



**EWERTON GUIDARINI SILVEIRA
STELA GUIDIONE COSSA**

USINA FOTOVOLTAICA OFF-GRID NO DISTRITO DE MUIDUMBE

Foz do Iguaçu
2020

**EWERTON GUIDARINI SILVEIRA
STELA GUIDIONE COSSA**

USINA FOTOVOLTAICA OFF-GRID NO DISTRITO DE MUIDUMBE

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentada Banca Examinadora no Centro Universitário União das Américas – UNIAMÉRICA como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Nome do orientador
Luciana Paro Scarin Freitas

Nome do Mentor
Felipe Borniot
Nome do Co Mentor
Luciano Santos

“A essência de uma mente independente não está no que ela pensa, mas no modo como ela pensa”.
Christopher Hitchens

RESUMO

A energia fotovoltaica se constitui como uma ótima opção de geração de eletricidade limpa e renovável. Moçambique possui 28,8 milhões de habitantes, nos quais apenas 10,5 % tem acesso à energia elétrica de forma segura e normatizada, devido ao desenvolvimento econômico do país. Este trabalho tem como objetivo a elaboração de um projeto de uma usina fotovoltaica (Off-grid) para a eletrificação rural do distrito de Muidumbe situado na cidade de Pemba, província de Cabo Delgado em Moçambique. O projeto fotovoltaico será encaminhado a FUNAE e EDM, como forma de incentivo ao desenvolvimento econômico da região e consequente melhoria nas condições de vida da região. Com o efeito fotovoltaico, os painéis fotovoltaicos geram energia elétrica através da incidência de irradiação solar, tornando o local do projeto extremamente viável, pois o país recebe um índice elevado de irradiação solar anual.

Palavras-chave: Usina fotovoltaica. Energia. Moçambique.

ABSTRACT

Photovoltaic energy is a great option for generating clean and renewable electricity. Mozambique has 28.8 million inhabitants, of which only 10.5% have access to electricity in a safe and standardized manner, due to the country's undeveloped economy. This work's objective is the elaboration of a photovoltaic power plant (Off-grid) project for rural electrification in the district of Muidumbe located in the city of Pemba, province of Cabo Delgado in Mozambique. The photovoltaic project will be sent to FUNAE and EDM, as a way of encouraging the economic development of the region and consequent improvement in the region's living conditions. With the photovoltaic effect, the photovoltaic panels generate electricity through the incidence of solar radiation, making the project site extremely viable, as the country receives a high rate of annual solar radiation.

Keywords: Photovoltaic plant. Energy. Mozambique.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	- Composição de uma célula fotovoltaica.....	19
Figura 2	- Materiais semicondutores.....	19
Figura 3	- Símbolo de módulo fotovoltaico.....	22
Figura 4	- Potência elétrica em função da tensão elétrica de uma célula fotovoltaica de silício.....	23
Figura 5	- Influência da temperatura da célula fotovoltaica na curva I-V (para irradiância de 1000 W/m ² , espectro AM1,5).....	25
Figura 6	- Perfil da irradiância solar ao longo de um dia.....	26
Figura 7	- Ângulo de inclinação do módulo e ângulo de incidência dos raios solares.....	27
Figura 8	- Seguidor solar (tracker).....	28
Figura 9	- Módulo solar com dois graus de liberdade de rastreamento.....	28
Figura 10	- Formas de angulação do módulo.....	31
Figura 11	- Energia solar captada ao do ano com diferentes inclinações.....	31
Figura 12	- Altura da haste de suporte do módulo determina o ângulo de inclinação.....	32
Figura 13	- Fileiras de módulos em instalações fotovoltaicas.....	35
Figura 14	- Área do painel e área de instalação.....	35
Figura 15	- Diagrama de blocos de um sistema fotovoltaico.....	35
Figura 16	- Diagrama simplificado de um sistema fotovoltaico.....	36
Figura 17	- Conexões elétricas em série das células fotovoltaicas de um módulo.....	37
Figura 18	- Componentes de um módulo fotovoltaico.....	37
Figura 19	- Caixa de junção, contendo as conexões elétricas e diodos by-pass.....	38
Figura 20	- Módulo fotovoltaico com sombra em uma célula (sem diodo de by-pass).....	39
Figura 21	- Módulo fotovoltaico com sombra em uma célula (com diodo de by-pass).....	39
Figura 22	- Diagrama mostrando a ligação de diodos de desvio nos módulos fotovoltaicos.....	39
Figura 23	- Conectores MC3 e MC4 respectivamente.....	41
Figura 24	- Caixa de junção fornecida de fábrica com cabos fotovoltaicos e conectores macho e fêmea do tipo MC4.....	41
Figura 25	- Conexões de módulos em série.....	42
Figura 26	- Conexões de módulos em paralelo.....	42
Figura 27	- Normas e regulamentos sobre módulos Fotovoltaicos.....	43
Figura 28	- Classificação de sistemas fotovoltaicos.....	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Irradiação média anual fornecidos pelo NREL e INAM.....	17
Tabela 2	- Potência Acumulada.....	29
Tabela 3	- Determinação da relação entre x e z a partir do ângulo de inclinação.....	33
Tabela 4	- Determinação da relação entre L e x a partir do ângulo de inclinação.....	34

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	10
2	ESTADO DA ARTE.....	12
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	16
3.1	MOÇAMBIQUE.....	16
3.2	SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.....	18
3.3	CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DAS CÉLULAS FOTOVOLTAICAS	20
3.4	PARÂMETROS ELÉTRICOS.....	22
3.4.1	Tensão de circuito aberto (V_{oc}).....	22
3.4.2	Corrente de curto-circuito (I_{sc}).....	22
3.4.3	Fator de forma (FF).....	22
3.4.4	Eficiência de conversão fotovoltaica (η).....	23
3.5	INSTRUMENTOS PARA A REALIZAÇÃO DA MEDIÇÃO DA RADIÇÃO DO SOL.....	24
3.6	INSOLAÇÃO.....	25
3.7	IRRADIÂNCIA.....	25
3.8	ÂNGULO DE INCIDÊNCIA DOS RAIOS SOLARES.....	27
3.9	ESCOLHA DO ÂNGULO DO MÓDULO SOLAR.....	27
3.9.1	Regras básicas para a instalação de módulos fotovoltaicos.....	31
3.9.2	Espaçamento entre módulos em usinas fotovoltaicas.....	34
3.10	COMPONENTES BÁSICOS DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.....	35
3.11	CONEXÕES.....	38
3.11.1	Diodos by-pass.....	38
3.12	CABOS.....	40
3.13	CONNECTORES.....	40
3.14	CONEXÕES DE MÓDULOS EM SÉRIE.....	41
3.15	CONEXÕES DE MÓDULOS EM PARALELO.....	42
3.16	NORMATIVA.....	43

4	CLASSIFICAÇÃO.....	44
5	METODOLOGIA.....	45
6	CONCLUSÃO.....	47
	REFERÊNCIAS.....	48

1 INTRODUÇÃO

Moçambique possui vastos recursos de energia de fontes renováveis, como solar, eólica e biomassa. Mas, encontra-se pouco desenvolvido em relação ao mundo, na mobilização destes recursos para produção de energia elétrica por razões de pobreza e questões políticas, SANTOS *et al*, (2013).

Em Moçambique mais de 80% dos 28,8 milhões de habitantes não tem acesso à energia elétrica, este problema é consequência da incapacidade de expandir a rede elétrica para certas zonas mais distantes e isoladas (Sebastião, 2013).

Apenas cerca de 10,5% dos domicílios têm acesso à eletricidade, sendo que destes mais de metade situam-se em Maputo e seus arredores. Todas as capitais provinciais e da maioria dos municípios são também abastecidas com eletricidade. A maioria desses centros urbanos está ligada à rede elétrica nacional que pertence e é operada pela concessionária de energia de Eletricidade de Moçambique (EDM). A maior parte da população encontra-se concentrada num pequeno número de centros urbanos. Aumentar o acesso a eletricidade nestas áreas tem-se mostrado difícil e dispendioso (Sebastião, 2013)

O estudo referente a elaboração de Projeto de uma usina fotovoltaico *off-grid* (não conectado à rede elétrica) no distrito de Muidumbe localizado na cidade de Pemba, província de Cabo Delgado no país de Moçambique possa ter acesso a energia elétrica limpa e de qualidade, proporcionando aos moradores a realização de tarefas simples do cotidiano.

O Atlas de Energias Renováveis de Moçambique em 2013, indica que o país dispõe de um espectro teórico diversificado que perfaz um total de 23.026 GW, sendo a energia solar a fonte de energia mais abundante (23.000 GW). Moçambique recebe uma quantidade considerável de Sol, com uma radiação média anual de 5 kWh / m² / dia, oferecendo condições favoráveis para a energia solar fotovoltaica e térmica de desenvolvimento. Isso torna a escolha da temática favorável, o distrito se encontra em uma das províncias que mais recebe radiação solar anual no país.

A palavra fotovoltaica vem do grego *photos* que significa luz, e de *Volta*, nome do físico italiano que em 1800, descobriu a pilha elétrica. O efeito fotovoltaico ocorre em certos materiais semicondutores com a capacidade de absorver a energia contida nos fótons presentes em suas estruturas, transformando a energia contida na radiação luminosa em energia elétrica, Zilles *et al* (2013).

A elaboração deste projeto atende a incapacidade de expandir a rede elétrica para o Distrito de Muidumbe, através de uma usina solar *off-grid*, conseqüentemente não precisará da concessionária para o armazenamento da eletricidade. O desenvolvimento do projeto contribui drasticamente para o desenvolvimento humano e do país.

A opção metodológica escolhida no desenvolvimento do trabalho foi o estudo de caso. O estudo caso é baseado em evidências, pois requer levantamento de dados, análise de dados, relatório e pesquisas bibliográficas (Yin, 2015, p. 3), fontes tais como livros, cálculos matemáticos, relatórios de especialista em Energia Fotovoltaica para a elaboração da temática foram utilizados.

Justificativa

Com a ausência da cobertura da Rede Elétrica, se cria a necessidade de buscar outras formas de energia elétrica. As matérias-primas mais utilizadas nas comunidades rurais e Periurbanas para a geração de eletricidade são o carvão e a madeira, o que, além de poluir o ar (lançando monóxido de carbono na atmosfera) e causar doenças respiratórias, acarretam também o agravamento do efeito estufa (aumentando a temperatura terrestre da terra) e o desmatamento.

A ideia é estudar e reunir as informações mais relevantes sobre a geração de energia solar para implementação de um sistema *off-grid*, visando a melhor captação da luz solar para geração direta de eletricidade, distribuindo em locais onde existem uma fraca cobertura da Rede Elétrica, principalmente nas zonas rurais.

