o uso da energia solar durante períodos de baixa radiação solar ou à noite, garantindo a continuidade do suprimento elétrico mesmo quando a geração solar é insuficiente.

Os modos de operação mais utilizados em sistemas fotovoltaicos variam de acordo com a finalidade de sua implementação. Em instalações residenciais e

comerciais, o modo de alimentação direta é amplamente utilizado, pois permite o uso imediato da energia solar gerada, reduzindo significativamente o consumo da rede elétrica e, conseqüentemente, os custos com eletricidade. Além disso, o excedente de energia gerado durante o dia pode ser injetado na rede elétrica, sendo compensado posteriormente através de créditos energéticos, como ocorre em sistemas de compensação de energia (*net metering*). (EUM, 2021)

Já em aplicações rurais, isoladas ou em locais de difícil acesso à rede elétrica, o modo de operação com armazenamento em baterias é altamente recomendado. Essa opção possibilita a utilização da energia solar armazenada durante a noite ou em períodos de baixa geração solar, garantindo a disponibilidade contínua de eletricidade. (EUM, 2021)

Na indústria, os sistemas fotovoltaicos são frequentemente empregados em conjunto com a rede elétrica para a otimização de custos e aprimoramento da eficiência energética. O sistema fotovoltaico preferencialmente carrega a bateria e, em seguida, a bateria é carregada pelo sistema fotovoltaico em conjunto com a rede elétrica (*power grid*) quando necessário. Ainda que este documento aborde um sistema isolado, é prevista a conexão do sistema fotovoltaico ao barramento CA de alimentação das cargas auxiliares em uma eventual indisponibilidade de outras fontes de energia (tais como, o terciário do transformador, o grupo motor gerador e outros).

Observando a sequência de prioridades com relação ao fornecimento contínuo de energia às cargas auxiliares, o sistema fotovoltaico aqui proposto corresponderá à terceira opção desta lista. As opções anteriores envolvem a utilização do terciário de um transformador, conexão com um ramal CA existente em linhas adicionais na região e, como quarta opção, o uso de um GMG (Grupo Motor Gerador). Dessa forma, o sistema fotovoltaico contribui para aumentar o tempo de autonomia do banco de baterias, reduzindo os custos operacionais e melhorando a eficiência energética da subestação. (EUM, 2021)

Tendo como base o estudo (EUM, 2021) onde foram conduzidos diversos experimentos com diferentes configurações de operação para identificar os modos mais adequados para o sistema de armazenamento, sendo esses modos o "Modo 1", a geração fotovoltaica excede a demanda das cargas auxiliares e carrega completamente as baterias. No "Modo 2", a geração atende tanto as cargas auxiliares quanto carrega as baterias. No "Modo 3", a geração é insuficiente, resultando no descarregamento das baterias para suprir as cargas. No "Modo 4", quando não há

geração fotovoltaica, as cargas são supridas inteiramente pelas baterias. O controle eficiente busca maximizar a utilização da energia solar, otimizando a operação e garantindo a alimentação das cargas em diferentes condições.

Os resultados dos experimentos revelaram que quando a energia do painel fotovoltaico é fornecida inicialmente para a carga, o carregamento ou descarregamento da bateria é determinado pela demanda da carga. No entanto, quando a energia do painel fotovoltaico é direcionada primeiro para carregar a bateria, a energia do painel fotovoltaico é redirecionada para a carga somente após a bateria estar completamente carregada. Além disso, quando a bateria é carregada exclusivamente pelo painel fotovoltaico, existe o risco de descarga total da bateria na ausência de energia solar. Entretanto, esse risco é evitado ao realizar o carregamento usando a rede elétrica.

