

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELETRÔNICA
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

GIOVANNA HAYSSA MOLINARI LOPES

**IDENTIFICAÇÃO DE DEFEITOS EM INSTALAÇÕES
FOTOVOLTAICAS E DESENVOLVIMENTO DE PLANOS DE AÇÃO
PARA EVENTUAIS MANUTENÇÕES**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PONTA GROSSA

2020

GIOVANNA HAYSSA MOLINARI LOPES

**IDENTIFICAÇÃO DE DEFEITOS EM INSTALAÇÕES
FOTOVOLTAICAS E DESENVOLVIMENTO DE PLANOS DE AÇÃO
PARA EVENTUAIS MANUTENÇÕES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica, do Departamento de Engenharia Eletrônica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Marcio Mendes Casaro

PONTA GROSSA

2020

TERMO DE APROVAÇÃO

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO - TCC

IDENTIFICAÇÃO DE DEFEITOS EM INSTALAÇÕES FOTOVOLTAICAS E DESENVOLVIMENTO DE PLANOS DE AÇÃO PARA EVENTUAIS MANUTENÇÕES.

Por

Giovanna Hayssa Molinari Lopes

Monografia apresentada às 14 horas do dia 27 de Agosto de 2020 como requisito parcial, para conclusão do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Ponta Grossa. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação e conferidas, bem como achadas conforme, as alterações indicadas pela Banca Examinadora, o trabalho de conclusão de curso foi considerado APROVADO.

Banca examinadora:

| | |
|---|--------------------------------|
| Prof. M.Eng. Percio Luiz Karam de Miranda | Membro |
| Prof. Dr. Murilo Oliveira Leme | Membro |
| Prof. Dr. Marcio Mendes Cassaro | Orientador |
| Prof. Dr. Josmar Ivanqui | Professor(a) responsável TCCII |



Documento assinado eletronicamente por MARCIO MENDES CASARO, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 28/08/2020, às 13:35, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por MURILO OLIVEIRA LEME, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR, em 28/08/2020, às 14:29, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por PERCIO LUIZ KARAM DE MIRANDA, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 22/09/2020, às 13:31, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por JOSMAR IVANQUI, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 22/09/2020, às 13:34, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.utfpr.edu.br/sei/controlador_publico.php?acao=documento_conferir&id_documento=17500248&id_documento=17500248&id_documento=17500248. Informando o código verificador 1589657 e o código CRC 573C9841.

À minha querida família, pelo apoio incondicional em todos os momentos difíceis durante minha trajetória acadêmica, este trabalho é dedicado a vocês!

AGRADECIMENTOS

Gostaria de deixar registrado meu imenso agradecimento principalmente aos meus pais, Luiz Carlos e Lorena do Carmo, e ao meu irmão, Guilherme Henrique, que, durante toda a formação aguentaram todos os perrengues ao meu lado.

Um agradecimento especial ao meu pai, que me ajudou muito no crescimento pessoal e principalmente no profissional, me ajudando e me aconselhando enquanto arriscava e criava a primeira empresa em meu nome. Garanto-te que todos os investimentos que a Casa do Telefone teve comigo serão sempre valorizados e lembrados.

A minha mãe, minha primeira professora, amiga, confidente e mulher exemplo que eu tenho na vida, eu devo muito a ti por tudo que fez por mim em todos os momentos, com certeza devo essa graduação a todo o esforço que fez para que, eu e meu irmão tivesse todos os recursos e apoio necessários.

Guilherme, a você não consigo expressar palavras o suficiente por tanto que fez por mim durante toda a minha vida. Meu exemplo de perseverança e agora, de engenheiro. Que Deus me permita seguir sempre seus passos.

E claro, Deus! Eis o maior de todos os meus agradecimentos, meu porto seguro em todos os momentos de angústia e medo, inclusive naquelas provas surpresas que ocorreram neste tempo.

Agradeço também ao meu orientador Prof. Dr. Casaro, pela sabedoria com que me guiou nesta trajetória, me aceitando prontamente para este projeto.

Certamente se eu fosse agradecer a todos, um por um, o texto seria muito longo, então gostaria de generalizar estes agradecimentos a todos que direta ou indiretamente estiveram presentes em qualquer momento vivido nesses anos dentro da UTFPR.

RESUMO

LOPES, Giovanna Hayssa Molinari. **Identificação de Defeitos em Instalações Fotovoltaicas e Desenvolvimento de Planos de Ação para Eventuais Manutenções.** 2020. 53p. Trabalho De Conclusão De Curso Bacharelado Em Engenharia Elétrica - Universidade Tecnológica Federal Do Paraná. Ponta Grossa, 2020.

O panorama atual da energia solar fotovoltaica mostra um crescimento constante devido a diversos aspectos, tendo como principais o financeiro, o social e o ambiental. Embora um sistema fotovoltaico tenha uma vida útil calculada em 25 anos de 80% de eficiência garantida, existem sistemas que apresentam defeitos antes desse prazo. Assim, o presente trabalho abordará o Sistema Solar Fotovoltaico em suas diversas particularidades e a aplicação de ferramentas da qualidade capazes de auxiliar na melhoria da produção de energia elétrica e, ao mesmo tempo tornar mais ágil a manutenção do sistema.

Palavras-chave: Sistema Fotovoltaico. Levantamento de Defeitos. Ferramentas da Qualidade.

ABSTRACT

LOPES, Giovanna Hayssa Molinari. **Defect Identification in Photovoltaic Installations and Development of Action Plans for Eventual Maintenance.** 2020. 53p. Trabalho de Conclusão de Curso Bacharelado em Engenharia Elétrica - Federal Technology University - Paraná. Ponta Grossa, 2020

The current outlook on photovoltaic solar energy shows a steady growth due several aspects, being the main aspect the financial, social and environmental. Although a photovoltaic system has a lifespan in 25 years of 80% of guarantee efficiency, there are systems that show defects before this time. Therefore this paper will address the photovoltaic Solar system in its many peculiarities and the application of the quality tools capable of helping the improvement of the electric energy production, at the same time making the system maintenance more agile

Keywords: Photovoltaic System. Defect Survey. Quality Tools.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Matriz Energética Brasileira | 14 |
| Figura 2 - Evolução da Fonte Solar Fotovoltaica no Brasil..... | 14 |
| Figura 3 - componentes do sistema solar fotovoltaico | 15 |
| Figura 4 - Funcionamento de uma célula fotovoltaica | 18 |
| Figura 5 - Célula Monocristalina..... | 19 |
| Figura 6 - Célula Policristalina..... | 20 |
| Figura 7 - Associação em paralelo | 23 |
| Figura 8 - Associação em série | 23 |
| Figura 9 - Associação em série e paralelo | 24 |
| Figura 10 - Relação I-V | 25 |
| Figura 11 - Relação P-V..... | 25 |
| Figura 12 - Influência do clima..... | 26 |
| Figura 13 - Influência da temperatura | 26 |
| Figura 14 - Circuito Equivalente | 26 |
| Figura 15 - Circuito detalhado | 28 |
| Figura 16 - Classificação dos inversores..... | 31 |
| Figura 17 - Inversor de um estágio..... | 32 |
| Figura 18 - Inversor de dois estágios | 33 |
| Figura 19 - Inversor multi-estágio..... | 33 |
| Figura 20 - Inversor central | 34 |
| Figura 21 - Topografia inversores CC em paralelo..... | 34 |
| Figura 22 - Topologia CA | 35 |
| Figura 23 - Topologia dos Inversores integrados | 35 |
| Figura 24 - Nomenclatura dos pontos chaves | 40 |
| Figura 25 - Fluxograma | 42 |
| Figura 26 - Diagrama de Ishikawa..... | 46 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|---|----|
| Quadro 1 - Principais benefícios da energia fotovoltaica no Brasil..... | 14 |
| Quadro 2 - Comparativo topologia e configuração do sistema..... | 36 |
| Quadro 3 - Simbologia padrão do fluxograma..... | 37 |
| Quadro 4 - Definições do diagrama de Ishikawa..... | 43 |
| Quadro 5 - Levantamento de causas | 43 |
| Quadro 6 - Plano de ação - rede elétrica | 47 |
| Quadro 7 - Plano de ação - arranjo fotovoltaico | 47 |
| Quadro 8 - Plano de ação - inversores..... | 47 |
| Quadro 9 - Plano de ação - sistema fotovoltaico..... | 48 |

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 13 |
| 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 17 |
| 2.1 O EFEITO FOTOVOLTAICO | 17 |
| 2.2 A CÉLULA FOTOVOLTAICA | 19 |
| 2.2.1 Células De Silício Monocristalino | 19 |
| 2.2.2 Células de Silício Policristalino | 19 |
| 2.2.3 Células de Película Fina (<i>Thin Film</i>) | 20 |
| 2.2.4 Células de Silício Amorfo | 21 |
| 2.2.5 Células de Telureto de Cádmio (CdTe) | 21 |
| 2.2.6 Disseleneto de Cobre Índio e Gálio (CIGS) | 21 |
| 2.2.7 Outros Tipos | 22 |
| 2.3 MÓDULO FOTOVOLTAICO | 22 |
| 2.3.1 Associação em Paralelo | 22 |
| 2.3.2 Associação em Série | 23 |
| 2.3.3 Associação Série-Paralelo | 23 |
| 2.3.4 Características Elétricas dos Módulos Fotovoltaicos | 24 |
| 2.3.5 Influência da Temperatura e da Radiação Solar | 25 |
| 2.4 MODELO MATEMÁTICO | 26 |
| 2.4.1 Tensão de Circuito Aberto | 28 |
| 2.4.2 Corrente de Curto Circuito | 29 |
| 2.4.3 Fator de Forma | 29 |
| 2.4.4 Eficiência | 30 |
| 2.5 INVERSOR | 30 |
| 2.5.1 Comutação de Inversores | 30 |
| 2.5.2 Tipos de Inversores | 32 |
| 2.5.2.1 Inversores de um estágio | 32 |
| 2.5.2.2 Inversor de dois estágios | 32 |
| 2.5.2.3 Inversor multi-estágios | 33 |
| 2.6 PLANEJAMENTO ESTRATÉGICO E TOMADA DE DECISÃO | 36 |
| 2.7 FLUXOGRAMA | 37 |
| 2.8 DIAGRAMA DE ISHIKAWA | 38 |
| 2.9 PLANO DE AÇÃO OU 5W1H | 38 |
| 2.10 MANUTENÇÃO | 39 |
| 2.10.1 Plano de Vigilância | 40 |
| 2.10.2 Plano de Manutenção Preventiva | 41 |
| 2.10.3 Manutenção Corretiva | 41 |
| 3 METODOLOGIA | 42 |
| 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES | 45 |

| | |
|-------------------------|-----------|
| 5 CONCLUSÃO..... | 49 |
| REFERÊNCIAS..... | 50 |

1 INTRODUÇÃO

Com o crescimento populacional houve uma grande preocupação com o uso dos recursos naturais no que se refere à geração de energia elétrica mundial. Tal preocupação tem impulsionado a busca por energias renováveis, devido à redução dos impactos causados, que permite ao mesmo tempo o desenvolvimento econômico e a conservação ambiental, apoiados num crescimento sustentável.

Atualmente, 20% da matriz energética mundial vêm das energias renováveis, chamadas também de “não convencionais” que utilizam como fontes primárias recursos disponíveis abundantemente em grande parte do mundo: água, vento e sol (CORREA,2020).

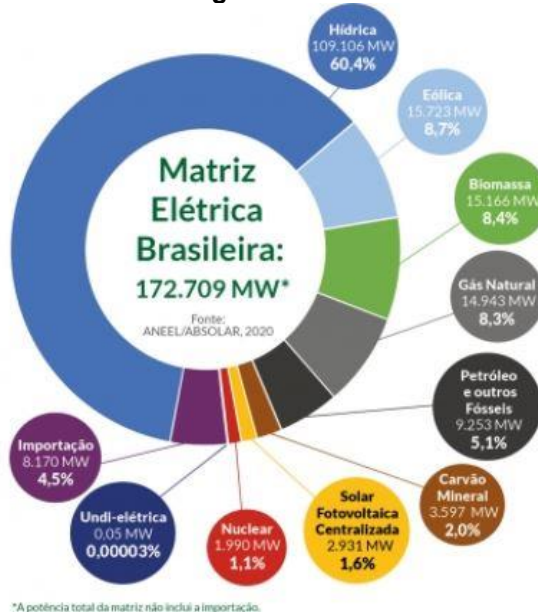
Considerando a Geração Distribuída (GD), a energia gerada a partir do sol é a “ideal” visto que a geração e o consumo são pontuais, reduzindo ainda mais as perdas quando pensamos nas longas linhas de transmissões utilizadas nos outros tipos de geração de energia que não podem ser instalados perto de grandes centros urbanos.

O Brasil é um dos países mais privilegiados quando falamos em energia solar, devido a sua vasta extensão, clima tropical e a incidência solar existir praticamente o ano todo em sua área.

