



UNISUL

UNIVERSIDADE DO SUL DE SANTA CATARINA

BRUNO ROZZA

LUIS FERNANDO SEGALA PEREIRA

**PROCESSO AUTOMÁTICO PARA LIMPEZA DE SISTEMA
FOTOVOLTAICO**

Palhoça
2019

BRUNO ROZZA
LUIS FERNANDO SEGALA PEREIRA

**PROCESSO AUTOMÁTICO PARA LIMPEZA DE SISTEMA
FOTOVOLTAICO**

Trabalho de Conclusão Curso
apresentado ao Curso de Graduação em
Engenharia Elétrica da Universidade do Sul de
Santa Catarina como requisito parcial à
obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Djan de Almeida do Rosário, Esp.

Palhoça
2019

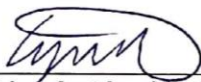
“Há uma força motriz mais poderosa que o vapor, a eletricidade e a energia atômica:
a vontade” (Albert Einstein).

BRUNO ROZZA
LUIS FERNANDO SEGALA PEREIRA

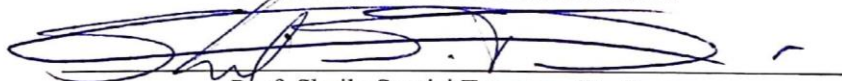
**PROCESSO AUTOMÁTICO PARA LIMPEZA DE SISTEMA
FOTOVOLTAICO**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado à obtenção do título de Engenheiro Eletricista e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia Elétrica da Universidade do Sul de Santa Catarina.

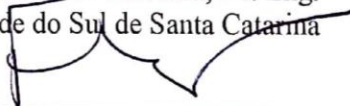
Palhoça, 13 de junho de 2019.



Professor e orientador Djan de Almeida do Rosário, Eng. Esp.
Universidade do Sul de Santa Catarina



Prof. Sheila Santisi Travessa, Dr. Eng.
Universidade do Sul de Santa Catarina



Prof. Fabiano Max da Costa, Eng. Esp.
Universidade do Sul de Santa Catarina

RESUMO

Devido aos impactos negativos que os modelos energéticos baseados no uso de combustíveis fósseis trazem ao meio ambiente, cada vez mais fontes alternativas, com um menor impacto, vêm sendo procuradas e necessárias no cenário energético mundial. A energia solar fotovoltaica, que consiste basicamente na conversão da energia emitida pelo Sol em energia elétrica através do uso de painéis fotovoltaicos, vem crescendo nos últimos anos devido à facilidade na aplicação, assim como a sua fonte de energia, o Sol, ser inesgotável e de livre acesso.

A geração de um sistema fotovoltaico pode ser afetada pelas condições climáticas do local de instalação do sistema. Segundo Messenger e Ventre (2005, p. 162), caso a célula fotovoltaica seja instalada em um local empoeirado, deve-se levar em consideração uma perda de 20% sobre a potência total gerada. Nesses casos é necessário realizar a limpeza mensal do sistema, entretanto é necessário tomar cuidado para não danificar a superfície do painel.

Neste contexto, o presente trabalho apresenta uma proposta de realizar a limpeza do sistema fotovoltaico de forma automática. Após a implementação do mecanismo e os testes realizados, observou-se que, frente às medições de quando o painel estava empoeirado, houve uma melhora em torno de 95%. Logo, o sistema mostrou-se eficiente.

De forma complementar serão apresentados os princípios físicos envolvidos no processo de conversão de energia, os equipamentos necessários para a composição de um sistema fotovoltaico e os tipos de sistemas fotovoltaicos.

Palavras-chave: Energia Solar Fotovoltaica. Eficiência. Limpeza de Forma Automática.

ABSTRACT

Due to the negative impacts that energy models based on the use of fossil fuels bring to the environment, more and more alternative sources with less impact are being sought and needed in the world energy scenario. Photovoltaic solar energy, which basically consists of converting the energy emitted by the Sun into electrical energy through the use of photovoltaic panels, has been growing in recent years due to its ease of application, just as its source of energy, the Sun, is inexhaustible and of free access.

The generation of a photovoltaic system can be affected by the climatic conditions of the installation site of the system. According to Messenger and Ventre (2005, p. 162), if the photovoltaic cell is installed in a dusty place, a loss of 20% over the total power generated must be taken into account. In these cases it is necessary to perform monthly cleaning of the system, however care must be taken not to damage the panel surface.

In this context, the present work presents a proposal to perform the cleaning of the photovoltaic system automatically. After the implementation of the mechanism and the tests performed, it was observed that, compared to the measurements when the panel was dusty, there was an improvement around 95%. Therefore, the system proved to be efficient.

In a complementary way, the physical principles involved in the energy conversion process, the necessary equipment for the composition of a photovoltaic system and the types of photovoltaic system will be presented.

Keywords: Photovoltaic Solar Energy. Efficiency. Automatic Cleaning.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Tipos de Pesquisa Científica.....	13
Figura 2 - Extrato da patente da primeira célula solar, março de 1954.....	15
Figura 3 - Total diário irradiação global horizontal - média anual no Brasil	18
Figura 4 - Componentes de radiação solar sobre um dispositivo fotovoltaico.....	21
Figura 5 - Corte transversal de uma célula fotovoltaica.....	22
Figura 6 - Célula fotovoltaica de silício monocristalino	23
Figura 7 - Célula fotovoltaica de silício policristalino	24
Figura 8 - Célula de silício de filme fino	24
Figura 9 - Encapsulamento da célula fotovoltaica	25
Figura 10 - Associação de bateria em série, paralelo e série/paralelo	29
Figura 11 - Modo de utilização de um controlador de carga.....	30
Figura 12 - Representação de um sistema ON GRID.....	31
Figura 13 - Representação de um sistema OFF GRID	32
Figura 14 - Agentes de Limpeza de Painéis Fotovoltaicos	33
Figura 15 - Sistema automatizado para limpeza.....	36
Figura 16 - Sistema de rastreamento de ângulo azimutal.....	37
Figura 17- Ilustração do sistema de limpeza fotovoltaico automático	40
Figura 18 - Dispositivo para limpeza de painel fotovoltaico automático.....	40
Figura 19 - Arduino UNO	41
Figura 20 – Drive do motor de passo	43
Figura 21 - Sensor de tensão.....	44
Figura 22 - Sensor de corrente.....	44
Figura 23 - Fluxograma do software	45
Figura 24 - Painel solar em condições ideais	46
Figura 25 - Painel com sujeira depositada.....	47

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Matriz de energia elétrica brasileira em 2016	11
Gráfico 2 - Produção mundial de células fotovoltaicas	16
Gráfico 3 - Adição da capacidade de geração de energia por tecnologia em 2017	17
Gráfico 4 - Projeção da geração distribuída no Brasil.....	19
Gráfico 5 - Geração distribuída no Brasil 2017.....	20
Gráfico 6 - Curva característica I-V e P-V para um módulo com potência de 100Wp.....	26
Gráfico 7 - Variação na irradiância solar.....	27
Gráfico 8 - Efeito causado pela variação de temperatura.....	28
Gráfico 9 - Dados coletados	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Especificação do módulo fotovoltaico	38
---	----

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	10
1.1	PROBLEMA DE PESQUISA	11
1.2	JUSTIFICATIVA	12
1.3	OBJETIVOS	12
1.3.1	Objetivo Geral	12
1.3.2	Objetivos Específicos.....	12
1.4	METODOLOGIA	13
1.5	DELIMITAÇÃO DO PROBLEMA	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	15
2.1	HISTÓRICO DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA.....	15
2.2	ENERGIA FOTOVOLTAICA NO BRASIL	17
2.3	SISTEMA FOTOVOLTAICO E SEUS COMPONENTES.....	20
2.3.1	Radiação solar	20
2.3.2	Células fotovoltaicas.....	22
2.3.3	Tipos de células.....	23
2.3.4	Módulo Fotovoltaico	25
2.3.5	Estrutura de suporte	28
2.3.6	Cabos	28
2.3.7	Baterias.....	28
2.3.8	Controlador de carga	30
2.3.9	Inversor	30
2.4	SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	30
2.4.1	Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica.....	31
2.4.2	Sistemas fotovoltaicos desconectados da rede elétrica.....	32
2.5	EFEITO DA SUJEIRA SOBRE O PAINEL FOTOVOLTAICO	33
2.6	LIMPEZA DOS PAINÉIS FOTOVOLTAICOS.....	34
2.6.1	Limpeza Natural.....	35
2.6.2	Limpeza Manual.....	35
2.6.3	Tratamento de superfície.....	36
2.6.4	Limpeza Automatizada.....	36
3	MATERIAIS E MÉTODOS	38
3.1	DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE LIMPEZA AUTOMÁTICA	38