Com base nas características de cada modo de operação, foi determinado o melhor modo que seria com a energia do painel fotovoltaico tendo prioridade para carregar a bateria, e posteriormente, a bateria é carregada tanto pelo painel fotovoltaico quanto pela rede elétrica. Primeiramente, ele garante a confiabilidade do fornecimento de energia, mesmo em situações de baixa geração solar, tornando o sistema mais seguro e resiliente. Além disso, oferece autonomia, permitindo que o sistema opere independentemente da disponibilidade de luz solar em tempo real. Este modo também atua como um sistema de backup, garantindo o fornecimento contínuo de energia em caso de falha na geração solar ou na rede elétrica convencional. Outra vantagem é a otimização do uso de energia, priorizando o consumo direto da geração solar e minimizando perdas. Por fim, pensando desta forma o modo é sustentável, reduzindo a dependência de fontes convencionais de energia e contribuindo para a preservação do meio ambiente.

#### 4. CONCLUSÃO

Este estudo ilustrou a importância das subestações dentro do sistema de energia nacional, sendo um elemento de grande relevância nas três porções básicas do sistema elétrico, que é na geração, transmissão e distribuição.

Neste contexto, a garantia de suprimento de energia aos serviços auxiliares de uma subestação, ou seja, a energia destinada à alimentação de cargas CC e CA da subestação, é de grande importância. Assim, este estudo propôs um sistema fotovoltaico com armazenamento de energia para a alimentação de cargas auxiliares dentro de uma subestação.

Perante aos objetivos a serem alcançados pelo estudo, os quais são, dimensionar o banco de baterias, dimensionar o gerador fotovoltaico, selecionar e dimensionar o inversor isolado e analisar os modos de operação do sistema, todos os escopos citados foram alcançados no decorrer do desenvolvimento do estudo.

Para a realização de trabalhos futuros, nota-se uma ausência de outros estudos nesse campo de implementação de sistemas fotovoltaicos para suprimento energético dos serviços auxiliares de uma subestação, assim, conclui-se ser relevante outros estudos práticos de aplicação desse sistema em outras subestações, com características diferentes da qual foi utilizada no trabalho.

A apresentação de dados da atuação do sistema proposto, tal qual a sua efetividade, em contexto prático, é uma importante porta para ser apresentada em trabalhos futuros, evidenciando de modo mais claro, o suporte que o sistema aplicado causa. Um estudo da viabilidade econômica, mais aprofundado, sobre os custos da aplicação do sistema se torna relevante para trabalhos futuros, evidenciando onde há retenção de gastos, o investimento feito para instalação do sistema, dentre outros.

Como principais contribuições deste trabalho, pode-se destacar: O incentivo à produção científica para as universidades pelos discentes durante o curso da graduação; o incentivo à pesquisa do tema e o desenvolvimento do projeto para mercados futuros, além de promover o uso de soluções renováveis em subestações de energia elétrica.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), **NBR 10899**: Energia solar fotovoltaica – Terminologia. Rio de Janeiro, 2013.

ABSOLAR. **Energia Solar Fotovoltaica no Brasil**: Infográfico Absolar. 2022. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/wp-content/uploads/2022/01/2022.01.11-Infografico-ABSOLAR-n%C2%B0-39.pdf>. Acesso em: 21 mai. de 2023.

ANDRADE, M. de F. **Análise do sombreamento entre painéis fotovoltaicos na cidade de Natal/RN**. Artigo científico (Bacharel em Engenharia Mecânica), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2022. Disponível em: [https://repositorio.ufrn.br/bitstream/123456789/48760/4/An%C3%A1liseSombreamentoEntrePain%C3%A9isFotovoltaicos\\_Andrade\\_26.07.2022.pdf](https://repositorio.ufrn.br/bitstream/123456789/48760/4/An%C3%A1liseSombreamentoEntrePain%C3%A9isFotovoltaicos_Andrade_26.07.2022.pdf). Acesso em: 21 mai. de 2023.

ALBUQUERQUE, A. A. T. de. **Sistema remoto de medição de irradiância solar para obtenção do desempenho global de sistemas fotovoltaicos**. Dissertação (Mestrado), Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2023. Disponível em: <https://repositorio.pucrs.br/dspace/bitstream/10923/25137/1/000505765-Texto%2Bcompleto-0.pdf>. Acesso em: 21 mai. de 2023.