Conforme o último boletim da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) de março de 2019, a geração distribuída teve um crescimento acelerado desde 2015 (ABSOLAR, 2020), chegando em 2019 a 896MW instalados, onde a energia fotovoltaica é equivalente a cerca de 84% desse valor.

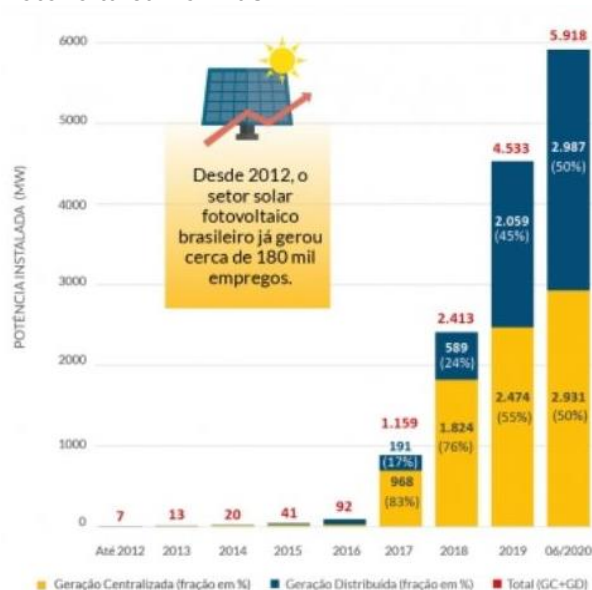
Dados ainda mais recentes (ABSOLAR, 2020), mostram que a energia solar ainda corresponde a apenas 1,6% de toda a matriz energética brasileira conforme a figura 1. A figura 2 (ABSOLAR, 2020) mostra o quanto à exploração dessa fonte ainda é recente em nosso país e, ao mesmo tempo, o seu potencial de crescimento e de geração de empregos.

Figura 1 - Matriz Energética Brasileira



Fonte: (ABSOLAR, 2020)

Figura 2 - Evolução da Fonte Solar Fotovoltaica no Brasil



Fonte: (ABSOLAR, 2020)

Ainda segundo o infográfico da ABSOLAR existem três esferas principais onde se identifica benefícios sobre a energia vinda do sol, apresentados no quadro a seguir:

Quadro 1 - Principais benefícios da energia fotovoltaica no Brasil

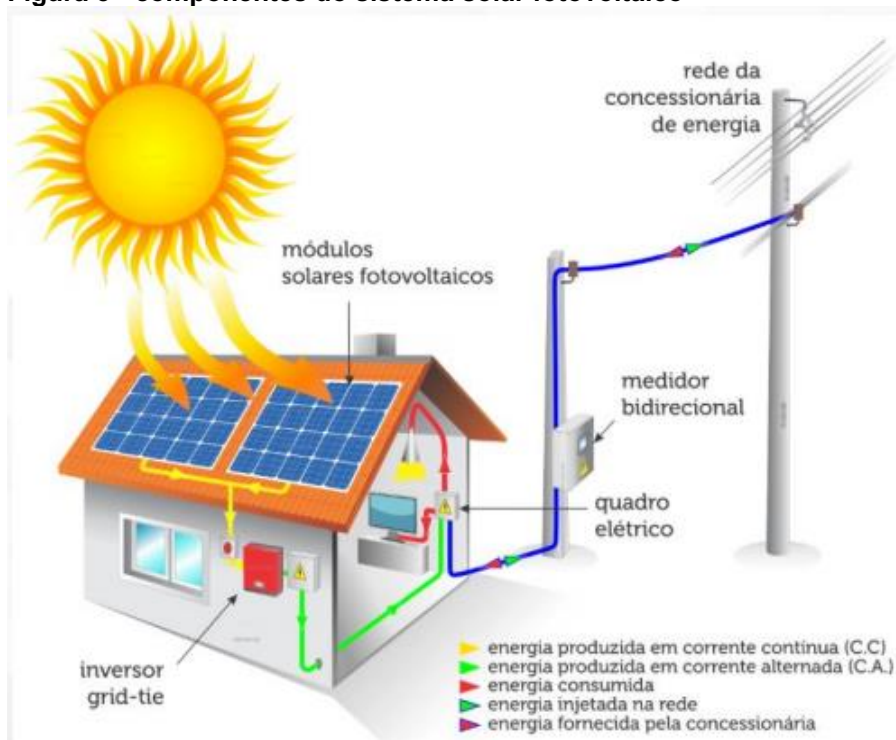
| Esfera Socioeconômica | Esfera Ambiental | Esfera Estratégica |
|--|---|--|
| Redução dos gastos com energia elétrica para a população, empresas e governo; | Geração de eletricidade limpa, renovável e sustentável, sem emissão de gases de efeito estufa, sem resíduos e sem ruídos; | Diversificação da matriz elétrica brasileira com uma nova fonte renovável, aumentando a segurança no suprimento da energia elétrica; |
| Líder em geração de empregos locais de qualidade criando de 25 a 30 empregos por MW/ano; | Não necessita de água para sua operação, aliviando a pressão sobre os recursos hídricos; | Redução de perdas e postergação de investimentos em transmissão e distribuição; |
| Atração de capital externo e novos investimentos privados no país. | Baixíssimo impacto ambiental. | Alívio da demanda elétrica em horário diurno, reduzindo custos aos consumidores. |

Fonte: (ABSOLAR, 2020)

No caso de sistemas ainda em tempo de garantia, o código de defesa do consumidor - artigo 18 - estabelece que todos os atores da cadeia produtiva respondem pela garantia dos bens duráveis. Segundo o Canal Solar (ARAÚJO, 2020) é sempre recomendado procurar o instalador e o vendedor do sistema, porém antes de qualquer coisa devem procurar respostas referentes à manutenção, garantias e claro, as referências e certificações das empresas responsáveis (integrador, distribuidor e fabricantes).

Dentro deste cenário, a manutenção de um sistema fotovoltaico é de suma importância para manter a qualidade e assim, a eficiência do sistema. Um sistema fotovoltaico é composto por muitos elementos, conforme apresentado na figura 3, sendo assim é muito complicado chegar ao motivo exato da falha na produtividade considerando esta como um todo. Para isso, este trabalho tem como objetivo principal a realização de uma rotina para tornar mais ágil e fácil a manutenção do sistema solar fotovoltaico, rotina essa que futuramente poderá servir de base para novas avaliações.

Figura 3 - componentes do sistema solar fotovoltaico



Fonte: (LUZ SOLAR: GERE SUA PRÓPIA ENERGIA, 2016)

O trabalho será composto pela fundamentação teórica onde serão abordados todos os itens do sistema fotovoltaicos e suas particularidades, uma abordagem geral das ferramentas da qualidade e uma breve revisão sobre os tipos de manutenção. Seguido pela metodologia utilizada dentro da identificação dos possíveis defeitos nas instalações. Os resultados e discussões abordarão os dados coletados e os planos de ação realizados.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A energia solar fotovoltaica consiste em uma conversão da radiação eletromagnética em eletricidade através de materiais semicondutores (LIMA, MENEZES, *et al.*, 2020), sólidos geralmente cristalinos de condutividade elétrica intermediária - nem condutores nem isolantes – caracterizados assim pela presença de bandas proibidas de energia.

A utilização do sol como fonte de energia pode proporcionar diversos benefícios seja eletricamente, socioeconomicamente e também ambientalmente. Considerando o ponto de vista elétrico, a escolha da energia solar contribuirá para a diversificação da matriz, redução das perdas, o crescimento no quesito segurança assim como a redução de carga dos transformadores e alimentadores. Considerando o lado socioeconômico, a criação de empregos locais e dos investimentos são os principais. Já no aspecto ambiental, a nítida redução dos gases responsáveis pelo efeito estufa, e também na utilização de água, não sendo mais necessários alagamentos e construções de mais hidrelétricas.

2.1 O EFEITO FOTOVOLTAICO

O efeito fotovoltaico é possível em materiais com características intermediárias, entre um condutor e um isolante, que recebem o nome de semicondutores (Nascimento, 2004).

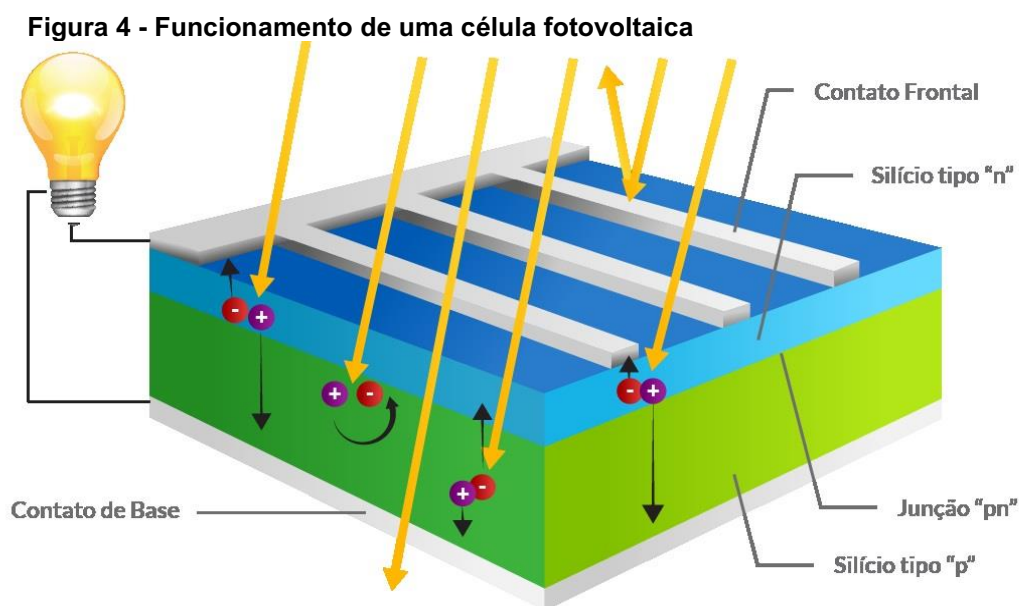
Entre os semicondutores, o silício é o mais utilizado para as aplicações fotovoltaicas. O cristal de silício puro não possui elétrons livres em sua camada de valência, o tornando um mau condutor elétrico. Para que o silício possa tornar-se um condutor elétrico é necessário que este passe por um processo chamado dopagem, que consiste em acrescentar determinada quantidade de outros elementos.

Quando se adiciona o fósforo, átomo com cinco elétrons em sua camada de valência existirá um elétron em excesso que ficará fracamente ligado ao átomo, neste caso, necessitará de pouca energia para que ocorra um deslocamento, ou seja, o fósforo será um dopante doador de elétrons, denominado dopante N, e as moléculas serão conhecidas como silício do tipo N.

Se for adicionado o boro, elemento com três elétrons em sua camada de valência haverá a falta de um elétron, essa falta chama-se buraco ou lacuna. Da mesma forma que o fósforo tem facilidade para doar elétrons, mesmo quando submetido a pouca energia, o boro terá facilidade para aceitar os elétrons que sobram. Neste caso, é possível dizer que o boro é um dopante receptor, denominado dopante P e sua molécula recebe o nome de silício do tipo P.

No momento em que os dois silícios são unidos, forma-se uma região denominada junção P-N, onde existirá um campo elétrico devido aos elétrons livres do silício tipo N ocupar as lacunas do silício tipo P. Com a incidência de luz, os fótons chocam-se com os elétrons da estrutura de silício o tornando um condutor.

É através de um condutor externo ligando a camada positiva à camada negativa que ocorre a geração de um fluxo de elétrons, a corrente elétrica, como mostrado na figura 3. A intensidade da luz é proporcional à intensidade da corrente elétrica, assim como o fato de enquanto existir luz sobre a célula, existirá corrente elétrica.



Fonte: (Nascimento, 2004)

O efeito fotovoltaico consiste na capacidade de uma célula solar transformar a energia luminosa em energia elétrica (RÜTHER, 2004).

2.2 A CÉLULA FOTOVOLTAICA

A maioria das células fotovoltaicas encontradas atualmente são células de silício, devido ao vasto conhecimento tecnológico bem como a facilidade de encontrá-lo na natureza.

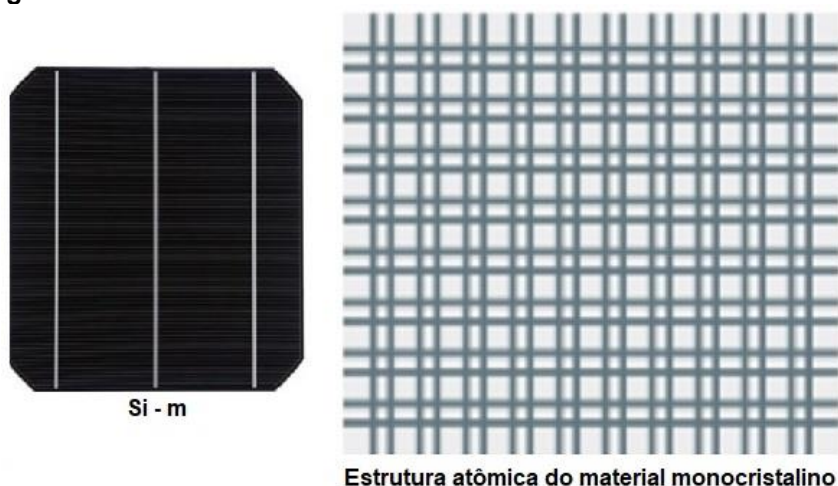
As formas de semicondutores de silício mais conhecidas são: silício monocristalino, amorfo e policristalino.