3.1.1	Características dos painéis fotovoltaicos utilizados	38
3.1.2	Descrição do sistema de movimentação	39
3.1.3	Descrição do Hardware	40
3.1.4	Descrição de Software	45
3.2	RESULTADOS.....	46
4	CONCLUSÃO.....	49
4.1	IMPLEMENTAÇÕES FUTURAS	49
ANEXOS		53
ANEXO A – CÓDIGO FONTE		54

1 INTRODUÇÃO

Países buscam meios para ampliar sua oferta de energia elétrica e diminuir as emissões de gases de efeito estufa. Para isso, há necessidade de aumentar o percentual de fontes renováveis nas suas matrizes energéticas. A geração solar vem ganhando notoriedade, já que é de fácil implementação e possui uma fonte de energia renovável.

O Sol é a principal fonte de energia da terra, sem ele não seria possível a existência de vida em nosso planeta. A radiação solar constitui-se numa inesgotável fonte energética, existindo um grande potencial de sua utilização por meio de sistemas de captação e conversão, como por exemplo a térmica e a fotovoltaica (PINHO; GALDINO, 2014).

Segundo Villalva e Gazoli (2013), o efeito fotovoltaico é um fenômeno físico que permite obtenção de energia elétrica, através da conversão direta da energia contida na radiação luminosa, pelo material semicondutor de que é formada a célula fotovoltaica.

De acordo com Pinho e Galdino (2014), no início, o desenvolvimento da tecnologia fotovoltaica foi proposto para empresas do setor de telecomunicações, pois é uma solução de fornecimento de energia para sistemas instalados em localidades com difícil acesso à energia (áreas remotas). Além disso, a corrida espacial também foi e continua sendo um grande impulsionador da tecnologia, uma vez que esta apresenta a melhor relação custo e peso para fornecer energia por longos períodos no espaço.

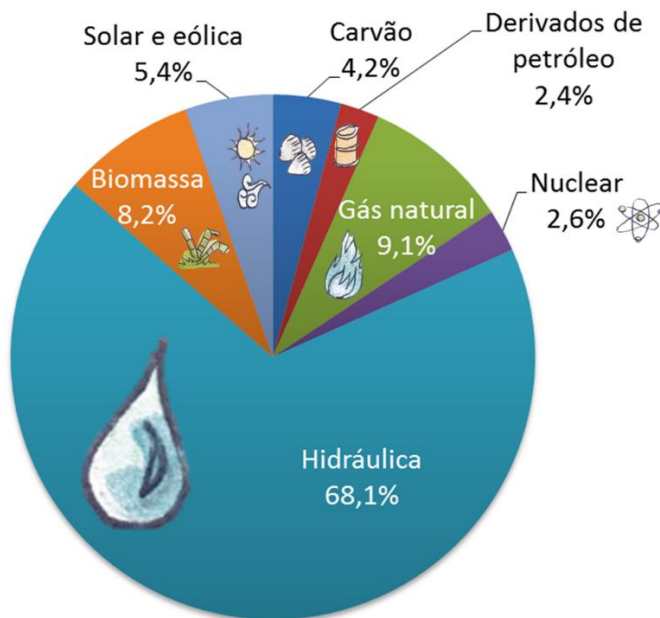
Mesmo seus custos caindo consideravelmente nos últimos anos, um sistema de geração de energia fotovoltaico ainda apresenta custos elevados quando comparado aos métodos que utilizam energias não renováveis. Sendo assim, sua implementação deve ser bem avaliada para ter uma boa relação custo x benefício.

A eficiência energética é um fator que deve ser considerado na geração fotovoltaica, uma vez que, devido a impurezas que o painel fotovoltaico recebe do meio que está instalado, sua eficiência diminui ao longo do tempo. Essa perda pode representar em torno de 20% a menos de energia gerada. Além disso, a sujeira, por tempo prolongado, pode trazer outros prejuízos, tais como: manchas, corrosão, etc. Com isso existe a necessidade de buscar mecanismos que facilitem a limpeza do painel com o intuito de deixar o sistema sempre operando com boa eficiência.

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

No Brasil, a principal fonte de energia para geração de eletricidade é a energia hidráulica, conforme pode ser observado na Gráfico 1. Embora esta seja considerada uma fonte de energia renovável e limpa, causa grandes alterações ambientais na fauna, flora e no ecossistema como um todo. Além do fato dos impactos ambientais, as principais bacias hidrográficas com alta capacidade de geração de energia já estão quase que esgotadas (PEREIRA et al.; 2006).

Gráfico 1 - Matriz de energia elétrica brasileira em 2016



Fonte: Epe (2018)

Apesar da energia hidráulica ter a maior proporção, atualmente há a tendência de crescimento por outros modelos de energias renováveis. A geração de energia fotovoltaica, por exemplo, é vista como uma fonte de energia limpa, sustentável e de fácil instalação, que se baseia em uma fonte renovável de energia amplamente disponível, a energia solar.

Esse modelo de geração de energia tem crescido exponencialmente nos últimos anos, principalmente no modelo de geração distribuída, uma vez que, permite a utilização de sistemas fotovoltaicos em residências unifamiliares e multifamiliares para geração da própria energia.

A eficiência energética é um fator que deve ser considerado na geração fotovoltaica e esse fator remeteu ao estudo desse trabalho, uma vez que, as placas utilizadas para a geração

de energia, com o passar dos meses diminuem sua eficiência em aproximadamente 20% devido ao acúmulo de impurezas sobre sua superfície. Além da redução na eficiência, o acúmulo de sujeira por tempo prolongado pode causar manchas, fungos e corrosão nos módulos, reduzindo sua vida útil, que é estimada entre 25 e 30 anos.

1.2 JUSTIFICATIVA

Diante do problema mencionado, surgiu a necessidade de realizar uma pesquisa orientada ao estudo e desenvolvimento de uma solução capaz de manter a eficiência de um sistema fotovoltaico por mais tempo. Neste sentido, espera-se através dessa pesquisa desenvolver um dispositivo apto a fazer a limpeza de forma periódica e automática de um sistema fotovoltaico.

1.3 OBJETIVOS

Para validação do tema proposto, foram definidos um objetivo geral e quatro objetivos específicos, apresentados a seguir.

1.3.1 Objetivo Geral

Desenvolver um equipamento capaz de auxiliar na limpeza automática das placas fotovoltaicas com o intuito de manter sua eficiência energética.