A energia fotovoltaica é vista como uma tecnologia alternativa, renovável e sustentável que pode levar eletricidade e sustentabilidade em locais isolados não poluindo e nem prejudicando o ecossistema, solucionado o problema enfrentado pelos moradores de Muidumbe.

A falta de investimento e de iniciativas políticas são o principal problema pela não implementação de sistemas de energia limpa em Moçambique (HANKIS, 2009).

2 ESTADO DA ARTE

Análise de algumas Referências Bibliográficas sobre a energia fotovoltaica

Esta pesquisa visa reunir informações relevantes para serem usadas como referência, apresentadas por pesquisadores que se aprofundaram no tema.

O sol é a principal fonte de energia do nosso planeta, onde praticamente toda a energia usada pelos seres humanos vem da origem dele. A luz solar chega à Terra na forma de luz e calor, sendo o suficiente para suprir a demanda mundial de forma limpa e sustentável.

Souza, Derzi e Correia (2004) afirmam que a queima de combustíveis fósseis ou de biomassa não-sustentável, gera graves problemas ambientais como a poluição do ar, a chuva ácida, o aquecimento global, por meio do efeito estufa, causando danos à camada de ozônio e a extinção de animais e vegetais, o que está desenvolvendo uma consciência mundial para a preservação do meio ambiente.

Se dá o nome energia renovável pois comparando com fontes não renováveis (combustíveis fósseis), os impactos ambientais são reduzidos e não emitem poluentes e nem resíduos para o meio ambiente. A utilização das fontes limpas reduz a emissão de poluentes, diminuindo, assim, a degradação da camada de ozônio.

Com efeito, Moçambique, tal como muitos outros países africanos ricos em florestas, contribui para o aquecimento global pela via do desflorestamento e degradação florestal. O processo de desmatamento para a obtenção de lenha e carvão (fonte de energia mais usada a nível rural e periurbano para confecção das refeições) colocando em evidência que 25% dos 28,8 milhões não tem acesso à energia elétrica de fontes seguras (MIREME, 2019).

Em seus argumentos Costa e Prates (2005), discursam sobre o papel estratégico de longo prazo das fontes renováveis. Primeiramente ele faz uma crítica ao peso relativo da energia dominante na oferta de energia e mostra as estratégias que vários países vêm praticando para passar a crise de petróleo. Não só comparando os custos, mas também as vantagens que se obtém na utilização de fontes

renováveis. Dessa forma fazendo com que o financiamento contribua de forma mais efetiva à promoção de fontes renováveis no país.

O aumento da população conseqüentemente eleva o consumo da energia, se fazendo necessário a busca de fontes de energia renováveis, assim, deixando de usar cada vez mais os combustíveis fósseis, que são esgotáveis e poluem o meio ambiente, segundo Prates e Cunha (2005), além de serem consideradas como ambientalmente corretas, as energias consideradas limpas e inesgotáveis permitem em vários casos a geração distribuída de energia. A busca da utilização da energia limpa demanda grandes investimentos e pesquisas mais aprofundadas sobre o tema, sobretudo, a criação de fornecedores de serviço, o que acaba gerando empregos locais e novos investimentos em energias renováveis.

Em perspicaz e pertinente análise, Hankis (2009) apresenta um plano de energia "verde" para Moçambique, de tal forma que a eletricidade alcance todo o país, sem causar a poluição os rios, que são os recursos mais preciosos. Sua luta era contra as grandes e destrutivas barragens, defendendo a ideia da produção de energia mais limpa, pontuando a proteção dos rios mediante a devastação que a construção delas proporcionam. Segundo as análises de Hankis (2009) juntamente com um especialista em energias renováveis, ressaltam que podem apresentar uma visão de um sistema energético sustentável que irá realmente resolver todos os problemas.

Em suas contundentes observações, Villalva e Gazoli (2012) enfatizam sobre a ascensão e crescimento do uso da energia fotovoltaica e como ela vem ganhando importância mundialmente, pela sua característica própria, que pode ser usada em qualquer lugar gerando energia elétrica no próprio ponto de consumo, através da incidência direta da radiação solar, considerada uma fonte renovável inesgotável, o que não polui e não influi no efeito estufa. Segundo o autor, é visto como um valioso instrumento didático sobre a energia fotovoltaica, trazendo informações relevantes para um ótimo entendimento sobre o assunto.

Santos *et al* (2013), de todas as formas de energia alternativas renováveis que Moçambique dispõe (exceto a hidráulica), a solar é a mais utilizada principalmente para atender às necessidades das populações rurais com sistema fotovoltaicos

isolados com níveis de irradiação média anual em torno de 5,8 kWh/m²/dia, que indica um grande potencial para geração de energia fotovoltaica.

Segundo o pertinente entendimento de Pinho e Galdino (2014), Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos é uma reformulação completa do documento de 1999 que foi uma iniciativa do Grupo de Trabalho de Energia Solar (GTES) criado em 1992. Se criou a necessidade pois houve um grande avanço na tecnologia fotovoltaica e a utilização de sistemas fotovoltaicos desde a criação da versão original publicada, editada em 1996, a primeira publicação do livro em 1999 e a reformulação em 2014. Era destinada apenas para auxílio básico de técnicos envolvidos em projetos de sistemas fotovoltaicos, em língua portuguesa e em conformidade com a realidade brasileira.

A nova edição desse manual em mais de 500 páginas traz informações no uso de sistemas fotovoltaicos conectados à rede, com seus respectivos regulamentos e normas que são infringidas ao setor, além dos aspectos econômicos. Visa promover a melhor qualificação técnica dos profissionais envolvidos na área, abrangendo conceitos básicos que são utilizados na atualidade, orientando na elaboração de projetos e procedimentos de instalações e manutenção dos equipamentos. Segundo o autor, é visto como um valioso instrumento didático e de difusão de informação técnica especializada, voltada ao treinamento e à formação de pessoal qualificado na área de energia solar.

Sendo assim, com todos os benefícios e vantagens que a energia solar traz, se torna muito mais eficiente e sustentável o seu uso. Mas como funciona a captação da energia solar? Como é convertido em energia elétrica?

O fenômeno da física que nos possibilita a conversão direta da luz em eletricidade é o efeito fotovoltaico, que foi descoberto por Becquerel¹ em 1839, quando observou que ao iluminar uma solução ácida surgia uma diferença de potencial entre os eletrodos imersos nessa solução, ou simplesmente ocorre quando a luz solar incide sobre determinada célula formada por materiais semicondutores com

¹ Alexandre-Edmond Becquerel (1820-1891), cientista francês.

propriedades pré-determinadas, onde é o elemento fundamental do processo de conversão.

Zilles et al (2013), a energia contida na radiação proveniente do Sol pode ser diretamente transformada em eletricidade. Para tal utilizam-se células fotovoltaicas, que são dispositivos feitos de materiais semicondutores, construído de forma aproveitar o efeito fotovoltaico para produção de energia elétrica.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 MOÇAMBIQUE

Em Moçambique, a principal fonte de energia eléctrica continua sendo a Hidrelétrica de Cahora Bassa (HCB) que opera uma central hídrica com capacidade de 2,075 MW, na Província de Tete. Outras fontes de produção de energia são as centrais hidroelétricas de Chicamba e Mavuzi, com capacidade de 96 MW na Província de Sofala. Na Província de Maputo, a central de Corumana tem capacidade de 16.6 MW, (MIREME, 2019)

Em Moçambique, 95% dos agregados familiares dependem da biomassa (lenha ou carvão) como fonte de energia diária para cozinhar e aquecer alimentos. Em 2011, as cidades com maior ritmo de crescimento (Maputo, Beira e Nampula) consumiram 8 milhões de sacos de carvão vegetal com 65 kg cada, fazendo subir os preços em 200% entre 2010 e 2012 (FUNAE, 2011).

Segundo o Ministério de Recursos Minerais e Energia (MIREME, 2019), o Governo de Moçambique pretende implementar o Projeto do Aumento de Acesso à Energia Eléctrica (ProEnergia), com o objetivo de intensificar o acesso à eletricidade para mais famílias e empresas no âmbito da eletrificação universal de Moçambique até 2030 definida na Estratégia Nacional de Eletrificação (ENE) recentemente aprovada pelo Governo de Moçambique, sendo que apenas 25% da população tem acesso a eletricidade.

A fraca cobertura da Rede Elétrica Nacional, especialmente nas zonas rurais, causa desafios de diversa ordem. Possui especial impacto negativo sob o género feminino a nível da gestão do lar que condiciona em certa medida as suas oportunidades profissionais pelas exigências do mercado de trabalho, bem como traz consequências em questões de segurança com as implicações nas possibilidades de acesso à educação noturna, e todos os riscos a que esta fica ainda mais susceptível (MIREME, 2019).

A eletrificação do distrito de Muidumbe trará impactos positivos em resultado da redução dos impactos ambientais resultantes do desmatamento para a aquisição de lenha e carvão (energia mais usada nas zonas rurais e Peri urbanos para preparação de refeições), e uso de combustíveis fosseis para geração de energia reduzindo a emissão do gás carbono.

Além destes benefícios, este Projeto acelera o processo de desenvolvimento socioeconômico do País e inibe alguns investimentos em outras infraestruturas e negócios, gerando empregos diretos e indiretos.

SANTOS *et al*, (2013), em Moçambique se apresenta, portanto, bastante favorável para a geração de eletricidade com sistemas fotovoltaicos e, embora, a ênfase atual seja nos sistemas isolados, há a tendência mundial para geração utilizando sistemas fotovoltaicos conectados à rede. Esses bancos de dados de irradiação descritos na tabela 1 abaixo são usados para se verificar resolução espacial e desvios entre os dados da irradiação para as capitais moçambicanas.

Tabela 1 - Irradiação média anual fornecidos pelo NREL e INAM

Cidades	N R E L (k W h / m ² dia)	I N A M (k W h / m ² dia)	%
Maputo	5,5	5.9	0,93
Q u i l i - mane	5,7	6.0	0,95
Chokwe	6,0	5.9	0,98
I n h a m - bane	5,8	5.3	0,91
Beira	5,4	5.4	0,00
Chimoio	5,5	5.2	0,94
Tete	5,7	5.4	0,89
Nampula	5,5	5,4	0,98
Pemba	5,4	5.7	0,94
Lichinga	5.1	5;1	0,00

Fonte: SANTOS, Marcos Herbert Smith dos et al, 2013

Como foi demonstrado pelo o Santos, Muidumbe situado na Província de Pemba, demonstra uma média de irradiação favorável para a construção da Usina Fotovoltaica, e a sua localização é propícia para o sistema offgrid pelo razões custo benéfico, sendo que a alimentação pela Rede elétrica irá exigir altos valores financeiros.