2.2.1 Células De Silício Monocristalino

Estas células são obtidas a partir de barras cilíndricas de silício, sua fabricação é iniciada com a extração do cristal de dióxido de silício, purificado e solidificado em grandes fornos, purificação denominada “Processo Czochralski”.

As células monocristalinas são uma das mais eficientes, chegando a cerca de 18%, porém o custo e o gasto energético para esse processo são extremamente altos, sua estrutura está apresentada na figura 4 (Planas, 2018).

Figura 5 - Célula Monocristalina



Fonte: (Você Solar, 2018)

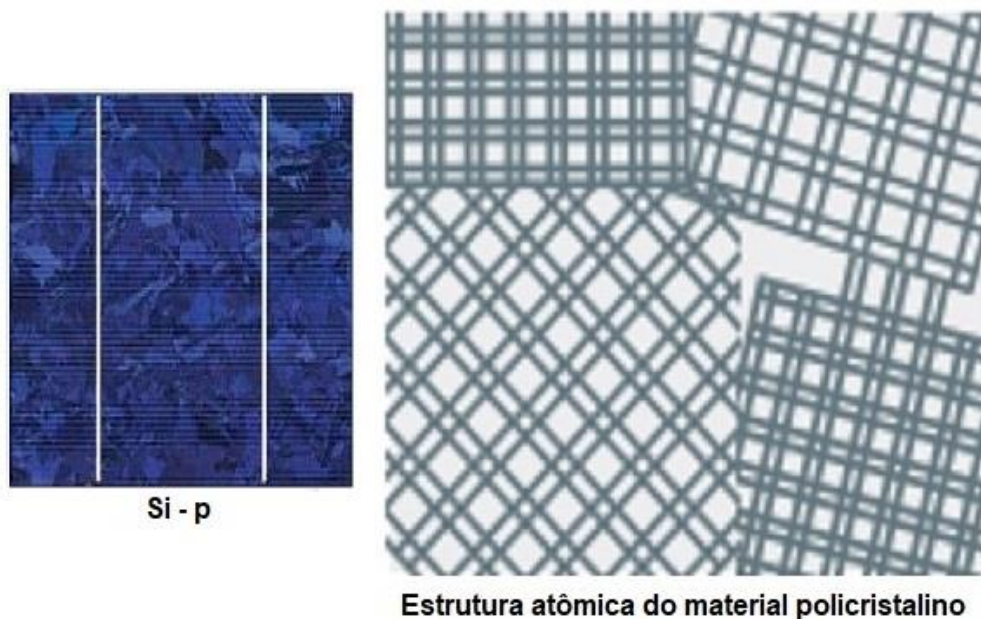
2.2.2 Células de Silício Policristalino

As células policristalinas passam por um processo mais barato, onde blocos de silício são obtidos pela fusão do silício puro em alguns moldes especiais. Com o

silício já no molde, o resfriamento acontece lentamente, não permitindo que os átomos se organizem apenas em um cristal, nesse caso, forma-se uma estrutura policristalina que possui separação entre cada cristal como mostrado na figura 5.

O rendimento deste tipo de célula pode chegar a 15% devido às imperfeições dos cristais (Nascimento, 2004).

Figura 6 - Célula Policristalina



Fonte: (Você Solar, 2018)

2.2.3 Células de Película Fina (*Thin Film*)

As células de filmes finos são diferentes das células de silício já que utilizam outras moléculas em seu processo de fabricação, como por exemplo, o Telureto de Cádmio (CdTe), Disseleneto de Cobre Gálio Índio (CIGS) ou o Silício Amorfo ($a\text{-Si}^3$). Suas células possuem eficiência de 2% a 3% menor que as células de Silício cristalino (BASTOS, 2018).

A tecnologia dos filmes finos é facilmente encontrada em calculadoras, relógios e demais produtos de baixo consumo de energia, já que funcionam inclusive com luz artificial.

Os filmes são depositados sobre elementos de baixo custo, como o vidro, plástico e o inox, por exemplo.

2.2.4 Células de Silício Amorfo

As células amorfas são obtidas pela decomposição de algumas camadas finas de silício sobre o vidro ou o metal. São compostas por camadas muito finas. Embora seja um processo de obtenção de baixo custo, seu rendimento é tão baixo quanto, já que atinge aproximadamente apenas 10,5% do total e sua durabilidade também é reduzida, devido a sua rápida degradação.

Para que a utilização do silício amorfo fosse aceita na fabricação de placas solares, foi necessário adicionar um processo de hidrogenação. Este processo consiste em adicionar átomos de hidrogênios que conseguem minimizar os efeitos negativos dos defeitos estruturais da molécula.

2.2.5 Células de Telureto de Cádmio (CdTe)

O Telureto de Cádmio é a tecnologia que vem superando o custo e a eficiência dos painéis de Silício cristalino. Esta célula é composta por filmes sobrepostos formando uma heterojunção denominada “janela/adsorvedor”.

O contato frontal é revestido com uma camada muito fina de Sulfeto de Cádmio (CdS), um semiconductor do tipo-N seguido de uma camada de Telureto de Cádmio (CdTe), um semiconductor do tipo-P. A junção P-N ocorre quando a estrutura entra em contato com o cloro (SOUZA, 2017).

Embora sejam células que não se degradam sob a luz, sua fabricação é considerado um problema, já que o Cádmio é tóxico e requer rigorosos processos de controle durante sua fabricação.

2.2.6 Disseleneto de Cobre Índio e Gálio (CIGS)

Sua estrutura é muito parecida com a do CdTe, porém com uma eficiência que pode atingir até 18%.

Seu custo é alto devido ao índio ser um elemento raro e muito requisitado na indústria de smartphones.

2.2.7 Outros Tipos

Algumas placas ainda estão em fase de pesquisas e testes, como o Arseneto de Gálio, que promete uma eficiência de até 28%. Com custo muito elevado, foi utilizada apenas nas aplicações espaciais, para a exploração do sistema solar.

As células híbridas possuem uma mistura do Silício (geralmente o amorfo) com as camadas finas, aproveitando um espectro da radiação ainda maior. Devido a utilizarem mais de uma tecnologia, embora a promessa de maior eficiência chegando a 18,5%, seu custo é extremamente elevado.

As células orgânicas existem desde 1991 e foram descobertas por Michael Gratzel. Em seu estudo, Gratzel criou células que captam a energia do sol usando a mesma maneira que as plantas realizam a fotossíntese, com o uso de um “corante” orgânico. Embora sejam de fácil produção, não têm a estabilidade dos materiais usados, sendo assim, não são placas comuns.

2.3 MÓDULO FOTOVOLTAICO

O módulo fotovoltaico baseia-se na junção de várias células solares, já que estas possuem baixa tensão e corrente de saída, fornecendo pouca energia elétrica. A escolha do módulo e seu arranjo dependerão da tensão e da corrente desejadas (BRAGA, 2008).

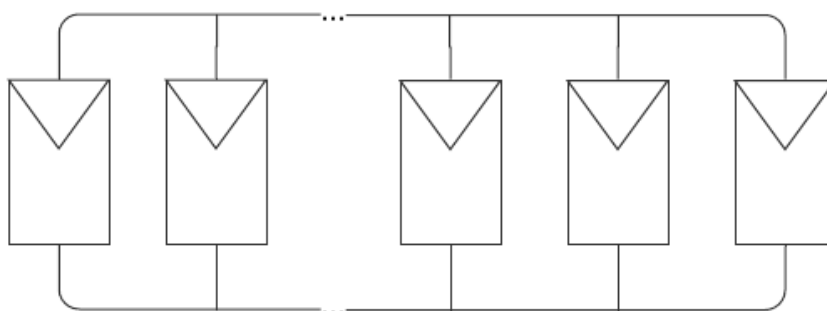
A potência máxima de uma única célula fotovoltaica não excederá 2 W, o que é insuficiente para muitas aplicações (BRITO e SILVA, 2006).

2.3.1 Associação em Paralelo

As células associadas em paralelo apresentam terminais do mesmo tipo ligados a um ponto em comum, ou seja, todos os terminais positivos acabam em um mesmo ponto, assim como os negativos (BRAGA, 2008).

Com a associação em paralelo, a tensão entre as células não mudará, porém a corrente resultante será a soma de todas as correntes individuais das células.

Figura 7 - Associação em paralelo



Fonte: (NBR 16690, 2018)

2.3.2 Associação em Série

Neste modelo, o terminal negativo de um módulo é ligado no terminal positivo do outro e, neste caso, as correntes manterão o valor, porém a tensão será resultante do somatório das tensões de cada módulo.

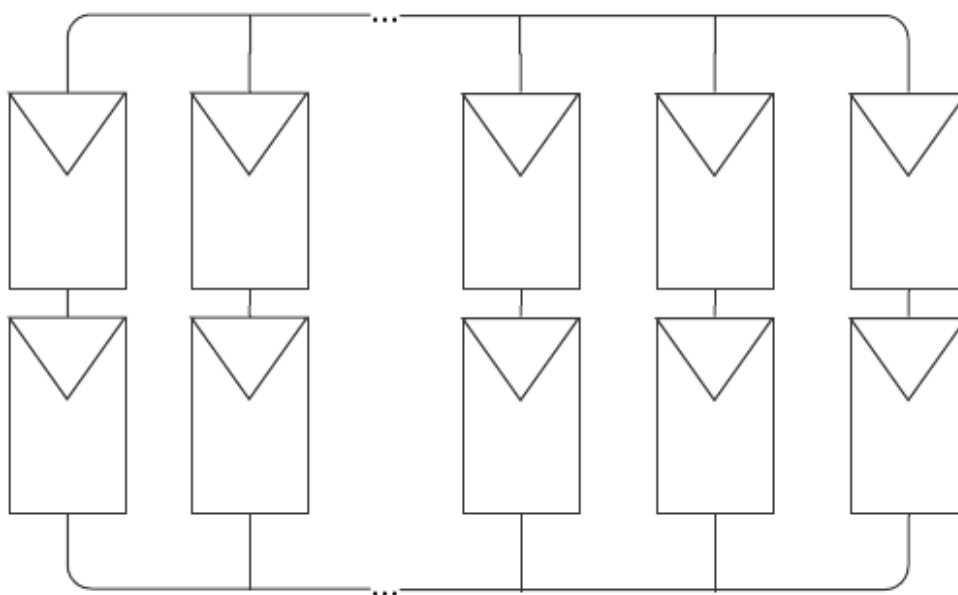
Figura 8 - Associação em série



Fonte: (NBR 16690, 2018)

2.3.3 Associação Série-Paralelo

Para este último caso, os painéis são conectados tanto em série como em paralelo, elevando a corrente e a tensão do circuito.

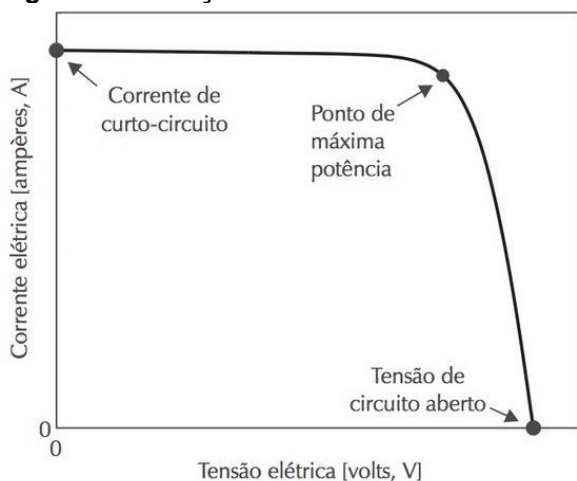
Figura 9 - Associação em série e paralelo

Fonte: (NBR 16690, 2018)

2.3.4 Características Elétricas dos Módulos Fotovoltaicos

Considerando o fato dos painéis solares dependerem da luz solar, não é possível manter constante o valor de tensão em seus terminais, devido a isso, as principais características dos módulos são visualizadas através das curvas I-V e P-V, mostradas nas figuras 12 e 13 (BASTOS, 2018), onde é possível visualizar três pontos importantes: ponto de corrente de curto-circuito, ponto de máxima potência e ponto de tensão de circuito aberto:

Figura 10 - Relação I-V



Fonte: (BASTOS, 2018)

Figura 11 - Relação P-V



Fonte: (BASTOS, 2018)

O ponto de potência máxima ($P_{\text{máx}}$) é o ponto ideal de atuação dos painéis, é quando a corrente e a tensão estão muito próximas de seus valores máximos, simultaneamente.