1.3.2 Objetivos Específicos

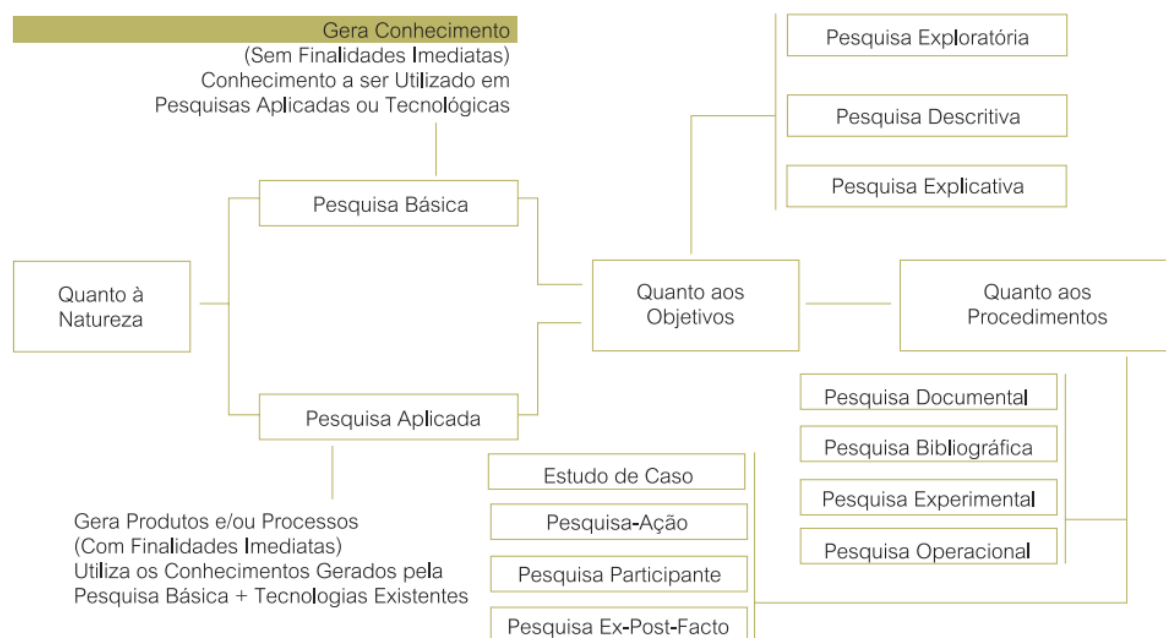
- a) Descrever o funcionamento de um sistema fotovoltaico e os principais elementos que o compõem;
- b) Coletar dados e analisar a perda de eficiência dos painéis fotovoltaicos em virtude da sujeira acumulada;
- c) Avaliar os benefícios da solução proposta.
- d) Sugerir melhorias e possíveis adaptações para implementações futuras.

1.4 METODOLOGIA

De um modo geral, a metodologia tem por objetivo examinar, descrever e avaliar métodos e técnicas de pesquisa visando a resolução de problemas. Prodanov e Freitas (2013), acrescentam que “Metodologia é a aplicação de procedimentos e técnicas que devem ser observados para construção do conhecimento, com o propósito de comprovar sua validade e utilidade nos diversos âmbitos da sociedade”.

Existem várias formas de classificar as pesquisas, sendo que as formas clássicas de classificação serão apresentadas na Figura 1.

Figura 1 - Tipos de Pesquisa Científica



Fonte: Prodanov e Freitas (2013, p.51)

Para este trabalho, a metodologia escolhida será a pesquisa aplicada, uma vez que, será necessário gerar o conhecimento para a implementação da aplicação prática voltada a solução de um problema específico, nesse caso, o desenvolvimento do sistema de limpeza automatizado.

Quanto aos objetivos, a pesquisa será classificada como exploratória com abordagem quantitativa, já que a pesquisa será baseada em um assunto específico e será necessário a aquisição de dados que servirão como base para comparar e comprovar a eficácia do projeto. Segundo Severino (2007), “a pesquisa exploratória busca apenas levantar informações sobre um determinado objeto, delimitando assim um campo de trabalho, mapeando

as condições de manifestação de objeto”. Prodanov e Freitas (2013), complementam que a pesquisa exploratória possui planejamento flexível, o que permite o estudo do tema sob diversos ângulos e aspectos. Em geral, envolve:

- Levantamento bibliográfico;
- Entrevistas com pessoas que tiveram experiências práticas com o problema pesquisado;
- Análise de exemplos que estimulem a compreensão.

A pesquisa bibliográfica também será utilizada, já que se faz necessário conhecer e analisar as principais contribuições teóricas existentes sobre sistemas fotovoltaicos, assim como os métodos de limpeza utilizados.

1.5 DELIMITAÇÃO DO PROBLEMA

Devido à sua extensão territorial, o Brasil possui diferentes climas, fazendo com que seja necessário mais do que um projeto para atender a todas as suas regiões. Sendo assim, este trabalho ficará restrito a criação de um dispositivo que seja capaz de retirar somente a poeira acumulada sobre o painel fotovoltaico.

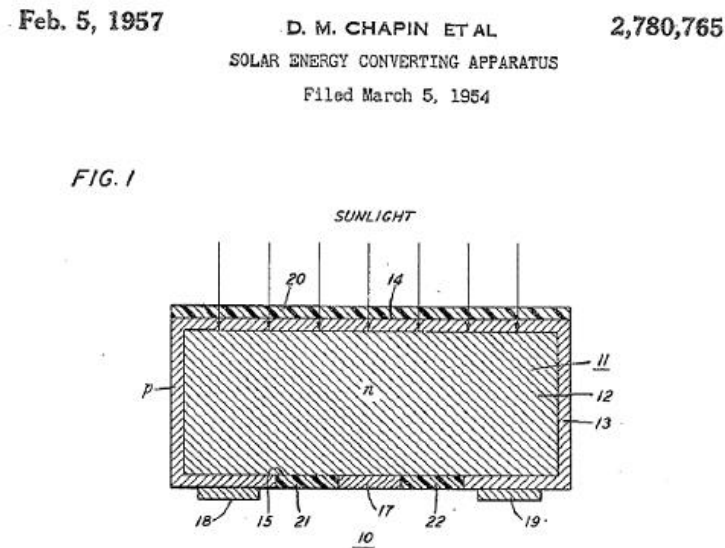
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 HISTÓRICO DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

A energia fotovoltaica é obtida por meio da conversão da luz do sol em energia elétrica através do efeito fotovoltaico. Tal efeito, foi descoberto em 1839 por Edmond Becquerel que observou a existência de uma pequena diferença de potencial nos terminais de um eletrodo metálico, mergulhado em uma solução de eletrólito, quando submetido a uma fonte de luz. Mais tarde, em 1877, foi desenvolvido o primeiro dispositivo sólido capaz de gerar eletricidade através do efeito fotovoltaico, utilizando-se das características fotocondutoras do selênio, no entanto, sua eficiência era na ordem de 0,5% (BRITO, 2013).

O avanço tecnológico aliado aos estudos relacionados aos processos de purificação e dopagem dos semicondutores (transistores de silício), permitiram a concepção da primeira célula solar de silício moderna em 1954 (Figura 2), este com características semelhantes às encontradas atualmente, apesar de apresentar uma eficiência em torno de 6% (BRITO, 2013).

Figura 2 - Extrato da patente da primeira célula solar, março de 1954



Fonte: Brito (2013, p. 2).

Segundo Pinho e Galdino (2014), inicialmente, o desenvolvimento da tecnologia fotovoltaica foi proposto para empresas do setor de telecomunicações como sendo uma fonte de energia para sistemas instalados em localidades com difícil acesso à energia (áreas remotas). Além disso, a corrida espacial também foi e continua sendo um grande impulsionador da

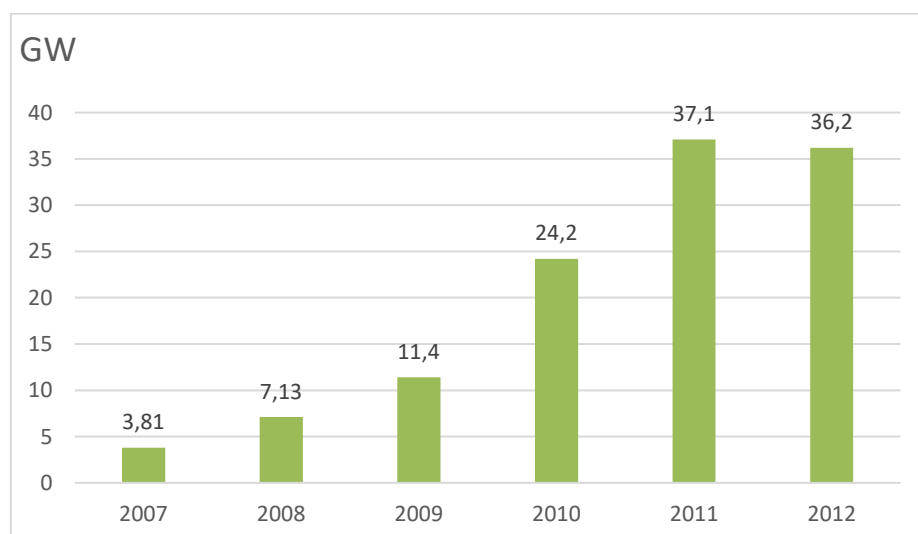
tecnologia, uma vez que esta apresenta a melhor relação custo e peso para fornecer energia por longos períodos no espaço.