AZAMBUJA, A. V. R. **Estudo e projeto de um sistema fotovoltaico para a casa do estudante UFGD**. Monografia (Bacharelado em Engenharia de Energia), Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufgd.edu.br/jspui/handle/prefix/5027>. Acesso em: 21 mai. de 2023.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Nacional de Energia 2050**. Brasília: Ministério de Minas e Energia/ Empresa de Pesquisa, 2020.

CAMPOS, L. F. G. de; ESTEVAM, G. P. A atuação das subestações no Sistema Elétrico de Potência. **Revista Esaleng**, vol. 9, n. 1, 2020. Disponível em: [https://unisaesiano.com.br/aracatuba/wp-content/uploads/2021/03/07\\_A-atuacao-das-subestacoes\\_130\\_141.pdf](https://unisaesiano.com.br/aracatuba/wp-content/uploads/2021/03/07_A-atuacao-das-subestacoes_130_141.pdf). Acesso em: 21 mai. de 2023.

COLARES, M. V. de R. **Estudo da geração de energia elétrica através dos sistemas fotovoltaicos off-grid**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos), Universidade Federal do Pará, Belém. Disponível em: [https://repositorio.ufpa.br/bitstream/2011/15140/1/Dissertacao\\_EstudoGeracaoEnergia.pdf](https://repositorio.ufpa.br/bitstream/2011/15140/1/Dissertacao_EstudoGeracaoEnergia.pdf). Acesso em: 23 de dezembro de 2022.

CORREA, P. C. **Projeto do sistema de propulsão de uma embarcação solar/eólica**. Monografia (Engenharia Mecânica), Universidade de Taubaté, Taubaté, 2019. Disponível em: <http://186.236.83.17:8080/jspui/bitstream/20.500.11874/4491/1/Pedro%20Conte%20Correa.pdf>. Acesso em: 23 de dezembro de 2022.

COSTA, S. C. S. C. et al. Modelo para estimativa da irradiância solar incidente sobre o módulo fotovoltaico inclinado utilizando dados de irradiância global horizontal. In: **IX Congresso Brasileiro de Energia Solar**, Florianópolis, maio, 2022. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/1087/1089>. Acesso em: 21 mai. de 2023.

DANTAS, S. G.; POMPERMAYER, F. M. **Viabilidade econômica de sistemas fotovoltaicos no Brasil e possíveis efeitos no setor elétrico**. Texto para discussão, Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. Brasília: Ipea, 2018. Disponível em: [http://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/8400/1/TD\\_2388.pdf](http://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/8400/1/TD_2388.pdf). Acesso em: 22 de dez. de 2022.

MARIANO, J. D. Energia solar fotovoltaica: princípios fundamentais. Ponta Grossa - PR: Atena, 2022.

ELGAMAL, G. N. G.; DEMAJOROVIC, J. As barreiras e perspectivas para geração de energia elétrica por painéis solares fotovoltaicos na matriz energética brasileira. **Rev. Gest. Amb. e Sust.**, vol.9, n. 1, p. 1-28, 2020. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/341420582\\_As\\_barreiras\\_e\\_perspectivas\\_para\\_geracao\\_de\\_energia\\_eletrica\\_por\\_paineis\\_solares\\_fotovoltaicos\\_na\\_matriz\\_energetica\\_brasileira](https://www.researchgate.net/publication/341420582_As_barreiras_e_perspectivas_para_geracao_de_energia_eletrica_por_paineis_solares_fotovoltaicos_na_matriz_energetica_brasileira). Acesso em: 21 mai. de 2023.

EUM, J.; KIM, Y. Analysis on Operation Modes of Residential BESS with Balcony-PV for Apartment Houses in Korea. **Sustainability**, n. 13, vol. 311, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su13010311>. Acesso em: 28 jul. 2023.

FAUSTINO, P. C. **Estudo do coeficiente de temperatura em células fotovoltaicas**. Monografia (Engenharia Elétrica), Universidade de Taubaté, Taubaté, 2018. Disponível em: <http://repositorio.unitau.br:8080/jspui/bitstream/20.500.11874/4838/1/Paulo%20Cesar%20Faustino.pdf>. Acesso em: 20 de nov. de 2022.