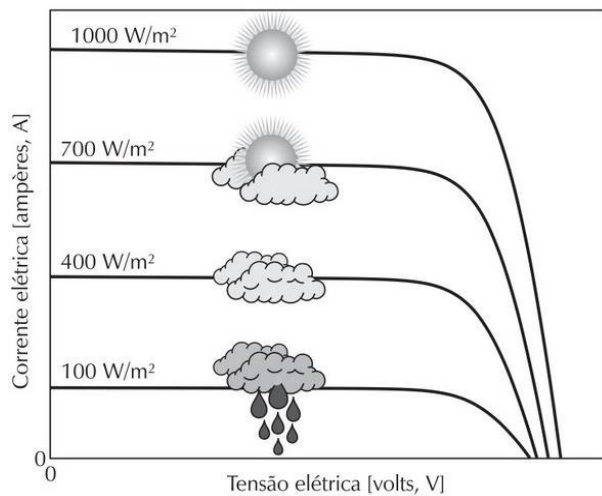
2.3.5 Influência da Temperatura e da Radiação Solar

Considerando o fato de os painéis solares gerarem energia através do sol, os painéis são muito influenciados pela temperatura e pelo clima, ou seja, se há pouca luz, há pouca energia, principalmente pelo fato da corrente produzida ser proporcional ao nível de luz incidente.

No caso da temperatura, a situação torna-se diferente. A temperatura é inversamente proporcional à geração de energia, ou seja, quando mais quentes os módulos fotovoltaicos, menor será a produção de energia.

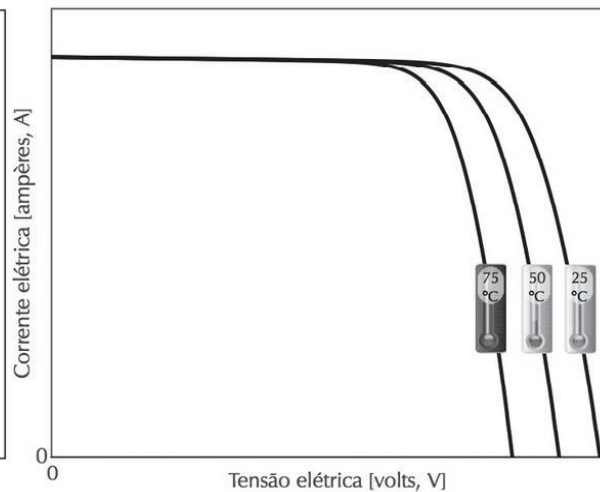
As figuras a seguir ilustram a curva I-V considerando a condição climática e a temperatura.

Figura 12 – Influência do clima



Fonte: (BASTOS, 2018)

Figura 13 - Influência da temperatura

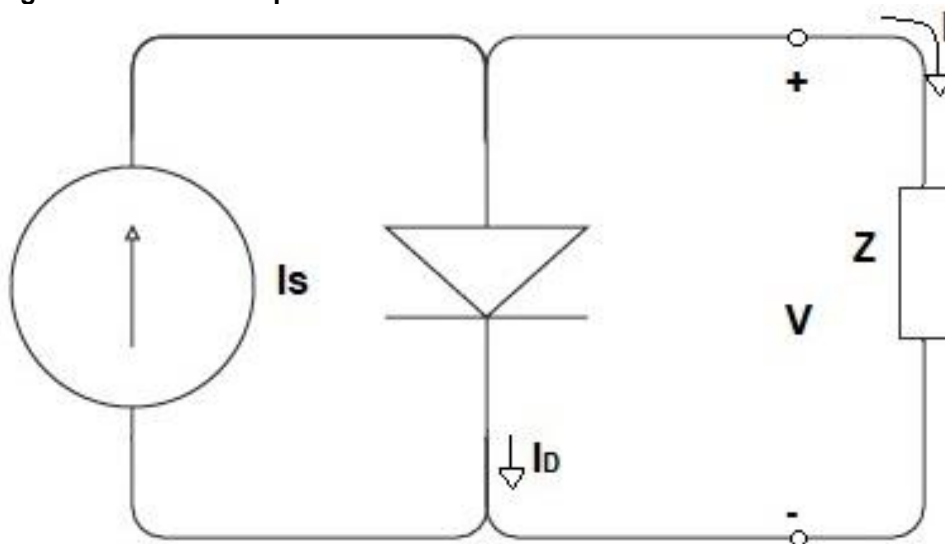


Fonte: (BASTOS, 2018)

2.4 MODELO MATEMÁTICO

Para a obtenção de um modelo matemático simplificado, pode-se considerar o circuito equivalente a seguir:

Figura 14 - Circuito Equivalente



Fonte: Autoria Própria

A fonte de corrente I_s representa a corrente gerada pela radiação luminosa quando atingem a célula, considera-se que é uma corrente unidirecional e constante. Conforme o circuito, a junção P-N é representada pelo diodo, que dependerá da tensão V dos terminais da célula.

A corrente que circulará sobre a carga (representada como Z) e pelo diodo será respectivamente:

$$I = I_s - I_D \quad (1)$$

$$I_D = I_0 * \left[e^{\frac{m*V}{V_T}} - 1 \right] \quad (2)$$

$$V_T = \frac{K * T}{q} \quad (3)$$

Onde:

I_0 = corrente de saturação reversa do diodo [A];

I_D = corrente característica do diodo [A];

I_s = corrente gerada pela radiação solar [A];

V = tensão nos terminais das células [V];

m = fator de idealidade do diodo (diodo ideal=1, diodo real $m>1$);

V_T = potencial térmico [J];

V = tensão nas células fotovoltaicas [V];

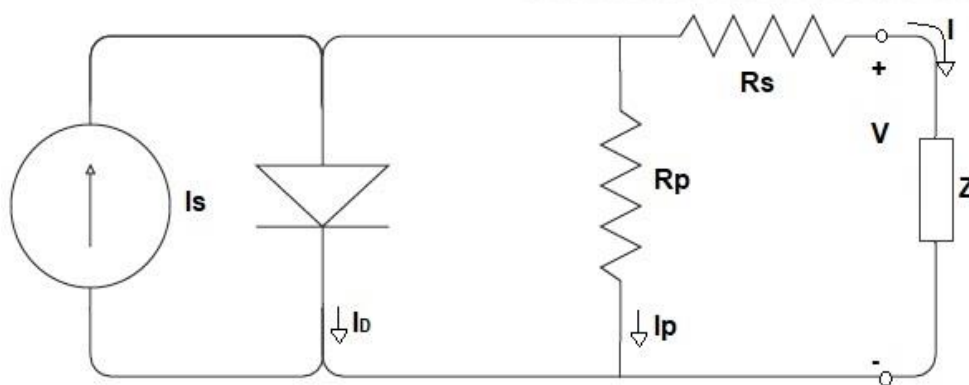
K = constante de Boltzmann [$K=1,38*10^{-23}$ J/K];

T = temperatura absoluta da célula [$0^\circ\text{C} = 273,16^\circ\text{K}$];

q = carga do elétron [$q=1,6*10^{-19}\text{C}$].

Quando consideramos as correntes de fuga e a queda de tensão nos contatos exteriores, chega-se a um novo modelo mais detalhado que o anterior. O valor destas resistências dependerá de cada fabricante, que deverá fornecer tais dados.

Figura 15 - Circuito detalhado



Fonte: Autoria própria

Neste caso, a corrente que passará na carga será:

$$I = I_s - I_D - I_P \quad (4)$$

$$I = I_s - I_0 * \left[e^{\frac{V + (R_s * I)}{m * V_T}} - 1 \right] - \frac{V + (R_s * I)}{R_p} \quad (5)$$

Onde:

I_p = corrente estabelecida através da modelagem de R_s e R_p [A];

R_s = resistência em série equivalente do painel [Ω];

R_p = resistência paralela equivalente [Ω];

Alguns parâmetros elétricos são levados em consideração, já que caracterizam as células ou os módulos fotovoltaicos, como tensão de circuito aberto, corrente de curto-circuito, fator de forma e eficiência, que serão descritos a seguir (SAUTHIER, 2019).

As resistências em série e paralelo tem uma influência muito grande na curva corrente-tensão da célula, ocasionando em redução do fator de forma e, assim, reduzindo sua eficiência.

2.4.1 Tensão de Circuito Aberto

A tensão de circuito aberto (V_{oc}) é inversamente proporcional à temperatura da junção P-N e corresponde a máxima tensão que o painel poderá fornecer. É

determinada através do nível de tensão quando existe corrente, dependendo da corrente de saturação e da corrente elétrica foto gerada (SAUTHIER, 2019).

$$V_{oc} = V_T * \ln\left(\frac{I_s}{I_0} + 1\right) \quad (6)$$

Onde:

V_{oc} = Tensão de circuito aberto [V];

2.4.2 Corrente de Curto Circuito

A corrente de curto circuito (I_{sc}) é a corrente máxima que pode ser obtida em uma célula fotovoltaica, caso seus terminais sofram um curto. Esta corrente é a soma de todas as contribuições de corrente de cada parte das regiões tipo n, tipo p e a região de depleção e pode ser obtida através de:

$$I_{sc} = \frac{I_{sc}^*}{G^*} * G_{eff} \quad (7)$$

Onde:

G_{eff} = é a irradiação incidente sob a célula [W/m^2];

I_{sc}^* e G^* = são a corrente de curto-circuito [mA] no STC (do inglês, *Standard Test Conditions* – ensaios sob condições estabelecidos por norma internacional) e a irradiância [W/m^2] no STC, respectivamente.

A corrente de curto circuito possui um crescimento linear com o aumento da irradiância e, em baixos níveis, a tensão irá decrescer de forma logarítmica (SAUTHIER, 2019).

2.4.3 Fator de Forma

O fator de forma (FF) é um parâmetro que em conjunto com a corrente de curto-circuito e a tensão de circuito aberto, determina a potência máxima de uma célula solar. É definido através da relação entre a potência máxima da célula solar e o produto entre I_{sc} e V_{oc} conforme a equação (8):

$$FF = \frac{V * I}{V_{oc} * I_{sc}} \quad (8)$$

2.4.4 Eficiência

O desempenho de uma célula solar é comparado através da eficiência (η), que consiste em uma relação entre a potência elétrica produzida pela célula fotovoltaica e a potência solar incidente.

$$\eta = \frac{I_{sc} * V_{oc} * FF}{A * G} \quad (9)$$

Onde:

A= área da célula [m^2];

G= irradiância solar incidente [W/m^2].

2.5 INVERSOR

O Inversor c.c./ c.a. é o responsável pela conversão da potência em corrente contínua - resultante das placas fotovoltaicas - em corrente alternada que, quando em qualidade aceitável, é injetada na rede de distribuição.

Os inversores estáticos utilizam componentes semicondutores para a comutação entre o modo corte (desligado) e o modo saturação/condução (ligado). Com isso, o sinal resultante será quadrado, o qual facilmente é convertido em sinal senoidal com o auxílio de filtros de potência. Já o uso de bobinas e capacitores para o filtro dos harmônicos resultará em redução da eficiência do sistema.

A principal função de um inversor é regular o valor de sua saída e para isso existem três formas diferentes.

- Regulagem por autotransformador;
- Regulagem da tensão antes do inversor (conversão c.c./ c.c.);
- Regulagem da tensão do inversor por meio de seu sistema de controle.

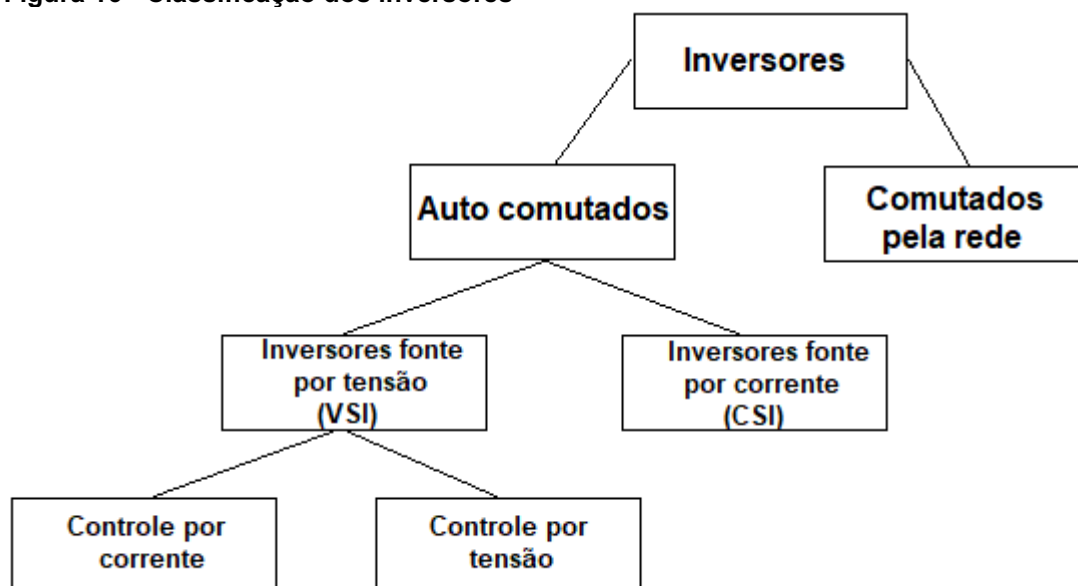
2.5.1 Comutação de Inversores

As classificações dos inversores usados em sistemas fotovoltaicos são: auto comutados e comutados pela rede.