A crise mundial do petróleo de 1973 ampliou a necessidade de se buscar fontes de energia alternativas e impulsionou ainda mais o campo de pesquisas relacionadas ao aproveitamento da energia solar e a busca por materiais e processos que tornassem as células fotovoltaicas mais eficientes e acessíveis para aplicações terrestres. Em 1978, a produção fotovoltaica já superava 1 MWp/ano. No final dessa década, um outro fator que impulsionou o desenvolvimento das fontes de energia limpa, incluindo a energia solar, foi um forte compromisso com a redução de CO₂, conforme acordo firmado na criação do protocolo de Kyoto em 1997 (PINHO; GALDINO, 2014).

A produção mundial em 1998 de células fotovoltaicas totalizou 150 MWp. Um propulsor no crescimento do mercado fotovoltaico foi o rápido aumento da produção chinesa, observado desde 2006. No começo dos anos 2000, a Ásia não figurava entre os dez maiores fabricantes do mundo, mas em 2008, três destes eram da China e um de Taiwan. Já em 2009, a China ocupava a liderança na fabricação de módulos (PINHO; GALDINO, 2014).

A energia solar é abundante em nosso planeta, entretanto ainda é pouco utilizada quando entramos no mérito de geração de energia elétrica. Nos países desenvolvidos este cenário vem mudando, uma vez que incentivos foram concedidos para a instalação de sistemas fotovoltaicos. O Gráfico 2 apresenta a evolução da produção mundial de células fotovoltaicas. Só em 2012 foram produzidos cerca de 36,2 GWp, o que equivale a mais de duas vezes e meia a potência da usina hidroelétrica de Itaipu (PINHO; GALDINO, 2014).

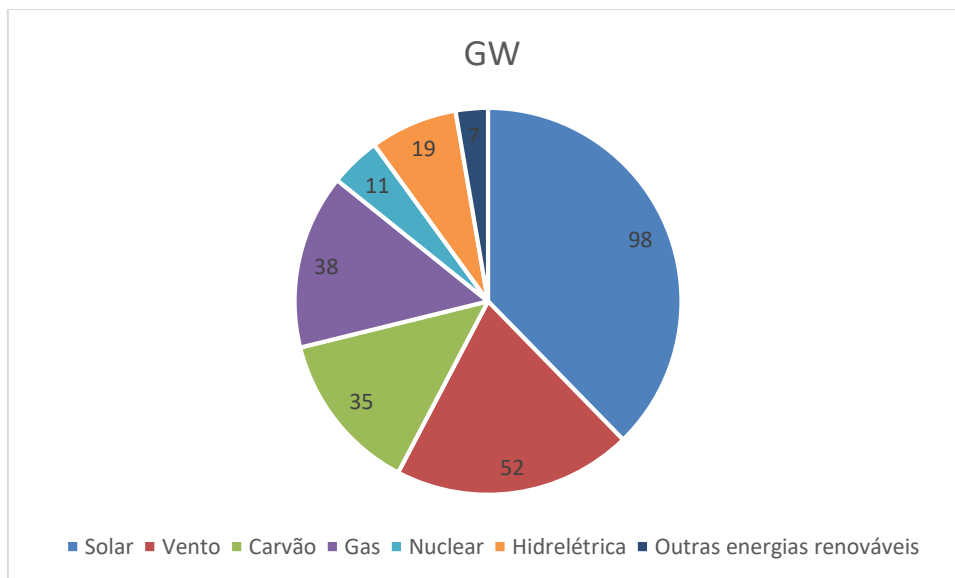
Gráfico 2 - Produção mundial de células fotovoltaicas



Fonte: Modificado de (Roney 2013)

O investimento na geração de energia fotovoltaica continua crescendo, de acordo com a Bloomberg New Energy Finance (BNEF) em seu novo relatório anual, os investimentos em geração solar totalizaram US\$ 160,8 bilhões em 2017, alta de 18% frente ao ano anterior. Conforme observado no Gráfico 3, é notável o aumento da capacidade de geração de energia solar. Além do grande potencial global para geração de energia solar, outro fator importante para o investimento segundo o presidente da BNEF, Jon Moore, é a redução dos custos de um sistema fotovoltaico típico, os quais são 25% menores do que quando comparados ao ano de 2015.

Gráfico 3 - Adição da capacidade de geração de energia por tecnologia em 2017



Fonte: Modificado pelos autores de Abraham Louw (2018, p.34)

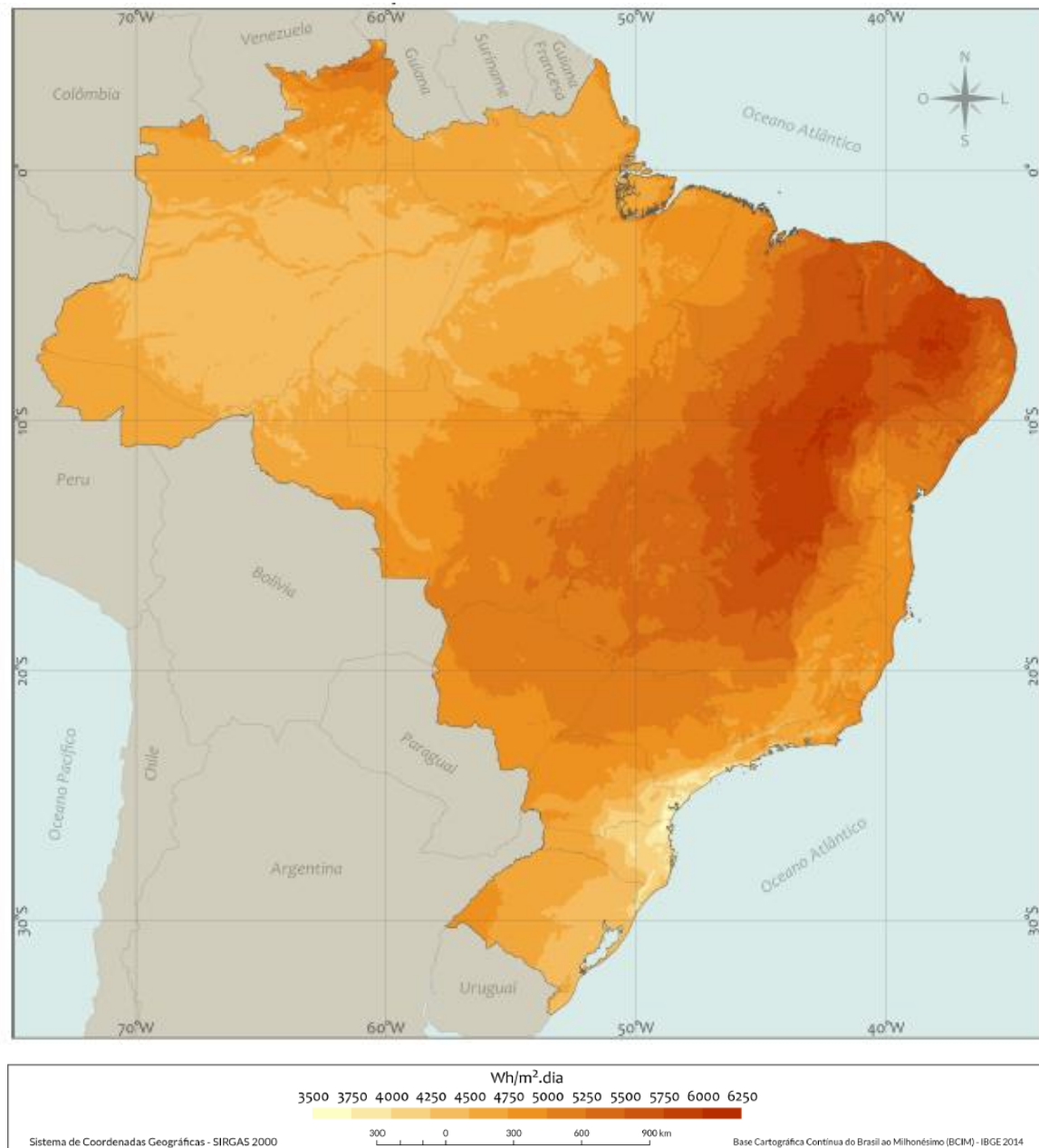
2.2 ENERGIA FOTOVOLTAICA NO BRASIL

O interesse pela utilização de energias renováveis no Brasil vem aumentando ao longo dos anos com a evolução da tecnologia e à medida que o custo de investimento nessas tecnologias vem se tornando mais acessível. Dentre os modelos de geração de energia, os sistemas fotovoltaicos apresentam um enorme potencial de utilização, além de causar pouco impacto ao meio ambiente.