FELIX, E. P. S. **O mercado livre de energia no brasil: um estudo de caso no Instituto Federal da Paraíba**. Monografia (Engenharia Elétrica), Instituto Federal de Educação da Paraíba, João Pessoa, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ifpb.edu.br/jspui/bitstream/177683/2810/1/Esther%20Paula%20Sousa%20Felix%20-%20O%20mercado%20livre%20de%20energia%20no%20Brasil%20-%20um%20estudo%20de%20caso%20no%20Instituto%20Federal%20da%20Para%C3%ADba.pdf>. Acesso em: 20 de nov. de 2022.

GÓMEZ, J. M. R. et al. A irradiância solar: conceitos básicos. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, vol. 40, n. 3, 2018. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbef/a/DfZGpdWH53yHvvj9kwjMqqt/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 04 de dezembro de 2022.

GODOI, R. R. **Análise Comparativa de Desempenho de Inversor String e Microinversor**. Monografia (Bacharel em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia elétrica, Uberlândia, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/24118/1/AnaliseComparativaDesempenho.pdf>. Acesso em: 11 maio de 2023.

KFOURI, E. **Dimensionamento de um sistema de aterramento para uma subestação abaixadora de tensão em uma edificação comercial**. Monografia (Bacharel em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/185166/TCC%20final.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 11 de janeiro de 2023.

LOPES, D. W. de O. **Implementação de sistemas fotovoltaicos em habitações de interesse social no âmbito do programa Minha Casa Minha Vida**. Monografia (Bacharelado em Engenharia de Energia), Universidade de Brasília, Brasília, 2021. Disponível em: <https://bdm.unb.br/handle/10483/29707>. Acesso em: 21 mai. de 2023.

MAGARREIRO, C.; FREITAS, S.; BRITO, M. C. Radiação e energia solar. **Sociedade Portuguesa de Física**, vol. 39, n. 1, 2016. Disponível em: <https://www.spf.pt/magazines/GFIS/119/article/993/pdf>. Acesso em: 22 dez. de 2022.

MAMEDE FILHO, J. **Subestações de alta tensão**. ed. 4, Rio de Janeiro: LTC, 2021.

MARDEGAN, C. **Serviços Auxiliares**. Capítulo de livro. "O Setor Elétrico". 2010.

MARRA, E. G. **BESS SE Trindade Firminópolis PeD R3**. Metodologia de projeto apresentada à equipe executora do projeto de pesquisa e desenvolvimento (P&D) nº PD-07351-0001/2022 intitulado "Sistema de armazenamento de energia em baterias íon-lítio com geração fotovoltaica associada para black start e suprimento de cargas essenciais dos serviços auxiliares de subestações". 2023.

NORBERTO, P. E. S.; LEMOS, H. T. Q. **Modelagem e análise experimental de curva I-V de módulo fotovoltaico**. Monografia (Bacharel de Engenharia Elétrica) Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2019. Disponível em: [https://repositorio.ufersa.edu.br/bitstream/prefix/5741/1/PabloESN\\_ART.pdf](https://repositorio.ufersa.edu.br/bitstream/prefix/5741/1/PabloESN_ART.pdf). Acesso em: 09 de jan. de 2023.

OLIVEIRA JUNIOR, J. A. de. **Análise e cálculo do potencial de geração solar fotovoltaica das áreas em desertificação no Estado do Ceará**. Monografia (Engenharia de Elétrica), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/65847#:~:text=Encontrou%2Dse%20um%20potencial%20de,ap%C3%B3s%20a%20instala%C3%A7%C3%A3o%20do%20projeto>. Acesso em: 21 mai. de 2023.

OLIVEIRA, I. M. de. **Análise de viabilidade de inversores de frequência aplicados a projetos fotovoltaicos**. Monografia (Engenharia de Elétrica),

Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/47465/1/TCC-IZAAC.pdf>. Acesso em: 21 mai. de 2023.