A figura 17 apresenta a classificação dos inversores conforme sua operação. Enquanto os inversores auto comutados podem ser usados conectados ou não na rede, os inversores comutados pela rede apenas podem ser utilizados caso estejam conectados à rede.

Os inversores auto comutados podem ser conectados à rede de distribuição devido a sua capacidade de sincronização da saída de tensão alternada com a rede elétrica. Essa sincronização deve-se aos semicondutores que tem como propriedade, serem colocados em corte ou em condução a qualquer instante do ciclo por meio de um terminal de controle, sendo operados independentemente. Tais inversores são operados por PWM (Pulse With Modulation – Modulação por largura de pulso) e normalmente sua comutação ocorre em alta frequência e resultará em um sinal senoidal, com baixos harmônicos e alto fator de potência.

Figura 16 - Classificação dos inversores



Fonte: (RAMPINELLI, KREZINGER e ROMERO, 2013)

Os inversores comutados pela rede são baseados em tiristores (componentes semicondutores com dois estados estáveis baseados na realimentação regenerativa PNP) e só funcionam quando a tensão alternada está presente. Estes inversores são restritos a sistemas com altíssima potência, acima de 100 kW devido a operarem com baixo fator de potência e alto nível de distorção harmônica.

2.5.2 Tipos de Inversores

Os sistemas fotovoltaicos utilizam inversores de tensão chaveados para o condicionamento e sincronismo da saída do arranjo com a rede elétrica. O controle tem duas funções principais:

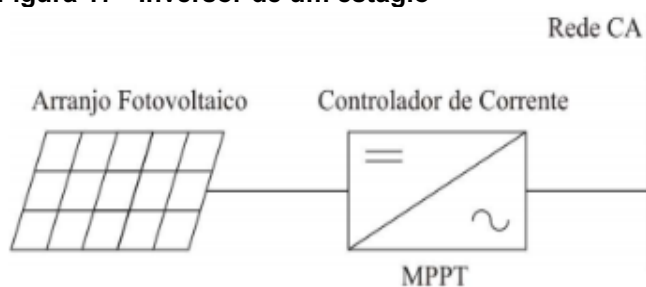
- Mapeamento do ponto de máxima potência (MPPT) do arranjo fotovoltaico;
- Injetar na rede uma corrente senoidal com um fator de potência próximo ao unitário (CASARO e MARTINS, 2010)

Existem três tipos principais de inversores, são eles:

2.5.2.1 Inversores de um estágio

Utilizado em sistemas de potência em 20 a 400 kW, sua conexão baseia-se na ligação dos arranjos de forma a existir um único MPPT, ou seja, em apenas um único estágio de processamento são realizados os MPPT e o controle de corrente injetada na rede.

Figura 17 - Inversor de um estágio

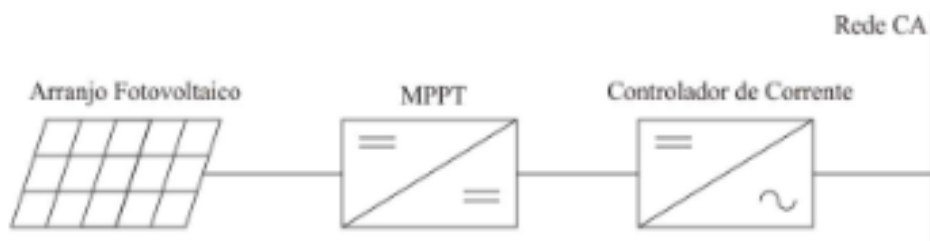


Fonte: (CASARO e MARTINS, 2010)

2.5.2.2 Inversor de dois estágios

Um inversor c.c./ c.c. será responsável pelo MPPT e outro inversor c.c./ c.a. será responsável pelo controle da corrente que será injetada na rede.

Figura 18 - Inversor de dois estágios

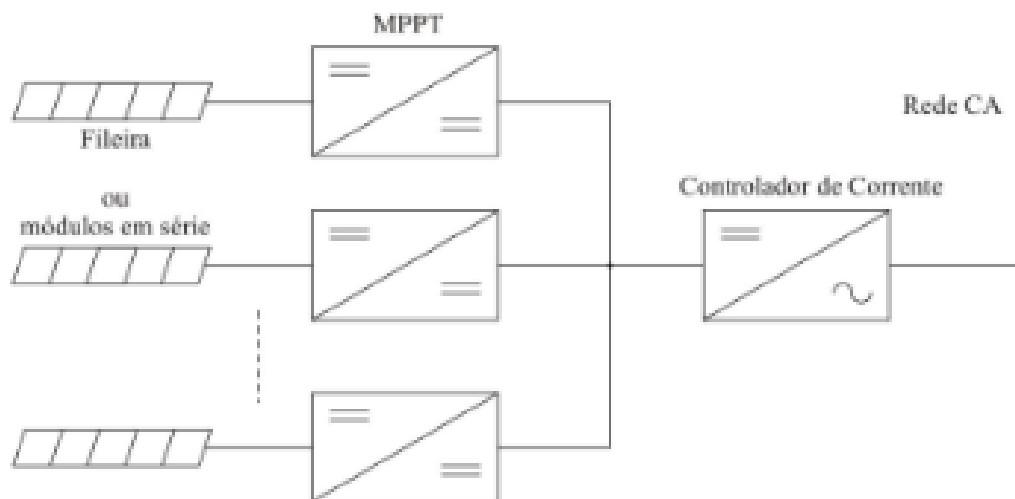


Fonte: (CASARO e MARTINS, 2010)

2.5.2.3 Inversor multi-estágios

Neste, cada módulo ou arranjo é ligado a um inversor c.c./ c.c., o qual sua responsabilidade será o MPPT e após, todos eles serão conectados a um inversor c.c/ c.a. que será responsável pela sincronização, além da conversão para corrente alternada.

Figura 19 - Inversor multi-estágio

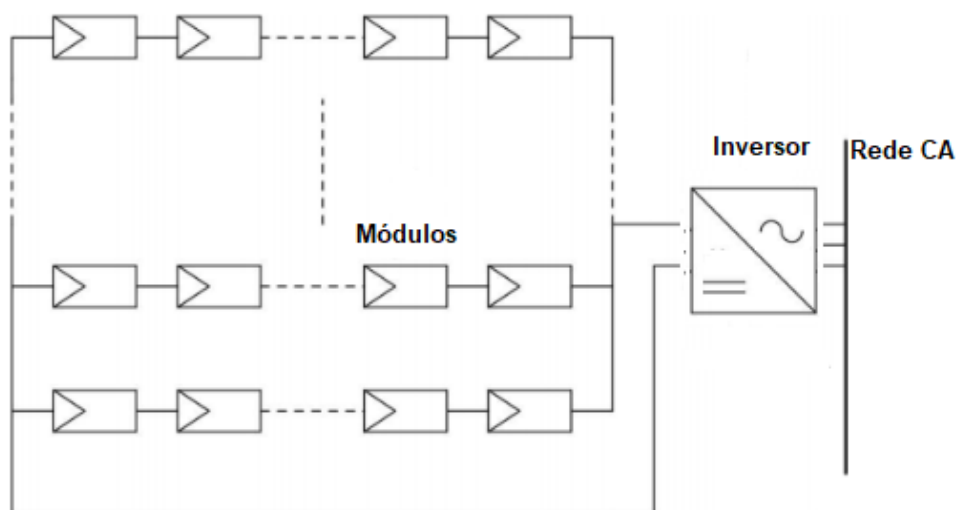


Fonte: (CASARO e MARTINS, 2010)

Na questão da topologia, apresentam-se quatro configurações diferentes:

- Inversor central – o arranjo fotovoltaico é conectado apenas a um inversor, conforme figura 21:

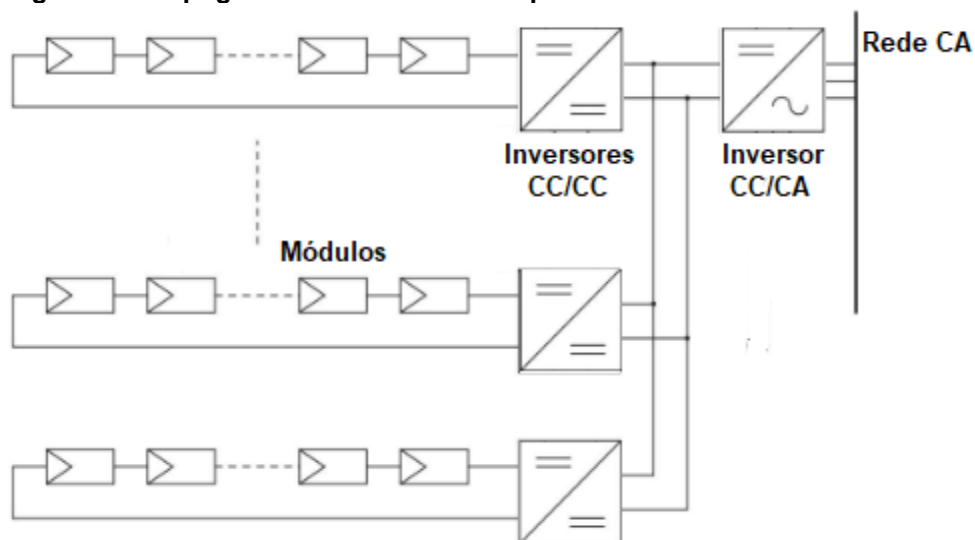
Figura 20 - Inversor central



Fonte: (CASARO e MARTINS, 2010)

- CC em paralelo – o arranjo fotovoltaico é conectado a um inversor c.c./ c.a. e após, a um único inversor c.c./ c.a.

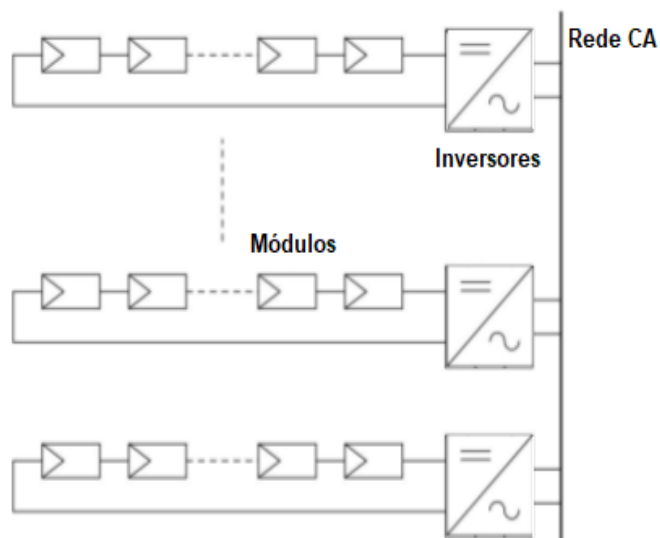
Figura 21 - Topografia inversores CC em paralelo



Fonte: (CASARO e MARTINS, 2010)

- CA em paralelo – cada arranjo fotovoltaico será conectado a um inversor de um estágio e todos ficarão em paralelo com a rede CA.

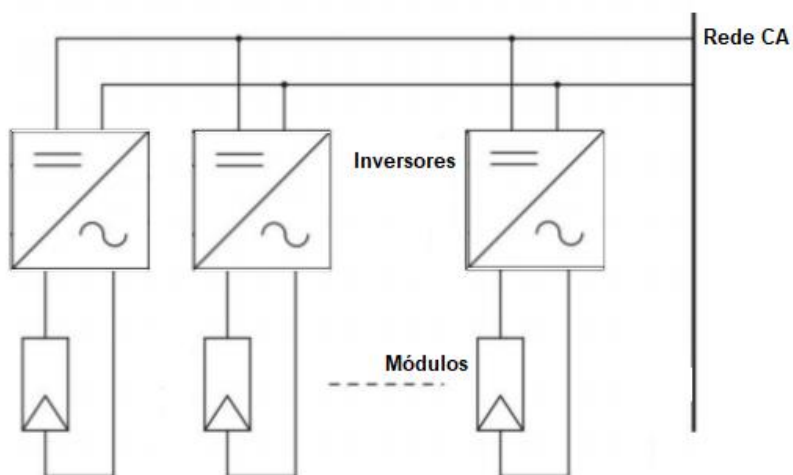
Figura 22 - Topologia CA



Fonte: (CASARO e MARTINS, 2010)

- Inversor integrado – cada módulo fotovoltaico conterá um pequeno inversor, que serão conectados em paralelo pelo lado CA a rede.