3.2 SISTEMA FOTOVOLTAICOS

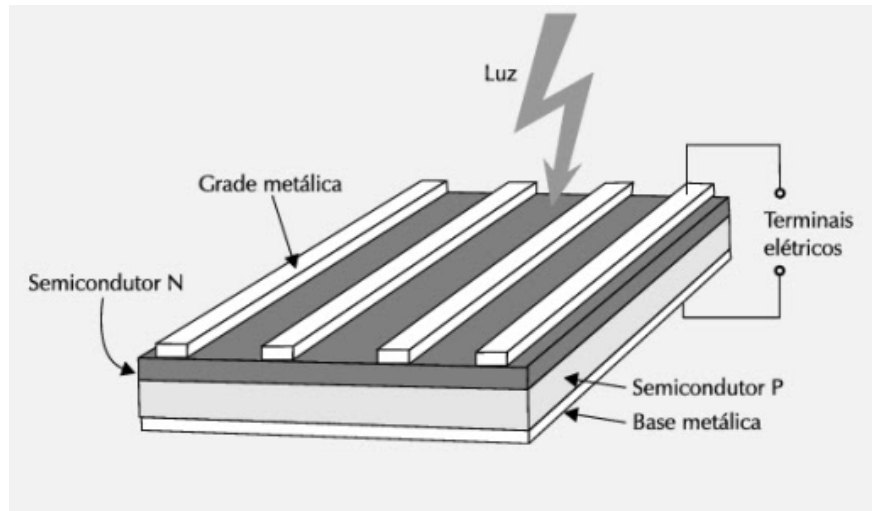
Para entender melhor sobre as células fotovoltaicas é necessário aprender sobre os princípios de fundamentos dela. Na natureza existem materiais semicondutores que possuem uma banda de valência totalmente preenchida por elétrons e outra banda sem elétrons, na temperatura do zero absoluto (0K), que segundo Pinho e Galdino (2014) se comporta como um isolante a 0 K.

Os materiais semicondutores são aqueles que não são considerados nem condutores e nem isolantes, pois suas propriedades mudam de acordo com a adição de materiais dopantes ou impurezas, ainda possuem uma característica muito relevante, que quando sua temperatura é elevada, aumenta também sua condutividade, que é a consequência da excitação térmica dos elétrons passando da banda de valência para condução, deixando lacunas na banda de valência.

A figura 1 mostra a junção de duas camadas semicondutoras, uma do tipo P e outra tipo N na estrutura física da célula fotovoltaica, composta por uma grade com coletores metálicos superiores e base inferior também de metal. Segundo Villalva e Gazoli (2012), o material N possui uma elevada carga de elétrons, que na parte P apresenta carência de elétrons, essa diferença de concentração fazem os elétrons da camada N fluírem para a camada P, criando um campo elétrico no interior de uma zona de depleção, denominada barreira de potencial, dentro da estrutura de uma célula.

Para a coleta de corrente elétrica gerada pela luz solar, são necessárias a grade e a base metálica, que são os terminais elétricos. A função da parte superior da célula é responsável pela captação da luz solar, que precisa ser translúcida e com pequenos contatos em forma de uma fina grade metálica em seu interior. De acordo com Villalva e Gazoli (2012) o silício é o mais usados atualmente na fabricação de células fotovoltaicas, pelo fato de ser um material abundante e relativamente barato, mas podendo também ser fabricadas com vários tipos de materiais semicondutores, como mostra a figura 1.

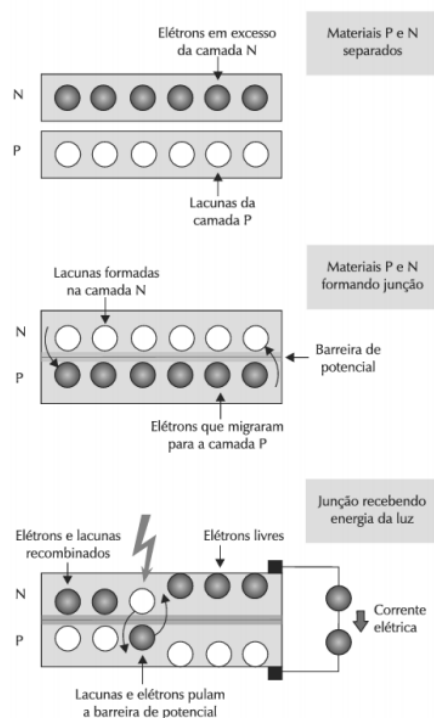
Figura 1 - Composição de uma célula fotovoltaica



Fonte: Villalva e Gazoli (2012).

A junção semicondutora, é formada quando camadas de materiais P e N entram em contato, onde os elétrons da camada N passam para a camada P e ocupam lugares das lacunas que estão livres, essa mudança de lacuna gera um campo elétrico e ocasiona na criação de uma barreira de potencial entre elas, como mostrado na figura 2.

Figura 2 - Materiais semicondutores



Fonte: Villalva e Gazoli (2012).

A parte superior da célula fotovoltaica é composta de material N, que é bastante fina, onde a luz solar incide no material e descarrega a energia sobre os elétrons, produzindo energia suficiente para ultrapassar a barreira de potencial passando da camada N para a P, onde são coletados pelos eletrodos metálicos. Alguns elétrons acabam sendo retidos pelas lacunas na camada N, porém a maior parte fica livre e quando um condutor elétrico fica no circuito entre as duas camadas, ele forma correntes elétricas. Villalva e Gazoli (2012) nos diz que caso não tenha um caminho elétrico entre as camadas, os elétrons não podem gerar corrente elétrica.

Para a manutenção deve-se leva em conta a manutenção preventiva visando reduzir as avarias que podem ser causadas por galhos, folhas, poeira etc. A manutenção preditiva se resume a inspeção visual, a fim de ver arranhões ou avarias na carcaça. A manutenção corretiva é quando se faz os outros procedimentos, porém necessita de assistência técnica para solucionar o problema de baixo rendimento ou outro defeito.

3.3 CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DAS CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

Curva *I-V*: Segundo a norma NBR 10899, a curva característica, é a representação dos valores de corrente em função da tensão de um gerador fotovoltaico em condições preestabelecidas de temperatura e de irradiância, produzidas por fótons captados da radiação do sol. A equação foi derivada da Equação de Schockley² do diodo ideal conforme mostrado por Pinho e Galdino (2014):

$$I = I_L - I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right]$$

Onde:

I_L - corrente fotogerada (A);

I_0 - corrente de saturação reversa do diodo (A);

n - fator de idealidade do diodo, número adimensional geralmente entre 1 e 2, obtido ajustando os dados experimentais medidos;

²William Bradford Schockley (1910-1989), cientista norte-americano, ganhador do Prêmio Nobel de Física em 1956.

q – carga do elétron ($1,6 \times 10^{-19} C$);

k – constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23} \frac{J}{K}$);

T – Temperatura absoluta (K).

Para calcular a corrente de saturação reversa (I_0), aplica-se tensão (V^∞) na célula no escuro ou ajustando uma curva experimental medida (numericamente), onde leva-se em conta a propriedade do material e as características de construção da junção pn (Pinho e Galdino, 2014).

$$I_0 = q \cdot A \cdot n_i^2 \cdot \left(\frac{D_p}{L_p \cdot N_d} + \frac{D_n}{L_n \cdot N_a} \right)$$

Onde:

A - área da seção reta da junção (área da célula);

n_i - concentração de portadores intrínsecos no material;

N_d, N_a - Concentração dos dopantes tipo n e tipo p, respectivamente;

D_p, D_n - Coeficientes de difusão de lacunas e elétrons, respectivamente, no material;

L_p, L_n - Comprimentos de difusão de lacunas e de elétrons;

Abaixo se deparamos com a curva característica típica de uma célula fotovoltaica de Si, como se trata de um gerador (a corrente tem um sentido inverso), a curva I-V se encontra no quarto quadrante (Pinho e Galdino, 2014) e podemos achá-la de uma célula fotovoltaica com a seguinte equação:

$$I = I_L - I_0 \left[\exp \left(\frac{q(V + IR_S)}{nkT} \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_S}{R_p}$$

Onde:

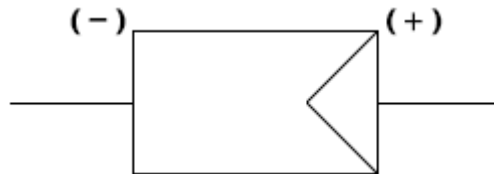
R_s - Resistência em série

R_p - Resistência em paralelo

Segundo Pinho e Galdino (2014) curva I-V é medida em condições-padrão de ensaio: irradiância de 1000 W/m^2 , espectro solar AM1,5 e temperatura da célula fotovoltaica de $25^\circ C$ (Para células fotovoltaicas de uso terrestre sem concentração da energia solar).

De acordo norma NBR 10899 (figura 3), módulo fotovoltaico é uma unidade básica formada por um conjunto de células fotovoltaicas, interligadas eletricamente e encapsuladas, com o objetivo de gerar energia elétrica.

Figura 3 - Símbolo de módulo fotovoltaico



Fonte: Autor.

3.4 PARÂMETROS ELÉTRICOS

Com a curva I - V , são determinados certos parâmetros elétricos, que são:

3.4.1 Tensão de circuito aberto (V_{oc}): Segundo a norma NBR 10899, tensão de circuito aberto é a tensão gerada através de um gerador fotovoltaico sem carga (aberto), para valores pré-estabelecidos de temperatura e irradiância e podem ser medidas diretamente nos terminais do módulo através de um multímetro. Segundo Pinho e Galdino (2014), a tensão de circuito aberto depende da corrente de saturação (I_0), da corrente elétrica fotogerada (I_L) e da temperatura, de acordo com a equação abaixo:

$$V_{oc} = \frac{k \cdot T}{q} \cdot \ln \left(\frac{I_L}{I_0} + 1 \right)$$

3.4.2 Corrente de curto-circuito (I_{sc}): Segundo a norma NBR 10899, é a corrente de saída de um gerador fotovoltaico, na condição de curto-circuito e para valores preestabelecidos de temperatura e irradiância. De acordo com Pinho e Galdino (2014), pode ser medida com um amperímetro curto-circuitando os terminais do módulo.

3.4.3 Fator de forma (FF): segundo a norma NBR 10899, é a razão entre a potência máxima e o produto da tensão de circuito aberto pela corrente de curto-circuito, relativos à mesma curva característica, especificado na forma de porcentagem e calculada por:

$$FF(\%) = \frac{P_{MP}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \cdot 100\%$$

Quanto menos houver perdas resistivas (paralelo e série), mais próxima da forma retangular será a curva I-V.