OLIVEIRA, I. M. **Desenvolvimento de simulador fotovoltaico considerando perdas de recurso solar por inclinação e desvio azimutal dos módulos fotovoltaico**. Monografia (Engenharia de Elétrica), Instituto Federal de Santa Catarina, Joinville, 2022. Disponível em: [http://joinville.ifsc.edu.br/~bibliotecajoi/arquivos/tcc/eng\\_eletrica/2022/219976.pdf](http://joinville.ifsc.edu.br/~bibliotecajoi/arquivos/tcc/eng_eletrica/2022/219976.pdf). Acesso em: 21 mai. de 2023.

OLIVEIRA, G. M. de. **Operação e Manutenção de Equipamentos em Subestação de Transmissão**. Monografia (Bacharel em Engenharia Elétrica), Universidade Federal do Pampa, Alegrete-RS, 2022. Disponível em: <https://dspace.unipampa.edu.br/bitstream/rii/7543/1/Gabrielli%20Matheus%20de%20Oliveira%20-%202022.pdf>. Acesso em: 21 mai. de 2023.

RIBEIRO FILHO, L. A. de S.; PEREIRA, V. L.; VELÁZQUEZ, S. M. S. G. **Simulador de energia solar para implementação de sistemas fotovoltaicos no contexto urbano**. Revista Mackenzie de Engenharia e Computação, São Paulo, vol. 22, n. 1, p. 82-104, 2022. Disponível em: <https://editorarevistas.mackenzie.br/index.php/rmec/article/view/15222>. Acesso em: 21 mai. de 2023.

RUBIM, B.; SAUAIA, R.; KOLOSZUK, R. **A quem interessa inviabilizar a geração distribuída**. Poder 360, [s. l.], 2019. Disponível em: <https://www.poder360.com.br/opiniao/a-quem-interessa-inviabilizar-a-geracao-distribuida-questiona-absolar/>. Acesso em: 21 mai. de 2023.

RODRIGUES, R. Y. Y. **Sistema de telemetria para cultivo urbano com comunicação WI-FI alimentado por células fotovoltaicas orgânicas flexíveis**. Monografia (Engenharia Eletrônica), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2019. Disponível em: [http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/8441/1/CT\\_DAELN\\_2019\\_1\\_05.pdf](http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/8441/1/CT_DAELN_2019_1_05.pdf). Acesso em: 22 de janeiro de 2023.

SILVA, J. L. de S. **Estudo e desenvolvimento experimental de otimizadores de potência para sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica**. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Campinas, SP, 2020. Disponível em: <http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/346274>. Acesso em: 28 nov. 2022.

SANTOS, B. de S. **Análise de Desempenho e Retorno de Capital Aplicado em Sistemas Fotovoltaicos com Inversor String, Microinversor e Inversor com Otimizador de Potência**. Monografia (Bacharel em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/31976/3/An%C3%A1liseDesempenhoRetorno.pdf>. Acesso em: 28 jun. 2023.

SANTOS, C. do A.; SOUSA, T. de P. **Aplicações de sistemas fotovoltaicos on grid e off grid**. Monografia (Bacharel em Saneamento Ambiental), Instituto Federal do Espírito Santo, Colatina, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ifes.edu.br/handle/123456789/1991>. Acesso em: 28 jun. 2023.

SILVA, G. G.; BRANDÃO, M. E. O. Energia solar fotovoltaica: estudo sobre a matriz energética e também sobre os níveis de incidência solar no município de Luziânia. **Brazilian Journal Of Development**, [S.L.], vol. 8, n. 1, p. 2688-2702, 2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.34117/bjdv8n1-175>. Acesso em: 28 mai. 2023.

SOUSA, W. V. de. **Estudo de caso de um sistema solar off-grid para o instituto do meio ambiente do município de Itapipoca**. Monografia (Engenharia de Energias Renováveis), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/68653>. Acesso em: 21 mai. de 2023.

VOLPATO, E. L. **Análise do rendimento na conversão de energia solar em energia elétrica, de quatro tecnologias de células fotovoltaicas, na cidade de Campo Mourão - Estado do Paraná**. Dissertação (Mestre em Inovação Tecnológica) Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2022. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/30337/1/analiserendimentoenergiasolar.pdf>. Acesso em: 28 mai. 2023.