O Brasil possui uma localização geográfica privilegiada, apresentando um grande potencial para o aproveitamento da energia solar durante todo o ano (PEREIRA et al., 2006). Além disso, apresenta um alto índice de irradiação em praticamente todo seu território, conforme mostra a Figura 3. Contudo, apresenta baixo aproveitamento desse benefício para

geração de energia elétrica se comparado com os países europeus, nos quais a radiação solar é menor e a tecnologia fotovoltaica é muito mais difundida (PINHO; GALDINO, 2014).

Figura 3 - Total diário irradiação global horizontal - média anual no Brasil

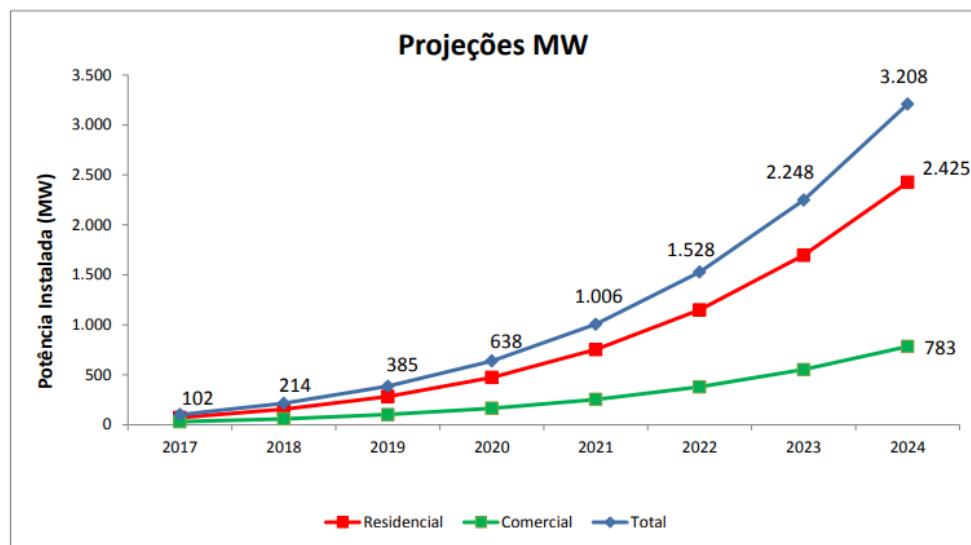


Fonte: Pereira et al. (2017)

De acordo com os dados do Ministério de Minas e Energia (MME), os novos empreendimentos solares devem gerar investimentos de R\$ 8 bilhões até 2021 e garantir mais 1,8 (GWp) gigawatts-pico de potência no Brasil até 2022, não levando em consideração a geração distribuída.

Por outro lado, a geração distribuída, ou seja, quando o consumidor gera sua própria energia elétrica, tem evoluído exponencialmente, como pode ser observado no Gráfico 4. Isso ocorreu principalmente devido a regulamentação da micro e minigeração pela Resolução Normativa nº 482/2012. Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2017), estima-se um equivalente a 3,2 GW de potência instalada até 2024.

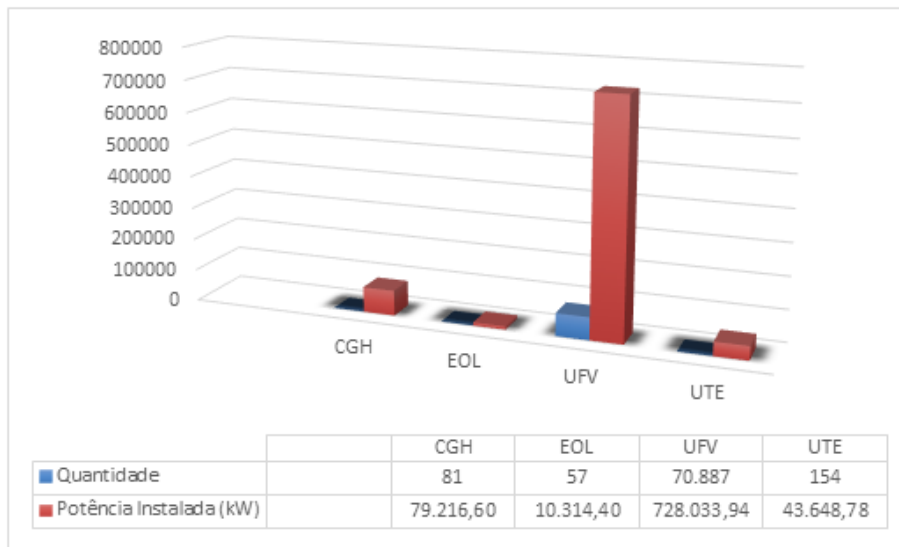
Gráfico 4 - Projeção da geração distribuída no Brasil



Fonte: Aneel (2017)

Em janeiro de 2017, a ANEEL compartilhou a quantidade de conexões referentes à geração distribuída no Brasil. No total são 71.179 conexões no país que representam uma potência instalada de 861.213,72 kW. A fonte mais utilizada é a solar com 70.887 KW (ANEEL, 2017). O Gráfico 5 mostra os dados comentados anteriormente.

Gráfico 5 - Geração distribuída no Brasil 2017



Fonte: Aneel (2017).

2.3 SISTEMA FOTOVOLTAICO E SEUS COMPONENTES

Um sistema fotovoltaico é capaz de fornecer energia elétrica através da conversão da luz em energia elétrica. É considerado um sistema de geração descentralizada, pois, diferente das grandes usinas geradoras, nas quais é gerada uma enorme quantidade de energia distante dos grandes centros consumidores, os sistemas fotovoltaicos normalmente apresentam suas unidades próximas aos centros de consumo. Nesta seção são apresentados os princípios físicos envolvidos no processo de conversão de energia, os equipamentos necessários para a composição de um sistema fotovoltaico e os tipos de sistemas fotovoltaicos.

2.3.1 Radiação solar

O sol é a principal fonte de energia da terra, sem ele não seria possível a existência de vida em nosso planeta. A radiação solar constitui-se numa inesgotável fonte energética, existindo um grande potencial de sua utilização por meio de sistemas de captação e conversão, como por exemplo a térmica e a fotovoltaica (PINHO; GALDINO, 2014).

Conforme Messenger e Ventre (2005, p. 44):

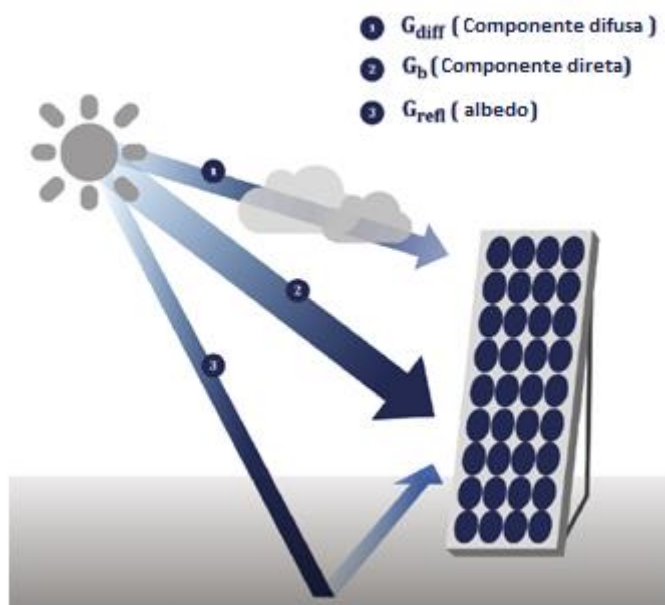
The sun provides the energy needed to sustain life in our solar system. In one hour, the Earth receives enough energy from the sun to meet its energy needs for nearly a year. In other words, this is about 5000 times the input to the Earth's energy budget from all other sources.