3.4.4 Eficiência de conversão fotovoltaica (η): segundo a norma NBR 10899, é a razão entre a potência máxima fornecida e o produto da área total do módulo ou célula, pela irradiância total, para valores preestabelecidos de temperatura, especificada na forma de porcentagem e calculada pela equação:

$$\eta = \frac{I_{sc} \cdot V_{oc} \cdot FF}{A \cdot G} \cdot 100\% = \frac{P_{MP}}{A \cdot G} \cdot 100\%$$

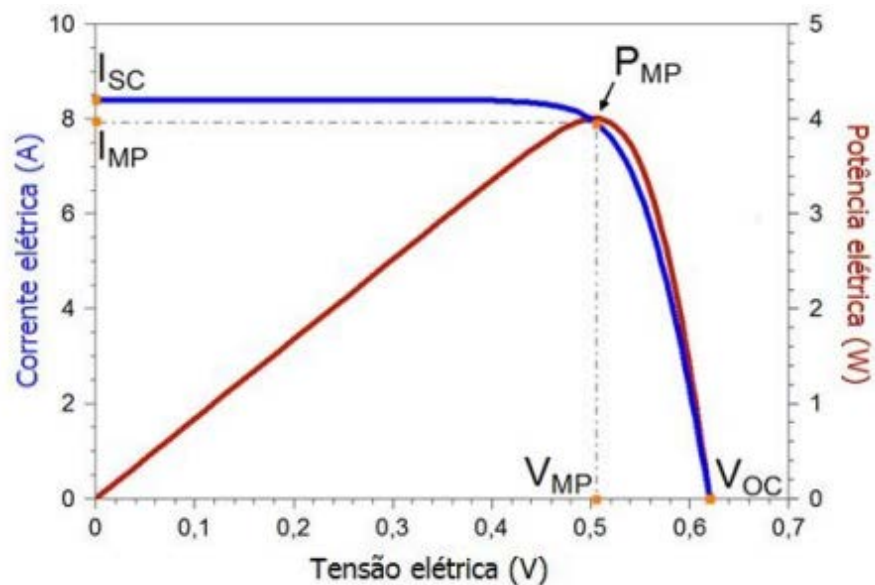
Onde:

A = área da célula (m^2);

G = irradiância solar incidente (W/m^2).

Com os dados da curva I-V, se encontra a curva P-V (potência em função da tensão), conforme a curva vermelha na figura abaixo, onde segundo Pinho e Galdino (2014), se destaca o ponto de máxima potência (P_{MP}), porque sua derivada em relação à tensão é zero ($\frac{dP}{dV} = 0$), sendo somente calculada de forma aproximada ou numericamente, conforme mostra figura 4.

Figura 4 - Potência elétrica em função da tensão elétrica de uma célula fotovoltaica de silício



Fonte: Pinho e Galdino (2014).

3.5 INSTRUMENTOS PARA A REALIZAÇÃO DA MEDIAÇÃO DA RADIAÇÃO DO SOL

A medição da radiação solar, tem grande importância para o desenvolvimento de projetos voltados à captação e a conversão da energia solar. Com precisão nas medidas, pode-se garantir o máximo aproveitamento do recurso anualmente, onde há variação na radiação solar, que tem por finalidade obter o valor instantâneo da irradiância (fluxo energético solar) ou irradiação (integrado) ao longo do tempo. Segundo Pinho e Galdino (2014), o recurso solar é a principal preocupação realização de um projeto de energia solar, para a aquisição de alguns dados importantes:

- Reconhecimento do local onde há maior incidência de luz solar anualmente para a instalação de um sistema fotovoltaico;
- Dimensionamento do gerador fotovoltaico e da produção de energia;
- Sistema de armazenamento no caso de sistema isolado.

Os dois instrumentos mais utilizados para a medição dos raios solares são o piranômetro, que serve para medidas de irradiação global e o pireliômetro para irradiação direta.

O piranômetro termoeletrico é comumente utilizado na horizontal e é projetado para medir a densidade de fluxo da radiação solar, conta com um sensor de termopilha, construídas com múltiplos termopares em série, colocada no interior de duas semiesferas de vidro concêntricas.

Já o piranômetro fotovoltaico é constituído por uma célula fotovoltaica com pequenas dimensões, com vantagem de ter menor custo e tempo de resposta da irradiância quase instantânea, porém mais precária em precisão, por consequência da sua resposta espectral limitada. Existem três categorias classificatórias, de acordo com a ISO 9060: primeira classe, segunda classe e padrão secundário. Segundo a World Meteorological Organization (WMO), a classificação se dá em: alta qualidade (com erro diário permitido de 2 %), boa qualidade, (5 %) e razoável (10 %). Onde os piranômetros termoeletricos são de boa qualidade e o fotovoltaico de qualidade razoável.

A manutenção da qualidade das medidas deve passar por calibração insitu dos sensores no máximo em 18 meses, conforme a International Standards Organization

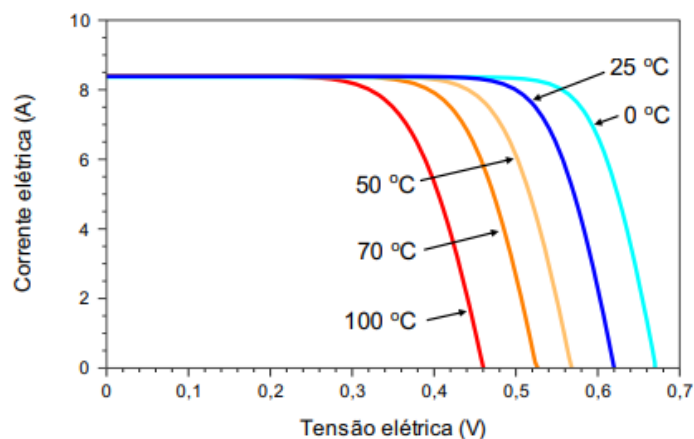
(ISO) 9847 de 1992, que normatiza os procedimentos de calibração para um piranômetro de campo por comparação e in-situ com um piranômetro de referência.

3.6 INSOLAÇÃO

A insolação é a grandeza que mede a incidência da energia solar (energia por m^2) em determinada área com superfície plano e de tempo, expressa em $Wh/m^2/dia$. Segundo Villalva e Gazoli (2012) é importante saber que a insolação muda a cada dia do ano para aquele local medido anteriormente.

A temperatura de trabalho está diretamente relacionada com o bom funcionamento das células fotovoltaicas, pois a incidência da irradiância ou da temperatura ambiente gera um aumento na temperatura da célula, o que influencia na tensão fornecida nos terminais pelo módulo, resultando também na potência que ela fornece. Pinho e Galdino (2014) nos mostra que este fato se dá, pois, a tensão da célula decai com o aumento da temperatura e sua corrente minimamente eleva, sendo quase nula, como mostrado na figura 5.

Figura 5 - Influência da temperatura da célula fotovoltaica na curva I-V (para irradiância de $1000 W/m^2$, espectro AM1,5)



Fonte: Pinho e Galdino (2014).

3.7 IRRADIÂNCIA

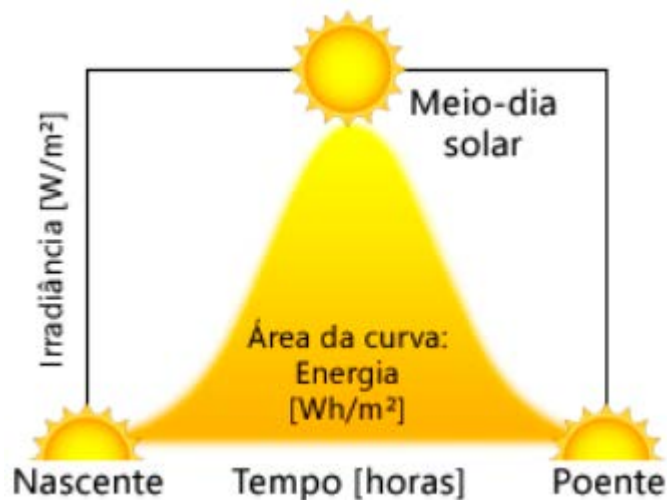
A irradiância é a grandeza que mede a radiação solar (potência por m^2), onde se encaixa em uma unidade de potência de área e sua grandeza é expressa em W/m^2 ,

segundo a norma NBR 10899, quando integrada no tempo de uma hora, se simboliza por "I" e por "H" no tempo de um dia e é adotada também pelos sensores. Villalva e Gazoli (2012) ressalta que quanto mais potência a radiação solar tiver, mais energia será transportada nesse intervalo de tempo, onde é possível também obter dados precisos através de satélites quando apresentadas em médias mensais. A irradiância padrão foi adotada em 1000 W/m^2 pela indústria e pelas células e módulos fotovoltaicos, onde ela é mencionada pelos fabricantes na maioria das vezes nos catálogos.

Com um sensor e a irradiância é possível obter, através dos dados, a quantidade de Energia Solar recebida em determinado tempo e local, onde pode ser semanal, mensal ou anual.

Abaixo se encontra um gráfico que mostra a irradiância solar no decorrer de um dia. Com o cálculo da área embaixo da curva se obtém o valor da energia obtida (por unidade de área) do sol durante o dia, que é chamado de insolação, mostrado por Villalva e Gazoli (2012) na figura 6.

Figura 6 - Perfil da irradiância solar ao longo de um dia



Fonte: Autor.

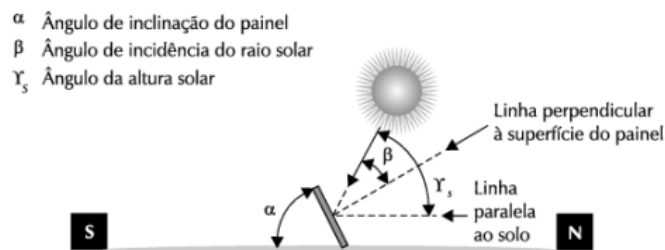
Pinho e Galdino (2014) conclui que a corrente elétrica produzida por uma célula fotovoltaica aumenta linearmente com o aumento da irradiância solar incidente, à medida que a tensão de circuito aberto (V_{oc}) aumenta de forma logarítmica, quando se mantém na mesma temperatura.

3.8 ÂNGULO DE INCIDÊNCIA DOS RAIOS SOLARES

A posição do Sol influencia o modo como os raios solares incidem sobre a terra, que variam ao longo do dia ou ano (determinada por ângulos azimutal e zenital e pela altura solar).

Abaixo temos uma demonstração de como os raios chegam até o módulo solar. Villalva e Gazoli (2012) mostra como os raios solares incidem em um módulo solar e suas grandezas, onde α é o ângulo de inclinação da instalação com referência ao solo, com sua face apontado para o norte geográfico, β é o ângulo de inclinação, que os raios do sol chegam na face do módulo, demarcado relativamente à linha perpendicular à superfície do painel. Como varia a cada dia, a altura solar r_s também muda, fazendo com que a inclinação β altere, como visto na figura 7.