Figura 23 - Topologia dos Inversores integrados



Fonte: (CASARO e MARTINS, 2010)

O quadro 2 contém a relação entre as topologias dos inversores conectados à rede e as possíveis configurações dos sistemas fotovoltaicos.

Quadro 2 - Comparativo topologia e configuração do sistema

| TOPOLOGIAS CONFIGURAÇÕES | INVERSOR DE UM ESTÁGIO | INVERSOR DE DOIS ESTÁGIOS | INVERSOR MULTI-ESTÁGIOS |
|---|---|--|--|
| Inversor centralizado | ✓ | ✓ | x |
| Inversor CC paralelo | x | x | ✓ |
| Inversor CA paralelo | ✓ | ✓ | x |
| Inversor integrado | ✓ | ✓ | x |

Fonte: (CASARO e MARTINS, 2010)

2.6 PLANEJAMENTO ESTRATÉGICO E TOMADA DE DECISÃO

A etapa fundamental quando o assunto é implementar uma gestão estratégica de objetivos e metas é a definição de quais serão os indicadores utilizados para mensurar os resultados, servindo assim como um guia para que sejam tomadas as decisões durante o processo.

Segundo Chiavenato (CHIAVENATO, 1997) todo o planejamento estratégico é resultado de processos decisórios e, para evitar possíveis erros e equívocos, faz-se necessário sistematizar e organizar as opções em algumas etapas a serem obedecidas. A primeira é a identificação do problema; na sequência, enumerar as alternativas de solução, selecionar a mais benéfica, implementar a ação e, finalmente verificar se o objetivo foi atingido.

Tendo estas decisões em pauta, pode-se selecionar entre diversas ferramentas que existem para auxiliar no processo de forma técnica e racional considerando as informações anteriormente apresentadas. Dentre tantas ferramentas que podem propor soluções para manter a qualidade do sistema podemos destacar algumas mais usadas, que serão também utilizadas neste trabalho, como:

- Fluxograma;
- Diagrama de Ishikawa e
- 5W1H.

Cada uma destas ferramentas da qualidade será brevemente apresentada nas seções a seguir.

2.7 FLUXOGRAMA

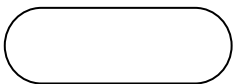
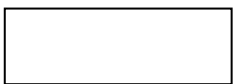
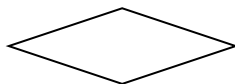
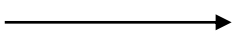

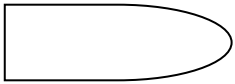
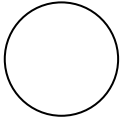
O fluxograma é uma ferramenta da qualidade capaz de tornar um processo mais interativo, intuitivo e visual, com o uso de símbolos em sequência.

Dentro do gerenciamento de processos, o fluxograma tem como objetivo principal a garantia da qualidade assim com o a produtividade dos trabalhadores.

Dentre tantas as vantagens, pode-se ressaltar que esta ferramenta melhora a qualidade da compreensão de todo processo, pois mostra o passo a passo a ser seguido, criando um padrão. A demonstração da sequência e interação entre o processo torna fácil a identificação dos erros e falhas além da possibilidade de ser usada como uma fonte para a análise crítica e para consultas rápidas em caso de dúvidas.

O Quadro 3 descreve cada um dos símbolos que são mais usados, porém, vale lembrar que a utilização dos símbolos não é obrigatória.

Quadro 3 - Simbologia padrão do fluxograma

| SÍMBOLO | DESCRIÇÃO |
|---|---|
|  | Indica o início ou o final de um processo |
|  | Indica a atividade a ser executada |
|  | Indica a tomada de decisão |
|  | Indica a direção do fluxo |
|  | Indica os documentos utilizados no processo |
|  | Indica um momento de pausa/ espera |
|  | Indica que o fluxograma continua a partir desse ponto em outro círculo. |

Fonte: (JEISON E MEIRE, 2018)

2.8 DIAGRAMA DE ISHIKAWA

Também conhecido como Diagrama de causa e efeito, é uma ferramenta da qualidade que ajuda no levantamento das causas de um problema, analisando assim, diversos fatores que envolvam um projeto.

Segundo Jeison (JEISON E MEIRE, 2018) o diagrama foi criado na década de 60 por Kaoru Ishikawa e leva em conta todos os aspectos que podem ter levado à ocorrência do problema, reduzindo as chances de esquecimento de algum detalhe.

Para este diagrama, todos os problemas possuem causas específicas que devem ser testadas uma a uma para a comprovação do que efetivamente causa o problema, ficando mais fácil de eliminá-lo, ou seja, “eliminando as causas, elimina-se o problema”.

Não existe um contexto específico para a aplicação do Diagrama de Ishikawa. Assim, independente da área de aplicação, pode-se esperar:

- Melhorar os processos;
- Ampliar a visão de possíveis causas de um problema;
- Identificar soluções – criar planos de ação;

A análise de causas dá-se através de alguns passos: primeiramente, deve-se definir um problema (efeito) a ser analisado; seguido por um *brainstorming* (tempestade de ideias – levantamento das causas que podem gerar os problemas); as causas devem ser separadas em categorias principais de forma coerente ao problema.

Para facilitar, existe uma pré-seleção das categorias, os 6Ms (máquina, materiais, mão-de-obra, meio-ambiente, método e medida), que podem ser trocados e/ou selecionados os itens que são mais importantes para execução.

2.9 PLANO DE AÇÃO OU 5W1H

O método 5W1H baseia-se em um método para auxiliar na elaboração de um plano de ação que terá detalhes sobre prazos, responsáveis e a maneira que será executado. Para Silva e Roratto (SILVA, RORATTO, *et al.*, 2013), este método

permite uma ampla visão dos recursos utilizados para que seja possível a solução do problema, sendo fácil a compreensão por todos os envolvidos neste plano.

Esta ferramenta da qualidade consiste em responder seis perguntas:

- *What?* (O que?);
- *Who?* (Quem?);
- *When?* (Quando?);
- *Why?* (Por quê?);
- *Where?* (Onde?);
- *How?* (Como?).

Existe ainda planos de ações que contém 1 H a mais, que representará o *How much?* (Quanto?) responsável pela parte financeira do projeto, tornando-se assim, 5W2H.

Esta metodologia definirá o que será feito, quem realizará a ação, quando será feito, por que será feito, como será feito e em alguns casos quanto custará tal ação.

2.10 MANUTENÇÃO

A manutenção baseia-se em um conjunto de operações para assegurar o correto funcionamento da instalação fotovoltaica de uma forma constante e com melhor rendimento energético possível, conservando a segurança do serviço e a defesa do meio ambiente (PEREIRA, 2012).

Os painéis requerem pouca manutenção, uma vez que foram projetados para suportar as mais diversas condições atmosféricas.

Para Gerbran (GERBRAN, 2014), o objetivo da manutenção é fazer com que os elementos e componentes dos equipamentos não percam suas características.

Uma manutenção adequada é resultado de três fatores que devem ser realizados, fatores estes que serão explicados um a um no item a seguir:

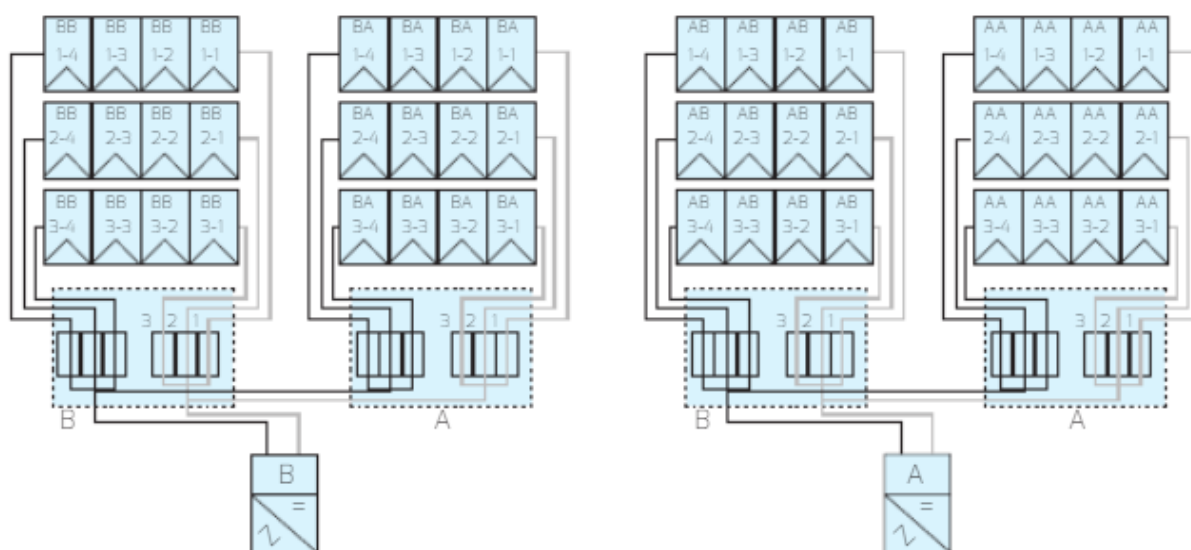
- Plano de vigilância;
- Plano de manutenção preventiva e
- Plano de manutenção corretiva.

Para que a manutenção seja realizada sem problemas a mais, na instalação deverão atentar-se as nomenclaturas em lugares chaves onde se usa letras e números para a devida identificação pontual:

- 1ª letra: identificação de inversores;
- 2ª letra: identificação dos quadros de distribuição;
- 1º número: identificação das *strings* ou ramos em paralelo;
- 2º número: identificação dos módulos em série de cada *string*.

Para exemplificar a nomenclatura, na figura 23 (PEREIRA, 2012) temos 2 inversores (A e B) onde cada um está ligado a dois quadros de distribuição (A e B), nos quadros de distribuição estão 3 *strings* conectadas em paralelo (1, 2 e 3) e quatro módulos fotovoltaicos em cada um (1, 2, 3 e 4). Sendo assim, caso ocorra de um módulo apresentar defeito, ele será localizado da seguinte maneira: AB1-3.

Figura 24 - Nomenclatura dos pontos chaves



Fonte: (PEREIRA, 2012)

2.10.1 Plano de Vigilância

O plano de vigilância é baseado no acompanhamento dos parâmetros funcionais como a produção de energia, níveis de corrente e tensão além da limpeza dos módulos, quando necessário. Nada mais é, que uma simples verificação a partir de observações do sistema (PEREIRA, 2012).

2.10.2 Plano de Manutenção Preventiva

Este tipo de manutenção é aquele que é realizada de acordo com critérios preestabelecidos para reduzir a probabilidade de falha de um bem ou de degradação de um serviço efetuado (PAPA, 2017).

Em sistemas com capacidade de produção inferiores a 5kW, a manutenção preventiva so sistema é aconselhada a cada 12 meses. Nos sistemas com capacidade superior a 5kW é indicado que a manutenção preventiva seja realizada a cada 6 meses, exceto pra os equipamentos de monitoramento, indicados com 12 meses (PEREIRA, 2012).

2.10.3 Manutenção Corretiva

A manutenção corretiva deverá ser a menos utilizada, visto que esta apenas existe quando o equipamento sistema apresenta falhas, ou seja, esta manutenção é realizada para corrigir as causas e os efeitos de ocorrências constatadas (DRABACH, SACARIN e SHATALOFF, 2019).