A transmissão da energia solar para a terra acontece por meio da radiação eletromagnética. Essa radiação é constituída de ondas eletromagnéticas que possuem diferentes frequências e comprimentos de onda (VILLALVA; GAZOLI, 2013).

As ondas eletromagnéticas provenientes do Sol produzem diferentes efeitos sobre os objetos e seres vivos. O conjunto de todas as frequências de ondas eletromagnéticas emitidas pelo Sol é chamado de espectro de radiação solar. Todo o espectro de radiação, o que inclui ondas visíveis ao olho humano e as não visíveis, transportam energia, que podem ser aproveitadas na forma de calor ou energia elétrica (VILLALVA; GAZOLI, 2013).

Durante o processo de propagação da radiação solar, apenas uma parte da energia transmitida atinge a superfície, uma vez que, há perdas causadas devido ao processo de reflexão e absorção dos raios solares pela atmosfera. A parte da radiação que chega superfície terrestre é composta por uma componente direta e por uma componente difusa. Dependendo da sua orientação, um dispositivo fotovoltaico pode também receber parte desta irradiação refletida, influenciando então, no seu comportamento. Esta parcela é conhecida como albedo, conforme mostra a Figura 4, (ONUDI, 2011).

Figura 4 - Componentes de radiação solar sobre um dispositivo fotovoltaico



Fonte: Modificado de (ONUDI, 2011).

2.3.2 Células fotovoltaicas

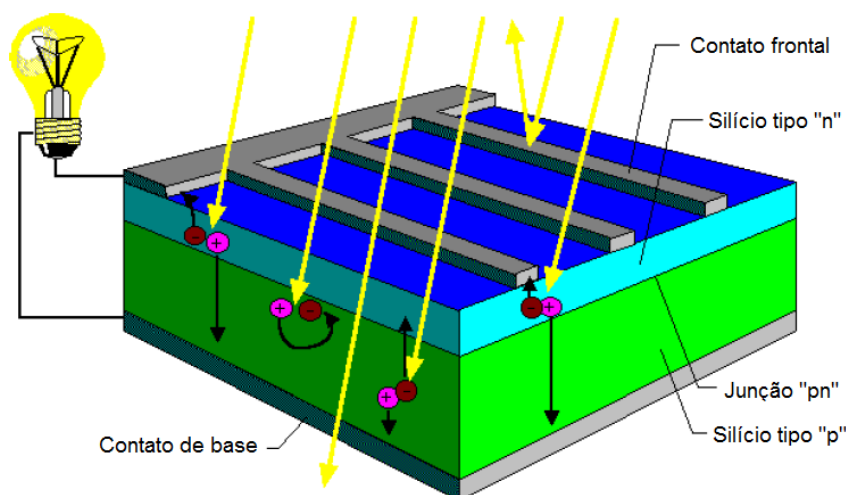
Segundo Villalva e Gazoli (2013), o efeito fotovoltaico é um fenômeno físico que permite obtenção de energia elétrica, através da conversão direta da energia contida na radiação luminosa, pelo material semicondutor de que é formada a célula fotovoltaica.

O efeito fotovoltaico ocorre em materiais semicondutores capazes de absorver a energia dos fótons presentes na radiação luminosa incidente e transformar em eletricidade (ZILLES, 2012). Para que o material semicondutor seja capaz de absorver a energia dos fótons e gerar eletricidade, é necessário que ele passe por um processo de dopagem, no qual são adicionadas impurezas químicas com a finalidade de dotá-lo de propriedades de condução. Esse processo faz com que haja a criação das lacunas (cargas positivas) e elétrons livres (cargas negativas).

Cada célula possui uma camada de material silício tipo N e outra mais espessa do tipo P. As camadas separadas são eletricamente neutras, mas caso sejam unidas, aparecerá na junção (P-N) um campo elétrico devido aos elétrons livres do silício tipo N que preenchem os vazios da estrutura do silício do tipo P.

Ao incidir radiação solar sobre a célula, os fótons incidentes colidem com os elétrons da estrutura de silício fornecendo energia e transformando-os em condutores. Devido ao campo elétrico gerado na junção, os elétrons são orientados, indo do material tipo P para o tipo N. Esse movimento faz surgir uma corrente elétrica. Enquanto houver radiação solar na célula, a corrente se manterá. A intensidade da corrente é proporcional a intensidade da radiação solar incidente (CRESESB, 2006).

Figura 5 - Corte transversal de uma célula fotovoltaica



Fonte: CRESESB, 2006.

2.3.3 Tipos de células

Ao longo das últimas décadas, diversas tecnologias de fabricação de células fotovoltaicas vêm sendo estudadas. As células fotovoltaicas de silício mais conhecidas são: células de silício monocristalino, células de silício policristalino e células de filme fino de silício.

2.3.3.1 Silício Monocristalino

Nesse tipo de célula fotovoltaica, é utilizado o silício monocristalino m-Si, na qual, o monocristal é crescido a partir de um banho de silício fundido de alta pureza. Esse processo envolve altas temperaturas e um intenso consumo de energia, sendo que o tempo necessário para que o módulo gere energia equivalente a utilizada em sua fabricação é superior a dois anos (RUTHER, 2004).

Conforme CRESESB (2006), as células de silício monocristalino são as mais utilizadas e comercializadas, já que em geral apresentam as maiores eficiências, podendo chegar em 18%.

Figura 6 - Célula fotovoltaica de silício monocristalino



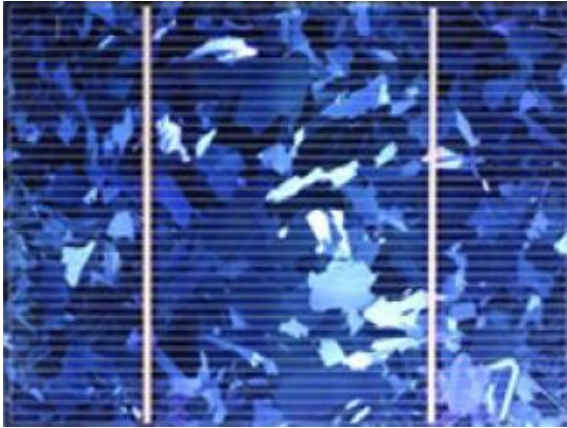
Fonte: Pinho, Galdino (2014)

2.3.3.2 Silício Policristalino

O silício policristalino possui um processo mais barato do que o utilizado nas células de silício monocristalino. As células de silício policristalino são cortadas de cristais de silício multifacetados e possuem aparência heterogênea sendo normalmente encontradas na cor

azul. Sua eficiência é reduzida, ficando no intervalo de 13 a 15 %, entretanto é compensada pelo menor custo de fabricação (VILLALVA; GAZOLI, 2013).

Figura 7 - Célula fotovoltaica de silício policristalino



Fonte: Pinho, Galdino (2014)

2.3.3.3 Silício de filme fino

A célula de silício de filme fino possui uma tecnologia mais recente que a célula cristalina. São fabricados através da deposição de finas camadas de silício, sobre uma superfície que pode ser flexível ou rígida. Para a fabricação, a temperatura necessária é de 200 a 500 °C, o que é muito inferior aos 1500 °C necessários para a fabricação de células cristalinas.

Apesar de ter um custo menor que célula fotovoltaica cristalina, sua eficiência fica na ordem de 10 % e consequentemente necessitam de uma maior área para produzir a mesma quantia de energia. (VILLALVA; GAZOLI, 2013).