Figura 7 - Ângulo de inclinação do módulo e ângulo de incidência dos raios solares



Fonte: Villalva e Gazoli (2012).

Com $B = 0$ tem-se o melhor aproveitamento da energia solar, pois os raios incidem perpendicularmente ao módulo, logo, para ter um máximo de aproveitamento da captação, a inclinação deve ser ajustada diariamente.

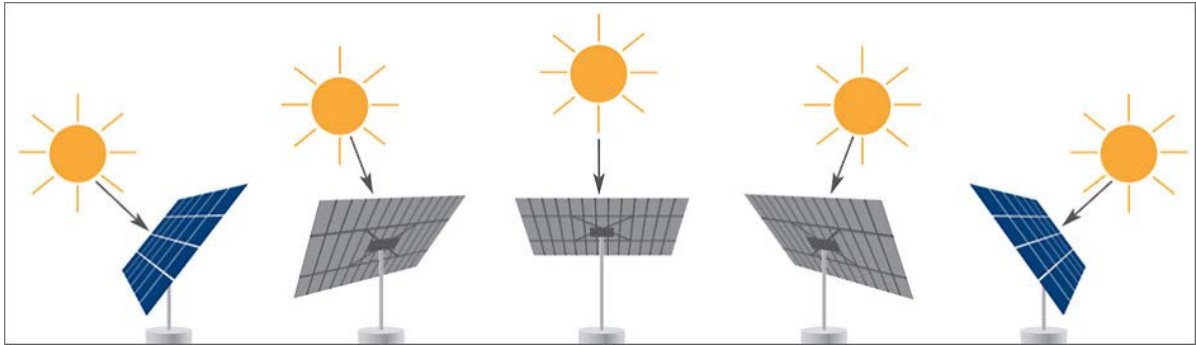
3.9 ESCOLHA DO ÂNGULO DE INCLINAÇÃO DO MÓDULO SOLAR

Alguns critérios são adotados para achar um ângulo fixo, onde há melhor captação dos raios solares. Também podem ser adotados painéis com seguidores solar ou tracker para obter um melhor rendimento e produtividade, otimizando o ângulo de incidência dos raios do sol automaticamente.

O seguidor solar é um dispositivo (figura 8) que utiliza circuitos eletroeletrônicos e estruturas moveis (mecânicas) buscando sempre a melhor posição para os painéis

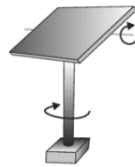
fotovoltaicos receberem a exposição direta dos raios solares, podendo ter um ou dois graus de liberdade (figura 9), gerando mais energia elétrica, melhorando a forma como a potência é entregue e ocupando aproximadamente o mesmo espaço dos sistemas de inclinação fixa.

Figura 8 – Seguidor solar (tracker)



Fonte: Solar Motors.

Figura 9 – Módulo solar com dois graus de liberdade de rastreamento



Fonte: Villalva e Gazoli (2012).

Um estudo foi realizado em campo por Macedo (2017), instalando dois painéis solares com a mesma especificação técnica e idêntica capacidade de geração. Um deles foi posicionado fixo rente ao telhado do local de instalação, na posição onde havia menos obstrução por parte de objetos ou estruturas próximas. O segundo foi instalado como dispositivo de rastreamento solar onde possibilitava a movimentação para seguir o sol.

Para análise dos resultados foram coletadas amostras da geração de energia durante 15 dias do mês de setembro de 2017, de hora em hora, das 07:00 horas manhã até 19:00 horas da noite, onde somando os valores chegou-se a produção diária independente que cada painel produziu. (MACEDO, 2017)

Foi feita uma tabela (tabela 2) para apresentar a produção diária de cada painel e o ganho na geração com a utilização do sistema de rastreamento solar em Watts e em porcentagem:

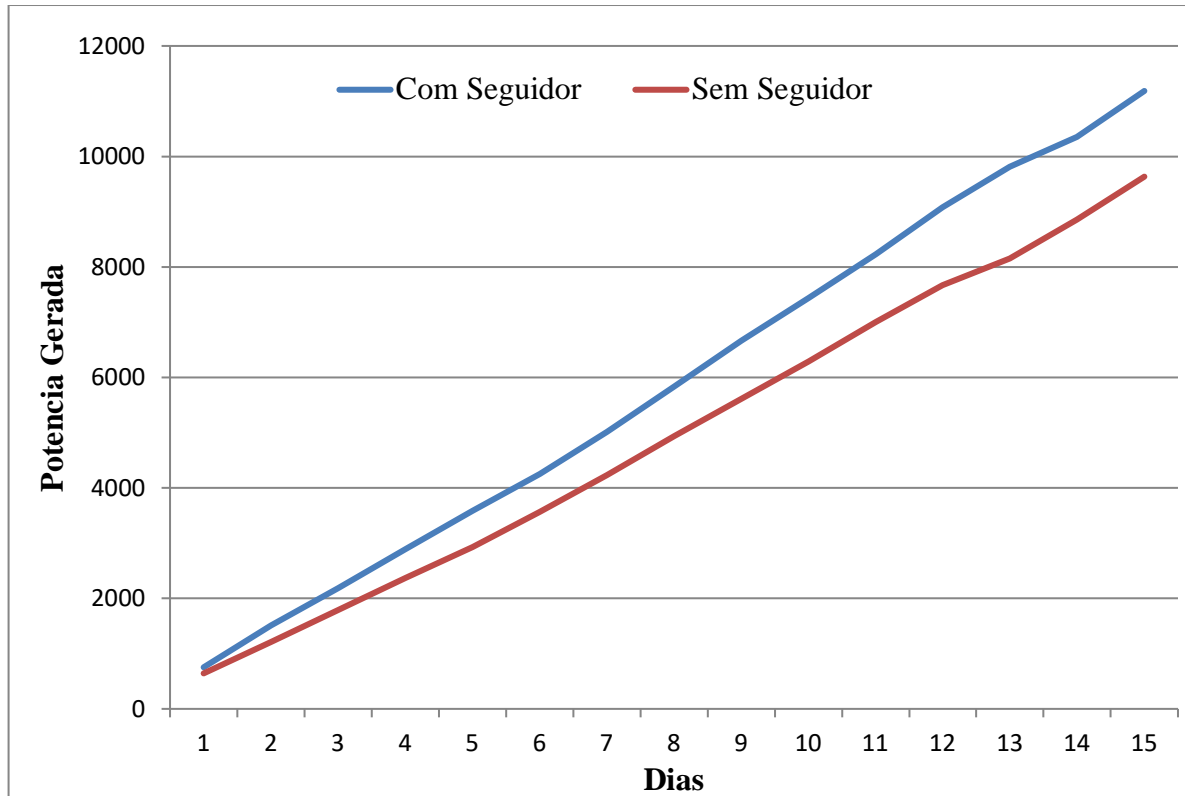
Tabela 2 - Potência Acumulada

Produção de Energia em Watts					
Dia	Com rastreamento		Sem rastreamento		Ganho %
	Diária	Acumulada	Diária	Acumulada	
1	752,5	752,5	642,5	642,5	17,12%
2	680,5	1505	572	1214,5	18,97%
3	705,6	2185,5	574	1788,5	22,93%
4	690,2	2891,1	580,1	2368,6	18,98%
5	672,4	3581,3	560,4	2929	19,99%
6	763,4	4253,7	640,7	3569,7	19,15%
7	815,9	5017,1	662,3	4232	23,19%
8	835,8	5833	701,4	4933,4	19,16%
9	771,4	6668,8	680,2	5613,6	13,41%
10	792,1	7440,2	673,6	6287,2	17,59%
11	848,2	8232,3	713,6	7000,8	18,86%
12	755,2	9080,5	635,6	7666,4	18,82%
13	535,29	9815,7	489,2	8155,6	9,42%
14	834,5	10350,99	698,2	8853,8	19,52%
15	920,3	11185,49	780,3	9634,1	17,94%
Total		11185,49		9634,1	18,97%

Fonte: Macedo (2017)

Macedo (2017) chegou no resultado geral de produção média de 18,97 %, onde o ganho de potência pelo painel móvel oscila de acordo com condições climáticas do dia (dias nublados, chuvosos etc.) que se equiparada aproximadamente com a produção do painel fixo. Foi feito também um gráfico (gráfico 1) onde Macedo (2017) apresenta a evolução da energia produzida e acumulada no decorrer do tempo para ambos os painéis.

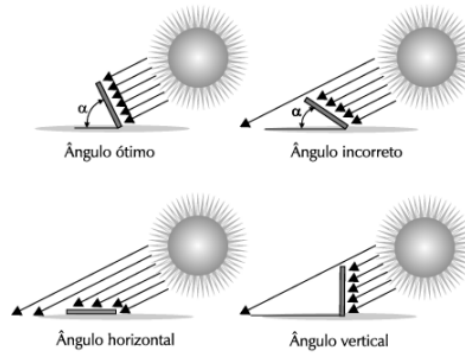
Gráfico 1 - Potência quinzenal obtida no mês de setembro de 2017



Fonte: Macedo (2017)

A figura abaixo mostra a instalação convencional em diferentes ângulos de inclinação (inclinação fixa). Segundo Villalva e Gazoli (2012) o primeiro caso (ângulo ótimo) maximiza a captação da luz solar que vem de forma direta. No segundo caso (ângulo incorreto) há pouca incidência de raios solares, onde há pouca captação. Na posição horizontal, a altura solar é menor no inverno e intensa no verão. E na posição vertical é ao contrário da relatado anteriormente. Caso seja instalada fixamente deve-se fazer uma média onde há uma boa produção de energia, pois o ângulo não irá ser propício para a captação em todos os dias ou meses do ano (figura 10).

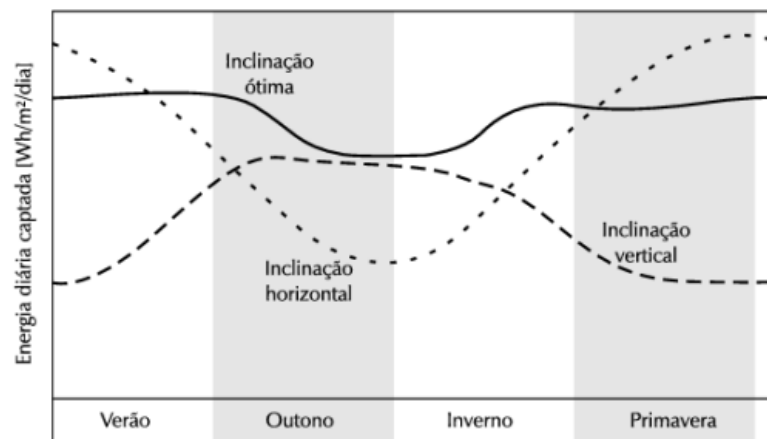
Figura 10 - Formas de angulação do módulo



Fonte: Villalva e Gazoli (2012).