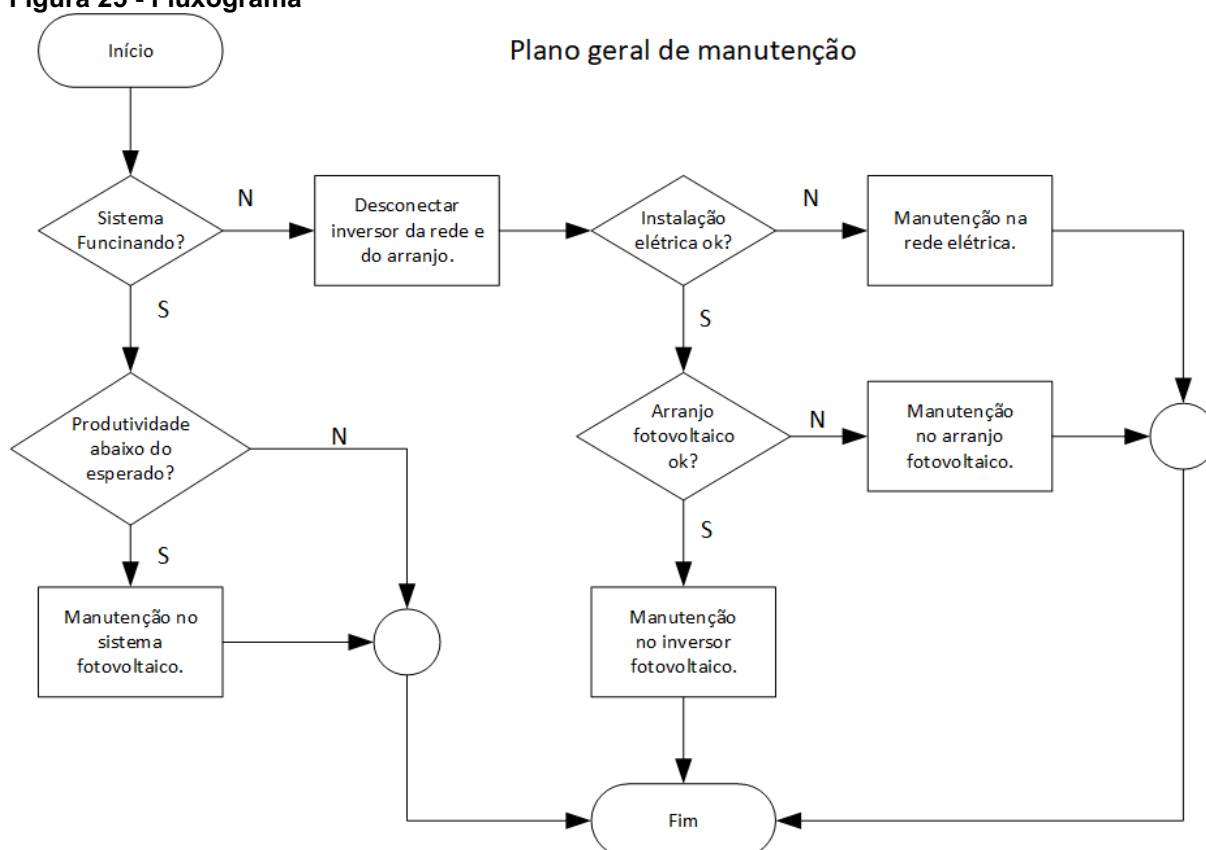
Devido ao seu elevado custo e tempo fora de serviço, à manutenção corretiva deverá ser evitada, para isso deve-se investir em outros tipos de manutenção para não seja necessário chegar a este extremo (PAPA, 2017).

3 METODOLOGIA

Baseado na fundamentação teórica apresentada anteriormente, o primeiro passo do levantamento qualitativo de sistemas fotovoltaicos será o processo de planejamento. Nesta etapa, conforme descrito por Silva e Roratto (SILVA, RORATTO, *et al.*, 2013), foram realizados os seguintes passos: Identificação do problema, observação, análise do processo e o plano de ação. Para nosso processo, como já explanado, utilizaram-se as seguintes ferramentas da qualidade: Fluxograma, Diagrama de Ishikawa e Plano de Ação.

Conforme o fluxograma abaixo foi possível observar os passos para a avaliação dos possíveis defeitos em cada parte do sistema, ocasionando uma menor produtividade de energia.

Figura 25 - Fluxograma



Fonte: Autoria própria

Para o trabalho apresentado, mudou-se o padrão 6M do Diagrama de Ishikawa, adaptando conforme o fluxograma, sendo assim, foi executado da seguinte forma:

Quadro 4 - Definições do diagrama de Ishikawa

| PROBLEMA | CATEGORIAS |
|---------------|----------------------|
| FUNCIONAMENTO | Rede elétrica |
| | Arranjo fotovoltaico |
| | Inversores |
| | Mão-de-obra |
| | Meio ambiente |
| | Sistema fotovoltaico |

Fonte: Autoria própria

Com o desmembramento do sistema fotovoltaico, ficará ainda mais fácil a realização do levantamento, momento em que serão apontadas as diversas causas para a falha de baixa produtividade, causas estas apresentadas em ordem alfabética. O levantamento foi feito a partir de pesquisas com instaladores, empresas e fabricantes.

Quadro 5 - Levantamento de causas

| CAUSAS | DEFINIÇÃO |
|--|--|
| Acúmulo de sujeira | Quando instalado em local de poucas chuvas, com pouca inclinação e com material particulado no ambiente, os módulos podem acabar sujos de pó e poeira; |
| Andar sobre os módulos | Embora as placas suportem inclusive o granizo, andar sobre as placas podem ocasionar danos irreversíveis e provavelmente invisíveis a olho nu; |
| Arranhão na parte traseira | A falta de cuidado na hora de embalar, transportar ou instalar poderá causar o rompimento da vedação, resultando na penetração da umidade; |
| Associação, inclinação e orientação dos módulos. | Em telhados com diferentes orientações, muito recortado, se os módulos estiverem em direções e inclinações diferentes, ligados a uma mesma entrada de MPPT, haverá uma perda de geração de energia considerável, fazendo com que o MPPT não consiga trabalhar em seu ponto de máxima potência; |
| Baixa qualidade das partes do sistema | Além da falta de segurança, a baixa qualidade dos equipamentos envolvidos na geração de energia será responsável pela baixa produção; |
| Baixa qualidade do vidro | Pouca resistência a elementos externos; |
| Condutores | Visto que são elementos sujeitos a grandes intempéries, devem ter proteção UV além da boa isolamento para evitar fugas de energia; |
| Corrosão na caixa | A umidade pode vir a danificar as conexões e cabeamentos; |

| | |
|---|---|
| de conexão | |
| Dimensionamento do inversor | Quando um inversor é conectado a mais painéis que sua capacidade, sua eficiência cai consideravelmente; |
| Diodo by-pass | É um dispositivo responsável pelo desvio da corrente quando surgem pontos sombreados, criando um caminho de menor resistência para a corrente fluir; |
| Estrutura inadequada | É preciso que a estrutura seja adequada para aguentar todas as intempéries, degradação ou qualquer problema ao longo dos 25 anos garantidos; |
| Falta de equipotencialização ou aterramento | Segundo a NBR5410 todas as partes metálicas como frame dos módulos, estrutura de fixação, carcaça de transformadores e do inversor devem ser equipotencializadas, ou seja, interligadas por condutores de proteção, de modo que não haja diferença de potencial entre elas; |
| Falta de monitoramento | Será a forma mais rápida para descobrir problemas no sistema, a falta de acompanhamento causará falta de eficiência; |
| Falta de segurança | Conforme NR 10 e NR 35; |
| Ferramentas inadequadas | O uso de ferramentas inadequadas na hora da instalação pode gerar sérios problemas, como a isolação do cabeamento precário fugas de corrente, entre outras; |
| Fusíveis/ aterramento | São empregados para proteger o sistema, ou parte dele, contra sobre correntes que podem ser resultado de faltas a terra ou de correntes de curto-circuito em algum equipamento do sistema, principalmente quando se liga <i>strings</i> e subarranjos em paralelo; |
| Impactos de objetos | Sejam acidentais ou premeditados; |
| Insetos | Tanto nas placas quanto nas caixas de conexão podem vir a causar curtos-circuitos, pontos quentes, dentre outros; |
| Microfissuras | Pressão sobre os painéis, ou tempo de uso geralmente são as causas. Nem sempre são visíveis e fáceis de encontrar; |
| Moldura amassada | Poderá ocasionar em perda de isolação, permitindo umidade ou entrada de insetos; |
| Pontos quentes | Elevação da temperatura em determinados pontos, ocasionando a perda da placa solar; |
| Proteção CC e CA na mesma caixa de junção | Segundo a NBR5410 os cabos de duas alimentações (voltagens) diferentes não podem compartilhar o mesmo espaço; |
| Separação das camadas | A delaminação, causando perda de isolação nas partes da placa, permitindo assim a umidade entre as partes; |
| Soldas | Todas as soldas estão diretamente relacionadas com a eficiência. Pontos quentes podem surgir quando não devidamente feitas; |
| Sombreamento | A exposição ao sol está diretamente relacionada à sua eficiência; |

Fonte: Autoria própria

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

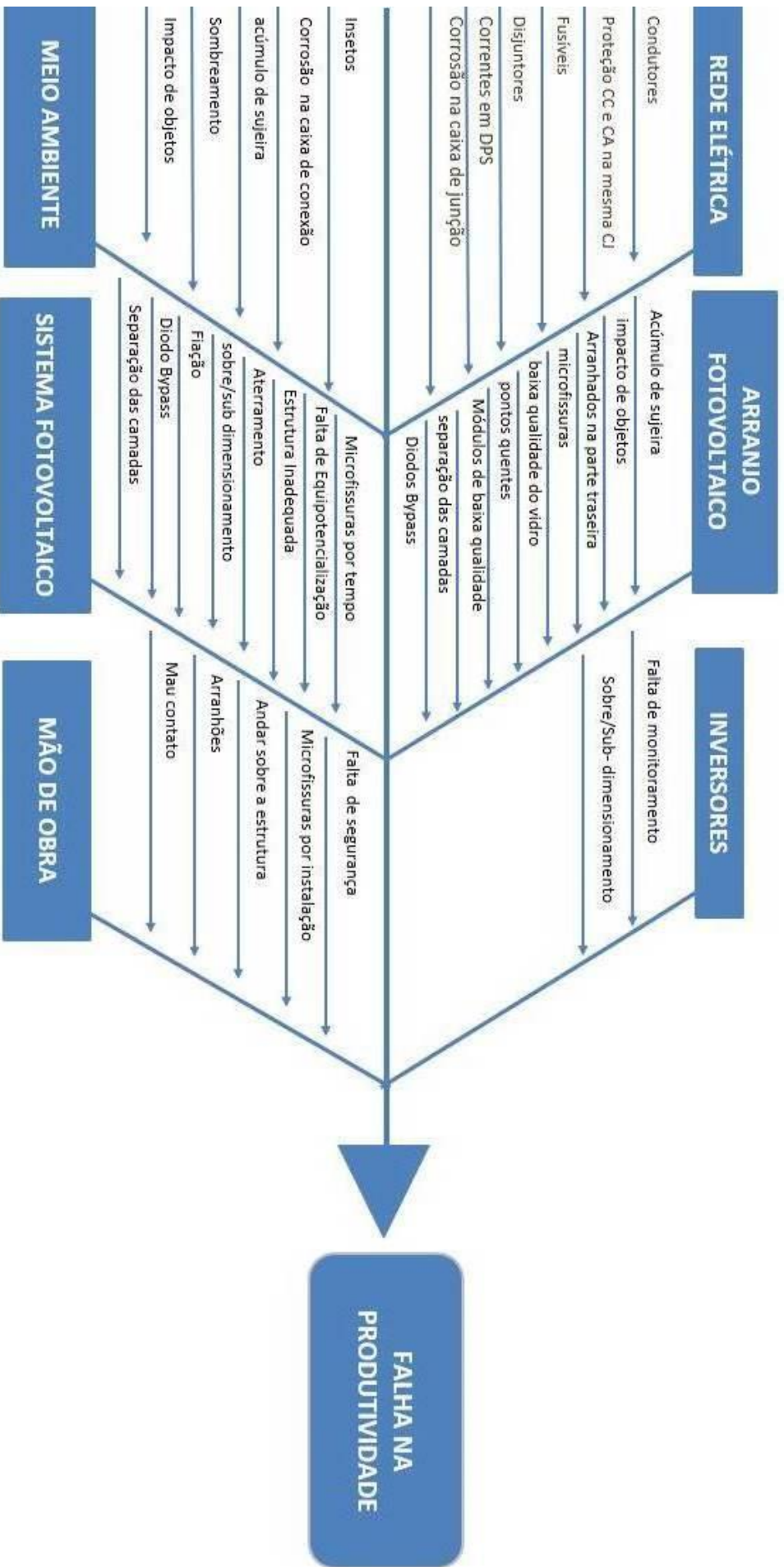
Conforme o levantamento realizado, junto com a metodologia apresentada, foi possível chegar ao Diagrama de Ishikawa (figura 25). Considerou-se ainda, que os sistemas devem obedecer a normas vigentes para a venda, instalação e monitoramento, mesmo assim, consideraram-se os erros que possam vir a acontecer por descuido da equipe técnica.

Além disso, existem ainda os casos em que independente da ação humana e cuidado do sistema pode acarretar a redução de produtividade, também considerados neste levantamento.

Por fim, conforme a separação das categorias apresentadas na metodologia separou-se as causas onde não necessariamente estará uma causa em apenas uma categoria.