Figura 8 - Célula de silício de filme fino



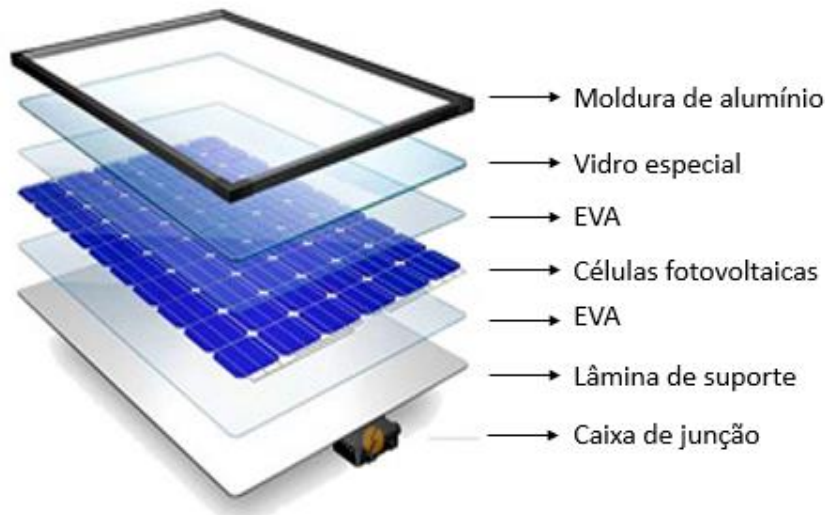
Fonte: Pinho, Galdino (2014)

2.3.4 Módulo Fotovoltaico

Um módulo fotovoltaico é composto por um conjunto de células conectadas em série e/ou paralelo, para produzir corrente e tensão maiores e montadas em uma estrutura que promove a proteção das células. A Figura 9 apresenta os componentes de um módulo fotovoltaico de silício cristalino

O módulo fotovoltaico é formado por um conjunto de células fotovoltaicas interligadas eletricamente e encapsuladas por uma estrutura que lhe confere rigidez e resistência física.

Figura 9 - Encapsulamento da célula fotovoltaica



Fonte: Adaptado de Portal Solar.

2.3.4.1 Curva característica

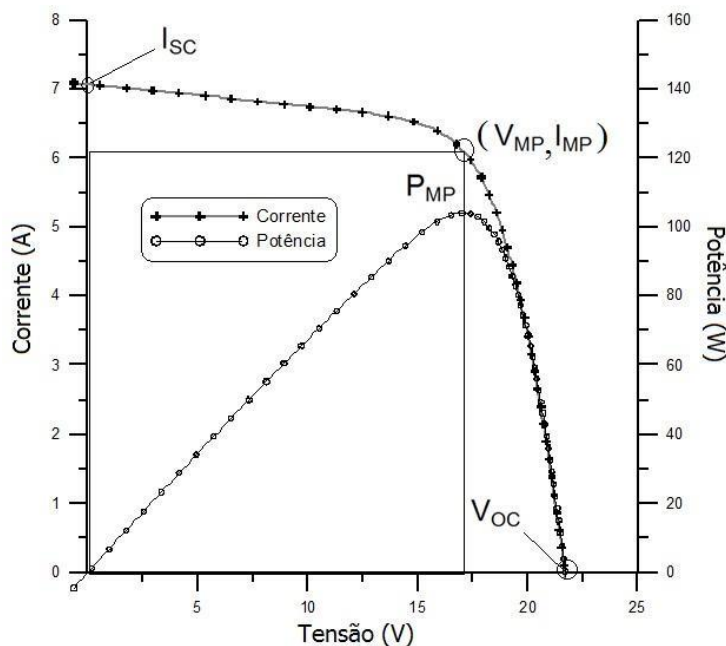
No mercado, comumente um módulo é identificado pela sua potência elétrica de pico (Wp), contudo outras características também devem ser analisadas. A definição da potência de pico de um módulo fotovoltaico é obtida nas condições de ensaio STC (*Standard Test Conditions*), considerando irradiância solar de 1.000 W/m^2 sob uma distribuição espectral padrão para AM 1,5 e temperatura de célula de 25°C (PINHO; GALDINO, 2014).

É importante observar que as características elétricas utilizadas para caracterizar um módulo mudam de acordo com a temperatura e irradiância solar que incidem sobre o painel (PINHO; GALDINO, 2014)

Quando há irradiância solar no painel, uma tensão pode ser medida entre os terminais do dispositivo. A tensão observada em um módulo desconectado (aberto) é a tensão de circuito aberto (V_{oc}). Contudo, se os terminais desse módulo forem conectados, mede-se sua corrente de curto-circuito (I_{sc}). Para a potência real do painel, estes dados são pouco relevantes (PINHO; GALDINO, 2014)

Segundo Pinho e Galdino (2014), um dos ensaios mais completos para determinar as características elétricas de um módulo fotovoltaico é o traçado de sua curva característica I-V. No teste, o módulo é submetido às condições padrão de ensaio e com o auxílio de uma fonte de tensão variável realiza-se uma varredura entre uma tensão negativa de poucos volts até ultrapassar a tensão de circuito aberto do módulo. Durante esta varredura os valores de tensão e corrente são registrados, permitindo então o traçado de uma curva característica, conforme gráfico 6.

Gráfico 6 - Curva característica I-V e P-V para um módulo com potência de 100Wp



Fonte: Pinho, Galdino (2014)

Para cada ponto na curva $I \times V$, o produto entre corrente x tensão representa a potência gerada para aquela condição de operação em específico. Além da curva $I \times V$, o Gráfico 6 apresenta uma curva da potência em função da tensão, chamada de curva $P \times V$, que identifica o máximo valor de potência (PINHO; GALDINO, 2014).

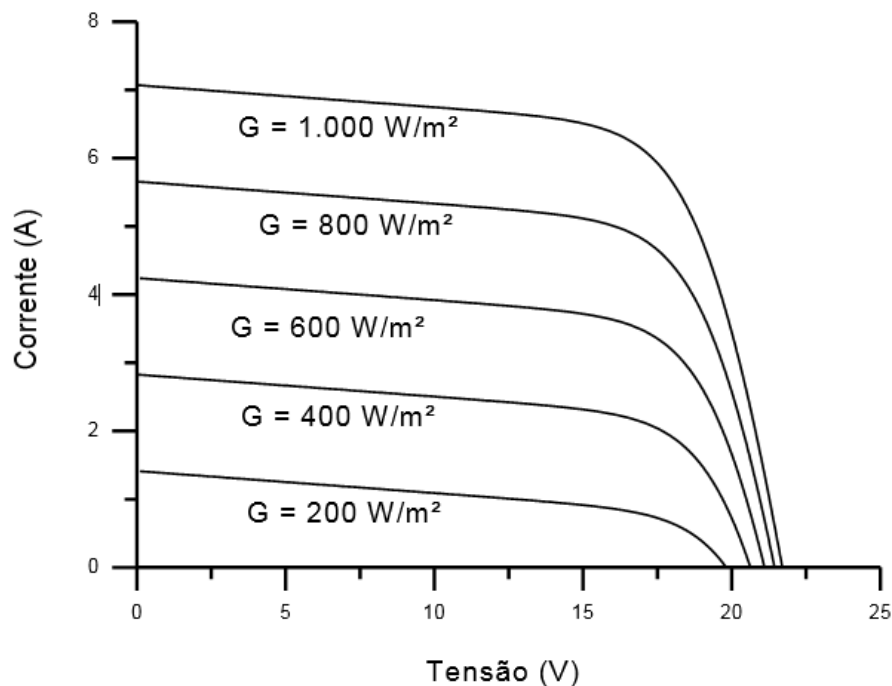
2.3.4.2 Fatores que alteram as características elétricas dos módulos

Os módulos fotovoltaicos sofrem influências devido a alguns fatores internos, tais como: irradiação solar e temperatura nas células.

2.3.4.2.1 Efeito da irradiação solar

A corrente elétrica que o módulo pode produzir está diretamente ligada à intensidade de radiação solar que o módulo recebe. Sendo assim, quando maior sua área, maior será a corrente elétrica produzida (VILLALVA, GAZOLI, 2013). Tal fato é possível de observar no Gráfico 7.