A figura 11 nos mostra um gráfico de energia captada pelo módulo em três ângulos de inclinação distintos.

Figura 11 - Energia solar captada ao do ano com diferentes inclinações



Fonte: Villalva e Gazoli (2012).

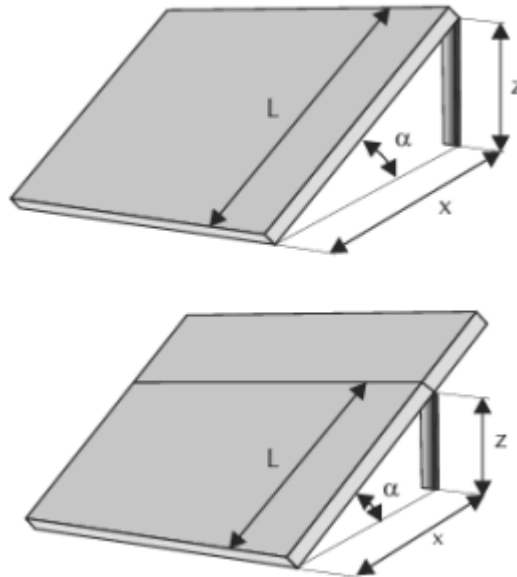
3.9.1 Regras básicas para a instalação de módulos fotovoltaicos

Segundo Villalva e Gazoli (2012) existe duas regras básicas para que a instalação do módulo solar seja feita da forma correta:

- Quando possível, orientar a face do módulo para o norte geográfico para maximizar a produção média diária de energia;
- Fazer o ajuste da angulação de inclinação correto do modulo em relação ao solo, para otimizar a produção de energia ao longo do ano.

Com o ângulo da latitude geográfica da localidade onde o sistema é instalado, se obtém o ângulo de inclinação (α) do módulo solar (figura 12). Quando aplicado na prática, deve-se atentar-se no cálculo da altura da haste de fixação (z) em função do ângulo calculado (α), considerando o comprimento do módulo (L) ou a distância entre a borda do módulo no solo e a barra de sustentação (Villalva e Gazoli, 2012).

Figura 12 - Altura da haste de suporte do módulo determina o ângulo de inclinação



Fonte: Villalva e Gazoli (2012).

Segundo Villalva e Gazoli (2012), para fazer o cálculo da altura z da haste de fixação se usa a equação :

$$z = L * \text{sen } \alpha$$

E para o cálculo da distância:

$$x = L * \text{cos } \alpha$$

Onde:

L = Comprimento do módulo solar ou a distância entre sua borda apoiada no chão e o ponto de fixação;

x = distância do chão entre a borda de apoio do módulo e a extremidade da haste de fixação;

z = altura da haste.

A altura da haste é determinada através da tabela (tabela 3) abaixo, onde o valor da razão $R_{xz} = x / z$ corresponde ao ângulo de inclinação α desejado (Villalva e Gazoli, 2012). Com base no z , é possível determinar o valor de x com essa razão, ou vice-versa.

Tabela 3 - Determinação da relação entre x e z a partir do ângulo de inclinação

α	$R_{xz} = x / z$	α	$R_{xz} = x / z$
10°	5,671282	26°	2,050304
11°	5,144554	27°	1,962611
12°	4,704630	28°	1,880726
13°	4,331476	29°	1,804048
14°	4,010781	30°	1,732051
15°	3,732051	31°	1,664279
16°	3,487414	32°	1,600335
17°	3,270853	33°	1,539865
18°	3,077684	34°	1,482561
19°	2,904211	35°	1,428148
20°	2,747477	36°	1,376382
21°	2,605089	37°	1,327045
22°	2,475087	38°	1,279942
23°	2,355852	39°	1,234897
24°	2,246037	40°	1,191754
25°	2,144507	41°	1,150368

Fonte: Villalva e Gazoli (2012).

De acordo com Villalva e Gazoli (2012), para achar o valor de x fundamentando por um comprimento L , usasse a tabela (tabela 4) abaixo.

Tabela 4 - Determinação da relação entre L e x a partir do ângulo de inclinação

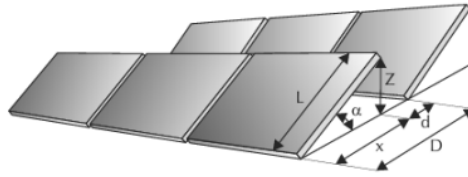
α	$R_{xt} = x / L$	α	$R_{xt} = x / L$
10°	0,984808	26°	0,898794
11°	0,981627	27°	0,891007
12°	0,978148	28°	0,882948
13°	0,974370	29°	0,874620
14°	0,970296	30°	0,866025
15°	0,965926	31°	0,857167
16°	0,961262	32°	0,848048
17°	0,956305	33°	0,838671
18°	0,951057	34°	0,829038
19°	0,945519	35°	0,819152
20°	0,939693	36°	0,809017
21°	0,933580	37°	0,798636
22°	0,927184	38°	0,788011
23°	0,920505	39°	0,777146
24°	0,913545	40°	0,766044
25°	0,906308	41°	0,754710

Fonte: Villalva e Gazoli (2012).

3.9.2 Espaçamento entre módulos em usinas fotovoltaicas

Em usinas fotovoltaicas, é necessário realizar cálculos para que a distância entre as colunas para que não façam sombra umas às outras. Villalva e Gazoli (2012), afirma que a presença de sombras em módulos solares é extremamente prejudicial ao desempenho dos sistemas fotovoltaicos.

Figura 13 - Fileiras de módulos em instalações fotovoltaicas



Fonte: Villalva e Gazoli (2012).

O fator de utilização da área do terreno da usina deve ser levado em conta para maximizar a produção de energia, juntamente com o distanciamento correto. A razão entre a área do módulo e na superfície plana necessária para sua instalação é denominada fator de utilização, e se dá pela fórmula desejado (Villalva e Gazoli, 2012):

$$f = \frac{L}{D}$$

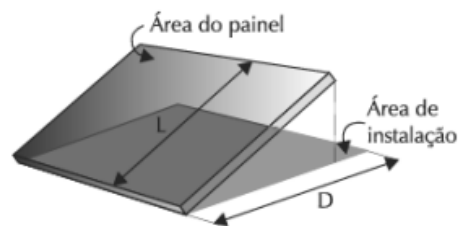
Onde:

f = Fator de utilização de área

L = Largura do módulo solar

D = Largura da área de instalação

Figura 14 – Área do painel e área de instalação



Fonte: Villalva e Gazoli (2012).

3.10 COMPONENTES BÁSICOS DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Pode ser expresso na forma de um diagrama de blocos (figura 15), onde há:

Figura 15 - Diagrama de blocos de um sistema fotovoltaico



Fonte: autor.

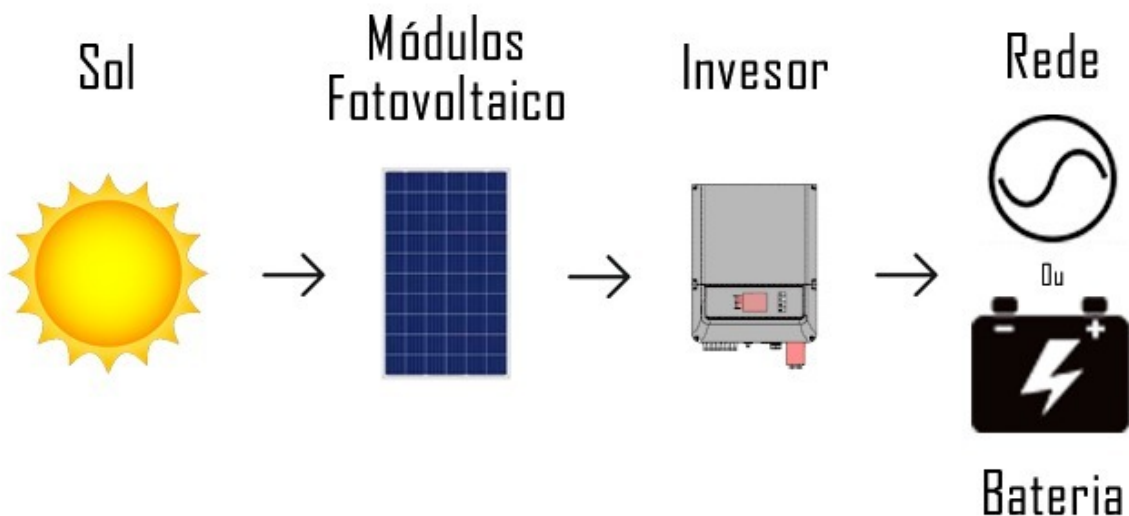
O primeiro bloco, é o gerador, que é composto pelos arranjos fotovoltaicos, que são: módulos fotovoltaicos (em diferentes associações), cabeamento elétrico que faz o interligamento e o suporte; O segundo pode ter conversores (cc-cc), seguidor de ponto de potência máxima (SPPM¹), inversores, controladores de carga (no caso de houver armazenamento), e os demais dispositivos (proteção, supervisão e controle). O último bloco é constituído de formas de armazenamento e/ou baterias.

O módulo fotovoltaico é considerado a unidade básica de um sistema fotovoltaico, formado por conjunto de células fotovoltaicas, interligadas eletricamente e encapsuladas, que realiza a conversão direta da energia solar em elétrica (ABNT, 2013).

Os inversores fotovoltaicos são dispositivos eletrônicos que convertem a energia elétrica de corrente contínua (c.c.) para corrente alternada (c.a.), devendo suas características elétrica de saída, como conteúdo harmônico frequência, e amplitude, ser compatíveis com as da rede elétrica na qual injetam energia elétrica proveniente do sistema solar fotovoltaico (Pinho e Galdinho, 2014).

A figura 16 é uma representação simplificada dos sistemas fotovoltaicos, com seus principais componentes, o sol, módulos fotovoltaicos, inversor, Rede ou Bateria.

Figura 16 - Diagrama simplificado de um sistema fotovoltaico

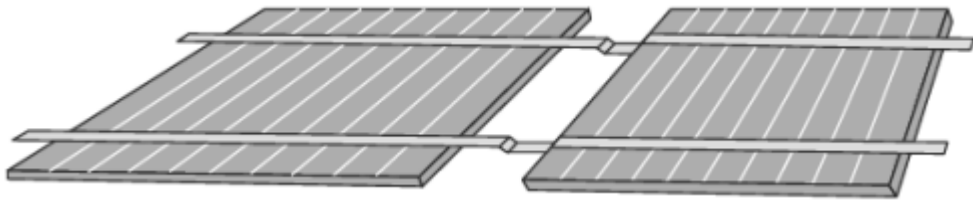


Fonte: Elaborado a partir de (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), 2008) e (LUQUE; HEGEDUS, 2003).