Com o diagrama e o fluxograma devidamente elaborados, foi possível chegar aos planos de ações que compõe o plano de manutenção do sistema fotovoltaico, apresentados a seguir:

Figura 26 - Diagrama de Ishikawa



Fonte: Autoria própria

Quadro 6 - Plano de ação - rede elétrica

| REDE ELÉTRICA | |
|----------------------|--|
| <i>What</i> | Desconectar os elementos que não pertencem à rede elétrica, como os inversores e painéis e averiguar todos os componentes elétricos do sistema. |
| <i>Who</i> | Engenheiros ou técnicos responsáveis pela instalação |
| <i>When</i> | Assim que uma avaria no monitoramento seja percebida |
| <i>Why</i> | Falha devido aos conectores e a fiação são as mais fáceis de encontrar, sendo assim são as mais fáceis de correção para que o sistema volte a funcionar a pleno poder. |
| <i>Where</i> | Cabos e conectores das placas, inversores, disjuntores de corrente contínua e de corrente alternada, fusíveis e demais protetores. |
| <i>How</i> | Usando instrumentos de medição. |

Fonte: Autoria própria

Quadro 7 - Plano de ação - arranjo fotovoltaico

| ARRANJO FOTOVOLTAICO | |
|-----------------------------|--|
| <i>What</i> | Conferir como está a limpeza disposição e conexão dos painéis solares fotovoltaicos |
| <i>Who</i> | Engenheiros ou técnicos responsáveis pela instalação |
| <i>When</i> | Após a conferência e devido descarte de problemas com a rede elétrica do sistema |
| <i>Why</i> | Os painéis solares além de sua vida útil e garantia de produtividade são suscetíveis a intempéries que podem causar baixa produtividade. |
| <i>Where</i> | Painéis solares fotovoltaicos |
| <i>How</i> | Averiguar visualmente a qualidade e por meio de comparação com as medidas iniciais em relação ao tempo que possui a instalação. |

Fonte: Autoria própria

Quadro 8 - Plano de ação - inversores

| INVERSOR FOTOVOLTAICO | |
|------------------------------|--|
| <i>What</i> | Embora o equipamento mais fácil de apresentar defeitos, os inversores normalmente identificam seus defeitos logo que acontecem. |
| <i>Who</i> | Engenheiros e técnicos responsáveis pela instalação ou responsável pelo acompanhamento de produtividade |
| <i>When</i> | Depois de verificados as etapas anteriores e não houver motivo para redução na produtividade ou então assim que o inversor mostrar em seu painel que existe alguma avaria no sistema |
| <i>Why</i> | Podem apresentar defeitos relativos à conversão de energia CC em energia CA |
| <i>Where</i> | Inversores |
| <i>How</i> | Substituição de peças defeituosas ou do inversor por completo |

Fonte: Autoria própria

Quadro 9 - Plano de ação - sistema fotovoltaico

| SISTEMA FOTOVOLTAICO | |
|-----------------------------|---|
| <i>What</i> | O sistema fotovoltaico engloba as partes não especificadas anteriormente como a estrutura, equipotencialização, aterramento e a verificação também dos problemas relacionados ao meio ambiente, já que, neste caso, provavelmente não haverá muita coisa a ser feita considerando serem motivos além da vontade humana. |
| <i>Who</i> | Engenheiros responsáveis pela instalação |
| <i>When</i> | Quando descartado todo e qualquer outra parte do plano de manutenção |
| <i>Why</i> | É a última etapa a ser realizada devido a incluir os mínimos detalhes do sistema, aqueles que terão menores chances de defeitos. |
| <i>Where</i> | Demais partes ainda não verificadas, além de condições ambientais. |
| <i>How</i> | Devem-se averiguar as condições ambientais e estruturais minimalistas |

Fonte: Autoria própria

5 CONCLUSÃO

Atualmente os consumidores levam em consideração principalmente os aspectos financeiros e ambientais, o que leva a maior procura pela energia solar fotovoltaica. Devido a esse constante crescimento nas vendas, um desafio é manter a qualidade dos sistemas por maior tempo, por esse motivo a manutenção é uma preocupação.

Para agilizar tal manutenção, seja preventiva ou corretiva, o trabalho apresentado criou planos de ações para o levantamento e priorização de possíveis defeitos em instalações fotovoltaicas, onde foram apresentados os passos a serem seguidos através de um fluxograma.

Levou-se em consideração que os sistemas fotovoltaicos devem ser acompanhados por uma equipe especializada sendo composta por um engenheiro electricista além de técnicos para a instalação segura de equipamentos devidamente certificados.

Apesar de uma tecnologia ainda considerada cara, os sistemas fotovoltaicos possuem uma alta confiabilidade, sendo possível sua instalação nas mais diversas áreas onde nem sempre as redes tradicionais serão acessíveis. Devido a isso, é muito importante que exista apoio a pesquisas relacionadas à eficiência e assim criem-se incentivos governamentais, já que a diversidade da matriz energética traria muitos benefícios para toda a sociedade.

REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5410: Instalações Elétricas de Baixa Tensão**. Rio de Janeiro. 2004.

ABSOLAR. Infográfico Absolar. **Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica**, 2020. Disponível em: <<http://www.absolar.org.br/infografico-absolar.html>>. Acesso em: 05 agosto 2020.

ANEEL. **Informações Gerenciais**. Agência Nacional de Energia Elétrica. [S.l.]. 2019.

ARAÚJO, E. Garantia dos equipamentos fotovoltaicos: de quem é a responsabilidade? **Canal Solar**, 2020. Disponível em: <<http://canalsolar.com.br/noticias/item/720-garantia-dos-equipamentos-fotovoltaicos-de-quem-e-a-responsabilidade>>. Acesso em: 17 julho 2020.

BASTOS, W. D. S. **Estudo de Caso de um Projeto Fotovoltaico Integrado à Edificação**. Monografia (Engenharia Elétrica) -UFPB. Paraíba, p. 74. 2018.

BRAGA, R. P. **Energia Solar Fotovoltaica: Fundamentos e Aplicações**. Monografia (Engenharia Elétrica) - UFRJ. Rio de Janeiro, p. 80. 2008.

BRITO, M. C.; SILVA, J. A. Renergia Fotovoltaica: Conversão de energia solar em eletricidade. **O Instalador**, Lisboa, v. 1, n. 1, p. 7, Julho 2006.

CAMARGO, L. T. **Projeto de Sistemas Fotovoltaicos Conctados à Rede Elétrica**. Monografia (Engenharia Elétrica) - UEL. Londrina, p. 103. 2017.

CASARO, M. M.; MARTINS, D. C. Processamento Eletrônico da Energia Solar Fotovoltaica em Sistemas Conectados à Rede Elétrica. **Revista Controle & Automação**, v. 21, n. 2, p. 159-172, Abril 2010.

CASTRO, R. M. G. **Introdução Á Energia Fotovoltaica**. Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa, p. 51. 2002.

CHIAVENATO, I. **Intridução à teoria geral da Administração**. 5ª. ed. São Paulo: Makron Books, 1997.

CONHEÇA os Tipos de Células Fotovoltaicas. **Solar Energia**, 2019. Disponível em: <<http://www.soleenergia.com.br/blog/celulas-fotovoltaicas/>>. Acesso em: 25 novembro 2019.

CORREA, C. S. **Análise do Impacto da Geração Distribuída Fotovoltaica em Sistemas de Distribuição Utilizando Múltiplos enarios de Geração com**

discretização Intra-horária. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 74. 2020.

DRABACH, D. Z.; SACARIN, L. P.; SHATALOFF, A. **A IMPORTÂNCIA DOS CUIDADOS TÉCNICOS DE MANUTENÇÃO, NO SISTEMA DE PLACAS FOTOVOLTAICAS E INVERSORES DE dc/ac INSTALADO NO SUPERMERCADO MICHELON, NA CIDADE DE FOZ DO IGUAÇU - PR.** FACULDADE UNIÃO DAS AMÉRICAS. FOZ DO IGUAÇU, p. 12. 2019.

GERBRAN, A. P. **MANUTENÇÃO E OPERAÇÃO DE EQUIPAMENTOS DE SUBESTAÇÕES.** PONTO ALEGRE: BOOKMAN, 2014.

JEISON E MEIRE. Blog da Qualidade, 13 Julho 2018. Disponível em: <<https://blogdaqualidade.com.br/diagrama-de-ishikawa/>>.

JUNÇÃO PN. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&cid=321>. Acesso em: 25 novembro 2019.

JUNIOR, C. J. D. O. **Uma Contribuição ao Estudo e desenvolvimento de inversores solares com duas entradas mppt independentes e capacidade de rastreamento do ponto de máxima potencia em condições de sombreamento parcial.** Monografia (Mestrado em Engenharia Elétrica)- UFU. Uberlandia, p. 114. 2017.

LIMA, A. A. et al. Uma Revisão dos Princípios da Conversão Fotovoltaica de Energia. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 42, p. 16, 2020.

LUZ SOLAR: GERE SUA PRÓPIA ENERGIA. Como funciona o sistema fotovoltaico? **Luz Solar**, 2016. Disponível em: <<https://luzsolar.com.br/como-funciona-o-sistema-fotovoltaico/>>. Acesso em: 2020 agosto 24.

MACHADO, T. C.; MIRANDA, F. S. Energia Solar Fotovoltaica: Uma breve Revisão. **Revista Virtual Química**, Niterói, v. 7, n. 1, p. 126-143, outubro 2014. ISSN 1984-6835.

MAMEDE FILHO, J. **Instalações elétricas industriais.** Rio de Janeiro: LTC, 2013.

MOREIRA, I. R. et al. Energia Fotovoltaica e Eólica no Brasil. **Revista Caleidoscópio**, v. 11, n. 1, 2019. ISSN 2447-6331.

NASCIMENTO, C. A. D. **Princípio do Funcionamento da célula Fotovoltaica.** Universidade Federal de Lavras. Lavras, p. 21. 2004.

NASCIMENTO, R. L. **Energia Solar no Brasil: Situação e Perspectivas**. Câmara dos Deputados. [S.l.], p. 46. 2017.

NBR 16690. ABNT. [S.l.]. 2018.

PAPA, D. M. **TECNOLOGIAS AVANÇADAS DE MANUTENÇÃO DE CENTRAIS FOTOVOLTAICAS**. UNIVERSIDADE DO PORTO. [S.l.], p. 116. 2017.

PEREIRA, F. **GUIA DE MANUTENÇÃO DE INSTALAÇÕES FOTOVOLTAICAS**. ANDURINA: PUBLIINDUSTRIA, 2012.

PETRY, P. M.; RAMOS, N.; COSTA, H. D. M. A Expansão da Energia Solar Fotovoltaica no Brasil e o Desenvolvimento Local: Uma Proposição de Abordagem. **Revista de Gestão e Sustentabilidade Ambiental**, Florianópolis, v. 9, p. 22 - 43, maio 2020.

PLANAS, O. Energia Solar , 3 Setembro 2018. Disponível em: <<https://pt.solar-energia.net/energia-solar-fotovoltaica/elementos/painel-fotovoltaico/celula-fotovoltaica/silicio/silicio-monocristalino>>.

RAMPINELLI, G. A.; KRENZINGER, A. .; ROMERO, F. C. Descrição e Análise de Inversores Utilizados em Sistemas Fotovoltaicos. **Revista Ciências Exatas e Naturais**, v. 15, n. 1, p. 25-50, Julho 2013.

RECURSOS ENERGÉTICOS E AMBIENTE. **Energia Solar**. Universidade de São Paulo. Piracicaba, p. 33. 2013.

RELLA, R. Energia Solar Fotovoltaica no Brasil. **Revista de Iniciação Científica**, Craciúma, v. 15, n. 1, p. 11, 0 2017. ISSN 1678-7706.

RELLA, R. Energia Solar Fotovoltaica no Brasil. **Revista de Iniciação Científica**, Craciúma, v. 15, n. 1, 2017. ISSN 1678-7706.

RÜTHER, R. **Edifícios Solares Fotovoltaicos**. 1ª. ed. Florianópolis: UFSC, v. 1, 2004.

SAUTHIER, L. F. **Modelagem Matemática de Módulos Fotovoltaicos Aplicados a Ambientes de Simulação de Geração Distribuída**. Monografia (Mestrado em Modelagem Matemática) - UNIJUÍ. Ijuí, p. 106. 2019.

SILVA, A. O. et al. **Gestão da Qualidade: Aplicação da Ferramenta 5W2H Como Plano de Ação Para Projeto de Abertura de uma Empresa**. 3ª Semana Internacional das Engenharias FAHOR. Horizontina: [s.n.]. 2013.

SOUZA, R. D. Célula Fotovoltaica- O Guia Absolutamente Completo. **Blue Sol**, 2017. Disponível em: <<http://glog.bluesol.com.br/celula-fotovoltaica-gua-colpleto/>>. Acesso em: 26 novembro 2019.

TIPO de Paine Solar Fotovoltaico. **Portal Solar**, 2018. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/tipos-de-painel-solar-fotovoltaico.html>>. Acesso em: 25 novembro 2019.

TORRES, R. C. **Energia solar fotovoltaica como fonte alternativa de geração de energia elétrica em edificações residenciais**. Monografia (Mestrado em Engenharia Mecânica) - USP. São Carlos, p. 164. 2012.

VILLALVA, M. G. **Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações**. 2ª. ed. Brasil: Érica, 2015.

VOCE Solar. **Voce Solar**, 2018. Disponível em: <<http://vocesolar.com.br/celula-fotovoltaica-da-luz-solar-a-energia-eletrica/>>. Acesso em: novembro 2019.