O principal dispositivo da geração fotovoltaica é a célula fotovoltaica, que agrupadas se denominam painéis, placas ou módulos. Os módulos fotovoltaicos são instalados sobre uma estrutura e conectados eletricamente.

Na figura abaixo (figura 17), se dá o modo correto de conectar as células em série, onde os terminais superiores de uma célula são conectados na inferior da outra, gerando a tensão de saída desejada (Villalva e Gazoli, 2012).

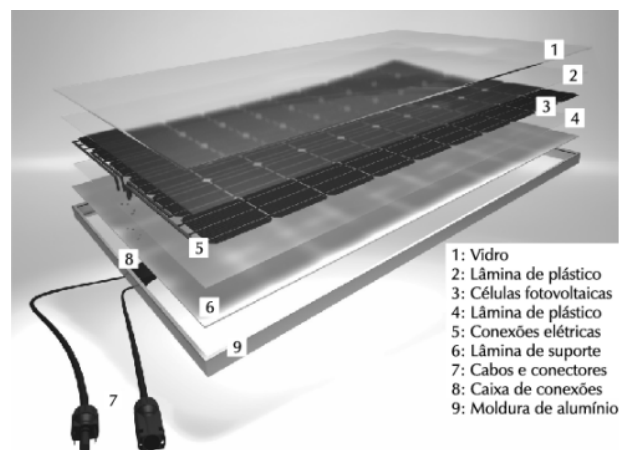
Figura 17 - Conexões elétricas em série das células fotovoltaicas de um módulo



Fonte: Villalva e Gazoli (2012).

Dentro das lâminas plásticas, ficam prensadas as conexões elétricas e as células, seguindo pela lâmina de vidro que recobre o módulo junto com uma moldura de alumínio. A caixa das conexões elétricas juntamente com os cabos elétricos fica na parte de trás do módulo. Em suas contundentes observações, Villalva e Gazoli (2012) os cabos conectores são padronizados, o que facilita a conexão dos módulos em série, como mostra a figura 18.

Figura 18 - Componentes de um módulo fotovoltaico



Fonte: Villalva e Gazoli (2012).

3.11 CONEXÕES

Na parte de trás dos módulos, existe uma caixa de conexões (também chamada de caixa de junção), onde são alojados os diodos de desvio (*by-pass*), juntamente com as conexões dos conjuntos de células em série. Na parte externa (figura 19), encontra-se dois conectores para acoplamento dos cabos elétricos de conexão do módulo (Villalva e Gazoli, 2012).

Figura 19 – Caixa de junção, contendo as conexões elétricas e diodos *by-pass*



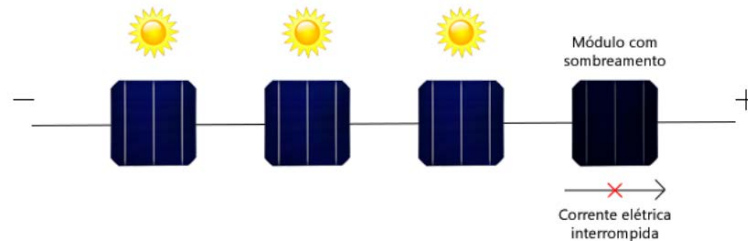
Fonte: Desenvolt (2019).

3.11.1 Diodos *by-pass*

Os diodos *by-pass* ou diodos de desvio, protegem os módulos desviando a corrente de um módulo sombreado, por um caminho alternativo, reduzindo a perda de energia e algum possível dano a integridade do módulo. Caso uma das células do módulo estiver recebendo pouca luz, seja por obstáculos fazendo o sombreamento ou nuvens, pode deixar de produzir energia, para produzir corrente, elas dependem uma das outras pelo fato de estarem conectadas em série.

Nas palavras de Villalva e Gazoli (2012), essa situação acontece quando uma ou mais células recebem pouca ou nenhuma luz, impossibilitando a passagem de corrente elétrica das outras células, como visto na figura abaixo (figura 20).

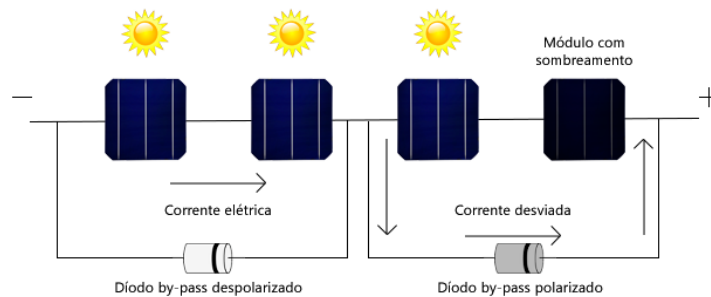
Figura 20 - Módulo fotovoltaico com sombra em uma célula (sem diodo de *by-pass*)



Fonte: Autor.

Os diodos de passagem (diodos de *by-pass*) ligados em paralelo com as células (figura 21), diminuem este efeito do sombreamento, usando um diodo em um número X de células.

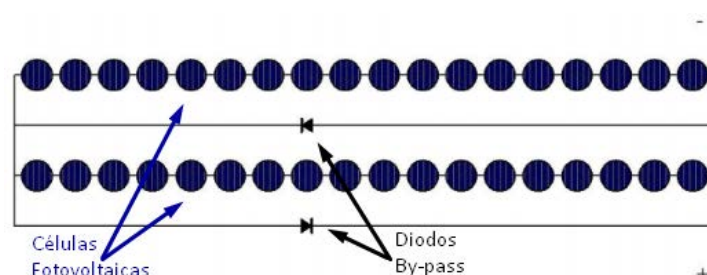
Figura 21 - Módulo fotovoltaico com sombra em uma célula (com diodo de *by-pass*)



Fonte: Autor

São conectados em paralelo (inversamente polarizados) com os módulos em série, entre 15 e 30 células para cada diodo (figura 22), tendo que suportar (operando permanentemente), a mesma corrente das células, como ressalta Pinho e Galdino (2014).

Figura 22 - Diagrama mostrando a ligação de diodos de desvio nos módulos fotovoltaicos



Fonte: Pinho e Galdino (2014).

3.12 CABOS

Os cabos são ligados na caixa de junção por terminais elétricos e geralmente são fornecidos pelo fabricante juntamente com o módulo. Os cabos utilizados nos módulos fotovoltaicos têm características próprias para essa aplicação. Em suas contundentes observações, Villalva e Gazoli (2012) menciona que os cabos devem ter características especiais pois trabalham com tensões de corrente contínua mais elevadas do que as instalações elétricas convencionais, em especial quando são conectados à rede elétrica e devem ser resistentes a algumas intempéries: Radiação ultravioleta, ozônio, hidrólise, ácidos e óleos.

3.13 CONECTORES

Na prática, os conectores são fornecidos com os módulos. Na grande maioria das vezes, os cabos são de engate rápido, de fácil manuseio e garantindo qualidade de conexão. Os conectores devem atender a alguns critérios, segundo Pinho e Galdino (2014):

- Grau de proteção IP 67³ ou superior;
- Não podem ser instalados em canaletas ou dutos (lugar onde pode acumular água);
- Não podem ficar soltos;
- Devem ser fixados junta a estrutura do painel fotovoltaico por meio de abraçadeiras adequadas.

Conectores MC3 e MC4 foram adotados como padrão e são utilizados em aplicações fotovoltaica. Na conexão em série, o terminal positivo de um módulo se encaixa no terminal negativo do outro, e em paralelo, a conexão é feita através de conectores auxiliares ou *string boxes* (Villalva e Gazoli, 2012).

³ Grau de proteção apresentado na norma NBR IEC 60529: "Graus de proteção para invólucros de equipamentos elétricos (códigos IP).

Figura 23 – Conectores MC3 e MC4 respectivamente



Fonte: Villalva e Gazoli (2012).

Na figura 24, se encontra a caixa de junção, cabos elétricos positivo e negativo e conectores macho e fêmea do tipo MC4 (Villalva e Gazoli, 2012).

Figura 24 – Caixa de junção fornecida de fábrica com cabos fotovoltaicos e conectores macho e fêmea do tipo MC4



Fonte: Villalva e Gazoli (2012).

3.14 CONEXÕES DE MÓDULOS EM SÉRIE

Quando conectados em série (figura 25), a tensão que sai do associado de módulos condiz à soma da tensão que é fornecida por cada um dos módulos. Associando em série, o terminal positivo é conectado ao negativo de outro módulo, e assim sucessivamente. Quando iguais os dispositivos e sua irradiância, a tensão é somada e a corrente se mantém invariável.

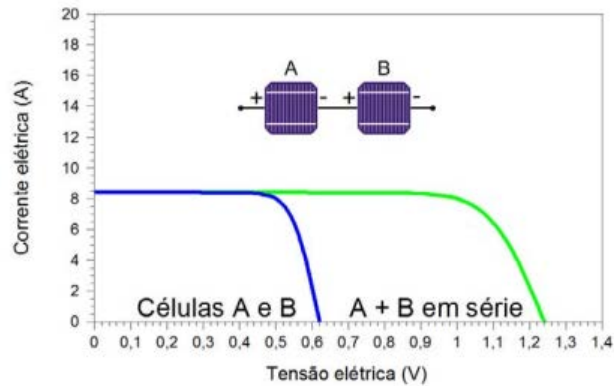
$$V = V_1 + V_2 + \dots + V_n$$

$$I = I_1 = I_2 = \dots = I_n$$

No caso de dispositivos idênticos e nas mesmas condições de irradiância e temperatura, suas correntes elétricas individuais são iguais. Quando associados em

série com correntes de curto-circuito distintas, a menor corrente será o limite de corrente elétrica da associação, e na prática pode levar ao superaquecimento (Pinho e Galdino, 2014).

Figura 25 – Conexões de módulos em série



Fonte: Pinho e Galdino (2014).

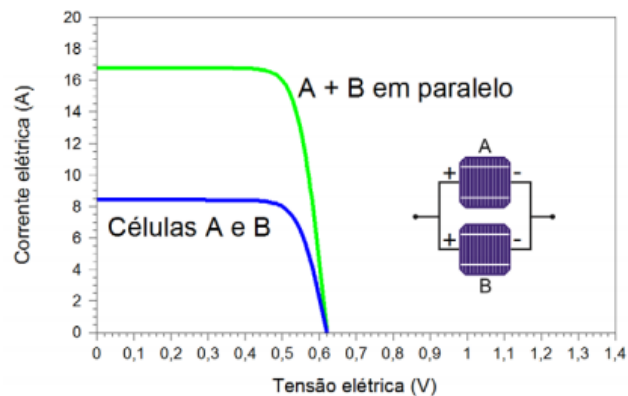
3.15 CONEXÕES DE MÓDULOS EM PARALELO

Quando ligados em paralelo (figura 26), cada terminal positivo é interligado ao terminal positivo do outro módulo, assim como os terminais negativos. Quando iguais os dispositivos e sua irradiância, a corrente é somada e a tensão se mantém invariável.

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n$$

$$V = V_1 = V_2 = \dots = V_n$$

Figura 26 – Conexões de módulos em paralelo



Fonte: Pinho e Galdino (2014).

3.16 NORMATIVA

Abaixo (figura 27) segue as normas recomendadas internacionais e nacionais que abrangem o seguimento da energia fotovoltaica.

Figura 27 - Normas e regulamentos sobre módulos Fotovoltaicos

Org.	Código	Título	Descrição	Aplicação
IEC – International Electrotechnical Commissions	61215: 2005	Crystalline silicon terrestrial photovoltaic (PV) modules – Design qualification and type approval; Edition 2.0;	Estabelece ensaios de qualificação para módulos fotovoltaicos	Módulos de Silício monocristalino (m-Si) e policristalino (p-Si)
	61646: 2008	Thin-film terrestrial photovoltaic (PV) modules - Design qualification and type approval; Edition 2.0;	Estabelece ensaios de qualificação para módulos fotovoltaicos	Módulos de filmes finos (a-Si, CdTe, CIGS, etc)
	61730-2: 2004	Photovoltaic (PV) module safety qualification - Part 1: Requirements for construction; Part 2: Requirements for testing,	A Parte 2 estabelece ensaios para verificação da segurança elétrica e mecânica de módulos fotovoltaicos	Módulos fotovoltaicos
	61701:2011	Salt mist corrosion testing of photovoltaic (PV) modules; Edition 2.0	Estabelece o procedimento de ensaio da resistência de módulos fotovoltaicos à corrosão por névoa salina	Módulos fotovoltaicos
	62108:2007	Concentrator photovoltaic (CPV) modules and assemblies - Design qualification and type approval; Edition 1.0	Estabelece ensaios de qualificação para módulos fotovoltaicos	Módulos fotovoltaicos com concentração
ABNT	NBR 11876:2010	Módulos Fotovoltaicos - Especificação; Segunda Edição	Estabelece requisitos e critérios de aceitação de módulos fotovoltaicos de uso terrestre	Módulos fotovoltaicos
INMETRO	Portaria nº 004, de 04 de janeiro de 2011;	Anexo – Requisitos de Avaliação da Conformidade para Sistemas e Equipamentos para Energia Fotovoltaica (Módulo, Controlador de Carga, Inversor e Bateria).	Especifica os procedimentos de ensaio para etiquetagem de módulos fotovoltaicos (e outros equipamentos).	Módulos fotovoltaicos (e outros equipamentos)

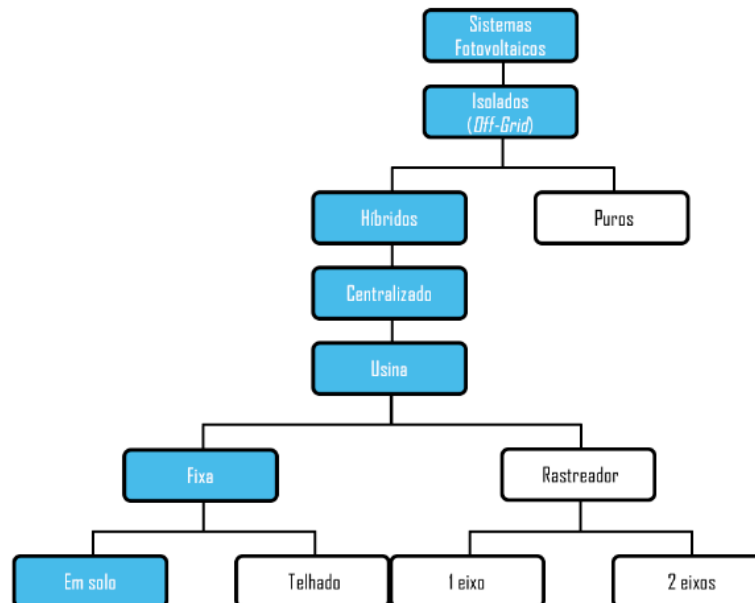
Fonte: Pinho e Galdino (2014).

4. CLASSIFICAÇÃO

Na figura 28, é apresentada uma forma de classificação do sistema fotovoltaico off-grid. Esses podem ser organizados quanto interligação com o sistema de energia elétrica, insulado (off-grid), com configuração que pode ser puro ou híbrido (ABNT, 2008).

O sistema fotovoltaico escolhida tem uma interligação insulada com configuração híbrido e rede uma distribuição centralizado, caracterizado pelo porte de usina. As estruturas podem ser fixas ou rastreadores solar, e neste caso uma estrutura fixa no solo.

Figura 28 - Classificação de sistemas fotovoltaicos



Fonte: Elaborado a partir de (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), 2008) e (LUQUE; HEGEDUS, 2003).

5. METODOLOGIA

Neste Capítulo, será descrito o desenvolvimento do projeto da usina elétrica que se compõe em cinco etapas:

- Definir a demanda de energia elétrica para a Usina;
- Dimensionamento do sistema para suprir essa demanda (obtenção de banco de dados de irradiação e temperatura da província de Cabo Delgado, obtenção da inclinação das placas solar, obtenção da área no qual a estrutura da usina será implementada);
- Efetuar cálculos para dimensionamento do inversor e potência individual e total do módulo fotovoltaico;
- Projetar a estrutura da usina elétrica no software no AutoCAD e Revit;
- O orçamento do projeto.

A primeira etapa, é a definição de demanda de potência de energia elétrica, que mostra a quantidade de energia elétrica transformada em trabalho, medido por aparelho integralizado a cada 15 minutos, conhecido como “Medidor de Demanda”. A unidade de medida usual é o kW. O conceito de Demanda de Potência Elétrica, contudo, por exprimir características, é mais abrangente, sendo apresentado pelas referências a diplomas legais em vigência tais como o Dec. 41.019/57, Dec. 62.724/68, Dec. 1.586/85 e Resolução 456/2000 da ANEEL.

Na Segunda etapa será obtido os Bancos de Dados de Irradiação e de Temperatura da província de Cabo Delgado no Instituto Nacional de Meteorologia de Moçambique (INAM). O INAM realiza medições através de suas estações costeiras e do interior, abastecendo os órgãos governamentais e de pesquisa através de seu banco de dados. Os instrumentos de medição são calibrados periodicamente e os dados são considerados oficiais (Santos et al, 2013). Para a inclinação das placas solar será necessário o conhecimento do hemisfério, por exemplo o hemisfério sul, as placas têm o melhor rendimento com inclinação de 17 graus ao norte geográfico.

Na terceira etapa, cálculos serão efetuados para definir a potência do inversor central e o modelo, a potência dos módulos fotovoltaicos individuais e totais, além dos

cálculos de ângulo de incidência dos raios solares, a escolha do ângulo de inclinação do módulo solar e o espaçamento entre módulos da usina fotovoltaica.

A quarta etapa será a elaboração do projeto solar no software REVIT e o AutoCAD. AutoCAD é uma ferramenta do tipo CAD (*Computer Aided Design*) criada especialmente para o desenvolvimento de projetos no que diz respeito à áreas como arquitetura, construção civil, engenharia, engenharia mecânica, indústria automobilística e outras semelhantes.

Na última etapa será a demonstração do custo financeiro do projeto, que será efetuado três orçamentos em três lojas de material elétrico distintas, sendo elas a Enerluz, ANDE e Eletromil.

6. CONCLUSÃO

Pode-se concluir que a produção de energia limpa e renovável proveniente da energia solar, é uma alternativa excelente para eletrificação em áreas onde há a ausência da cobertura da rede elétrica, principalmente em áreas rurais e isoladas.

Em Moçambique, embora a implementação de um sistema fotovoltaico seja demasiadamente cara, os benefícios tais como a geração de empregos, eletrificação de áreas rurais isolados, redução dos impactos ambientais, compensam o custo. A média anual da irradiação solar em Moçambique está na faixa de 5 a 6kWh/m²/dia, tornando o distrito de Muidumbe favorável para a implementação da usina fotovoltaica que tem a finalidade de eletrificar a região.

REFERÊNCIAS

Atlas sociodemográfico de Moçambique

COSTA, Ricardo Cunha da; PRATES, Cláudia Pimentel Trindade. **O papel das fontes renováveis de energia no desenvolvimento do setor energético e barreiras à sua penetração no mercado**. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 21, p. 5-30, mar. 2005

EDM. **Overview of Moçambique Electricity Sector**. Relatório da Companhia de Eletricidade de Moçambique (EDM). 2012.

FUNAE – Fundo de Energia; Plano Estratégico 2010 - 2014, Maputo,
<https://www.funae.co.mz/images/pdfs/QPR-ProEnergia-Pt-FINAL-Compressed.pdf>

HANKINS, Mark. **Plano de Energias Renováveis para Moçambique**. Plano para levar eletricidade para todo país. Justiça Ambiental de Maputo. 2009.

ISO 9847-1992. **Calibration of field pyranometers by comparison to a reference pyrhelimeter**. 1992.

Ministério dos recursos minerais e energia de Moçambique, 2019

PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Antônio. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro, 2014.

REIS, Lineu Belico dos. **Energia elétrica e sustentabilidade: Aspectos tecnológicos, socioambientais e legais**. Manole, 2014.

Roberto Zilles et al. **Sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica**. Oficina de Textos, São Paulo 2013.

SANTOS, Marcos Herbert Smith dos et al. **Sistemas fotovoltaicos conectados à rede para moçambique**. Acta & Scientiae & Technicae: AS&T, Rio de Janeiro, v. 1, n. 2, p.48-55, dez. 2013.

SEBASTIÃO, António Pedro. **O modelo da eletrificação de moçambique: a importância para o desenvolvimento**, Lisboa, 2016

Em <http://www.cigest.ensinus.pt/pt/edicoes.html>. Acesso: 03 de FEV 2020

SOUZA, Rubem César Rodrigues; DERZI, Silva Rodrigues; CORREIA, José de Castro. **Barreiras e facilitadores para a produção e difusão de Tecnologias de Energias Renováveis na Região Amazônica**. Revista Brasileira de Energia, Amazônia, v. 10, n. 1, p. 1-8, 2004.

VILLALVA, marcelo Gradella; GAZOLI, Jonas Rafael. **Energia Solar Fotovoltaica - Conceitos e Aplicações**. São Paulo: Érica, 2012.

YIN, Robert K. **Estudo de caso: planejamento e métodos** / Robert K. Yin; trad. Daniel Grassi - 2.ed. -Porto Alegre: Bookman, 2001.

WMO – World Meteorological Organization. **CIMO Guide**. Draft First Supplement to the Seventh Edition (2008) of the CIMO - Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation, 2010.