Gráfico 7 - Variação na irradiância solar



Fonte: Pinho, Galdino (2014)

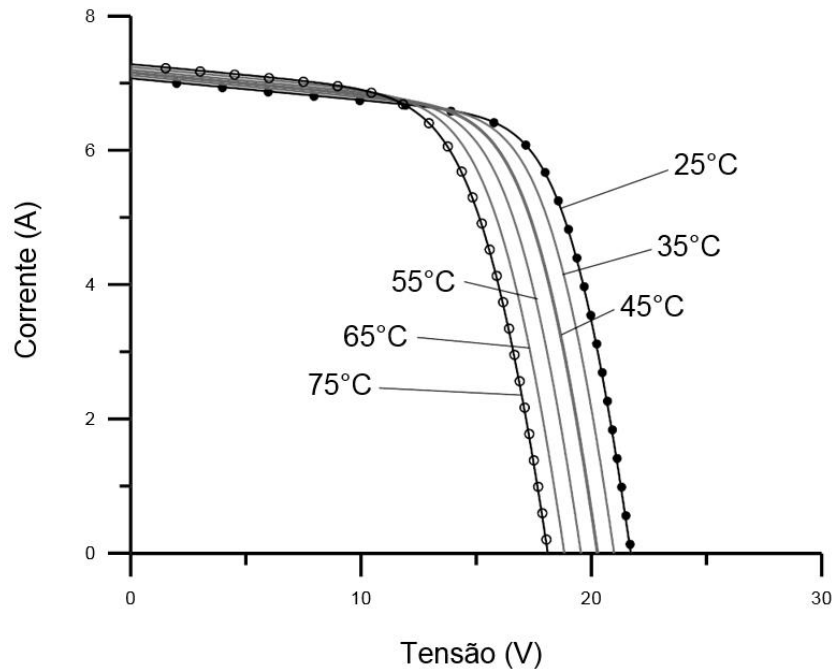
2.3.4.2.2 Efeito da temperatura

A temperatura tem influência na produção de energia do módulo fotovoltaico. Em temperaturas mais elevadas, as tensões produzidas pelo módulo fotovoltaico serão menores e para as temperaturas mais baixas, maiores.

O Gráfico 8, mostra diferentes curvas IxV para diversas temperaturas de célula. É evidente que há uma queda de tensão importante com o aumento da temperatura da célula. A

corrente sofre uma elevação muito pequena que não compensa a perda causada pela diminuição da tensão (PINHO; GALDINO, 2014).

Gráfico 8 - Efeito causado pela variação de temperatura



Fonte: Pinho, Galdino (2014)

2.3.5 Estrutura de suporte

São projetados para suportar e servir como apoio aos painéis solares. Para determinar o tipo de suporte, deve-se levar em consideração o tipo de painel, assim como a inclinação desejada.

2.3.6 Cabos

Responsáveis pela interligação elétrica do módulo fotovoltaico e da caixa de junção, garantindo o fluxo de energia do sistema. A escolha do cabo também está associada ao tipo de painel, pois há diferentes potências entre os modelos disponíveis no mercado.

2.3.7 Baterias

Devido à incerteza da radiação solar ao longo dos dias e a necessidade de fornecimento constante, a bateria é utilizada para armazenar energia para que possa ser utilizada

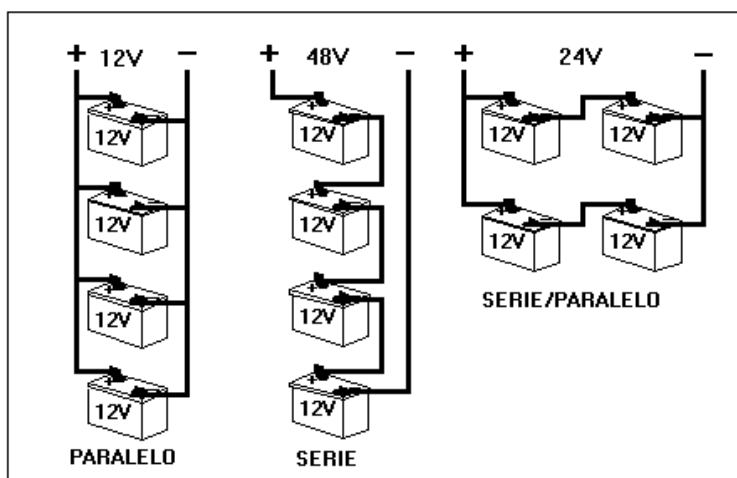
em dias nublados, chuvosos e período noturno onde a geração de energia através dos painéis fotovoltaicos não é suficiente.

As características buscadas para um sistema de armazenamento são: longo tempo de vida, alto número de ciclos, resistência a períodos de baixa carga, alta eficiência e baixo custo (ONUDI, 2011).

2.3.7.1 Banco de baterias

Há três maneiras de as baterias serem agrupadas para formarem os bancos de baterias: série, paralelo e série/paralelo. A associação em série permite maiores tensões, pois a tensão resultante será a soma da tensão de cada bateria e a corrente fornecida será a mesma fornecida por uma bateria. Entretanto, a associação em paralelo possibilita um maior fornecimento de corrente elétrica com a mesma tensão, já que a tensão do conjunto é a mesma que a de uma bateria, mas as correntes de cada bateria são somadas. Esse tipo de arranjo é utilizado quando há a necessidade de manter um nível de tensão baixo e mesmo assim proporcionar maior capacidade de corrente. Por fim, para conseguir agregar as duas características mencionadas anteriormente, aumento da tensão e maior capacidade de corrente, é possível ligar o sistema em série/paralelo. Primeiro são associadas baterias em série para ter uma maior tensão e posteriormente são acrescentados os conjuntos em paralelo para ter uma maior corrente de saída. Na Figura 10 são mostrados os diferentes tipos de ligações (VILLALVA; GAZOLI, 2013).

Figura 10 - Associação de baterias em série, paralelo e série/paralelo

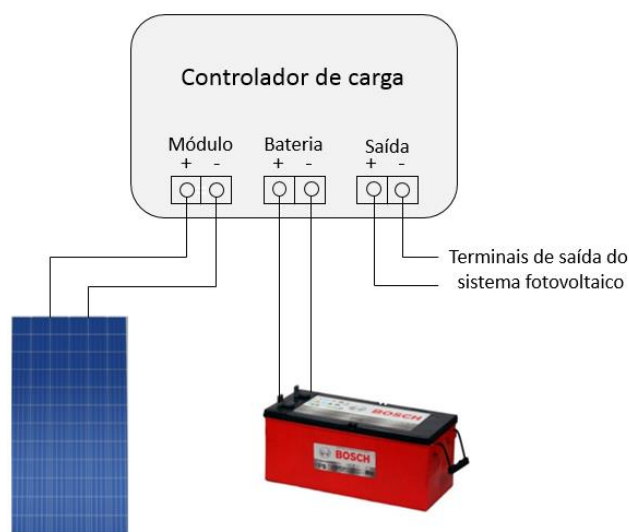


Fonte: ALTOGAGREEN (2016)

2.3.8 Controlador de carga

Sistemas que possuem baterias ou banco de baterias devem utilizar controlador de carga, pois os sistemas fotovoltaicos produzem mais ou menos energia de acordo com a quantidade de luz, e é esse dispositivo que faz a devida conexão entre o painel fotovoltaico e a bateria, evitando que haja sobrecarga ou descarga excessiva sobre a bateria, prolongando sua vida útil (VILLALVA; GAZOLI, 2013).

Figura 11 - Modo de utilização de um controlador de carga



Fonte: Adaptado de VILLALVA; GAZOLI, 2013

2.3.9 Inversor

É um dispositivo eletrônico responsável por converter a tensão e corrente contínua (CC) fornecida pelos painéis em tensão e corrente alternada (CA). Isso se faz necessário, já que a maioria dos aparelhos eletrodomésticos estão projetados para trabalhar com a rede elétrica de tensão alternada (VILLALVA; GAZOLI, 2013).

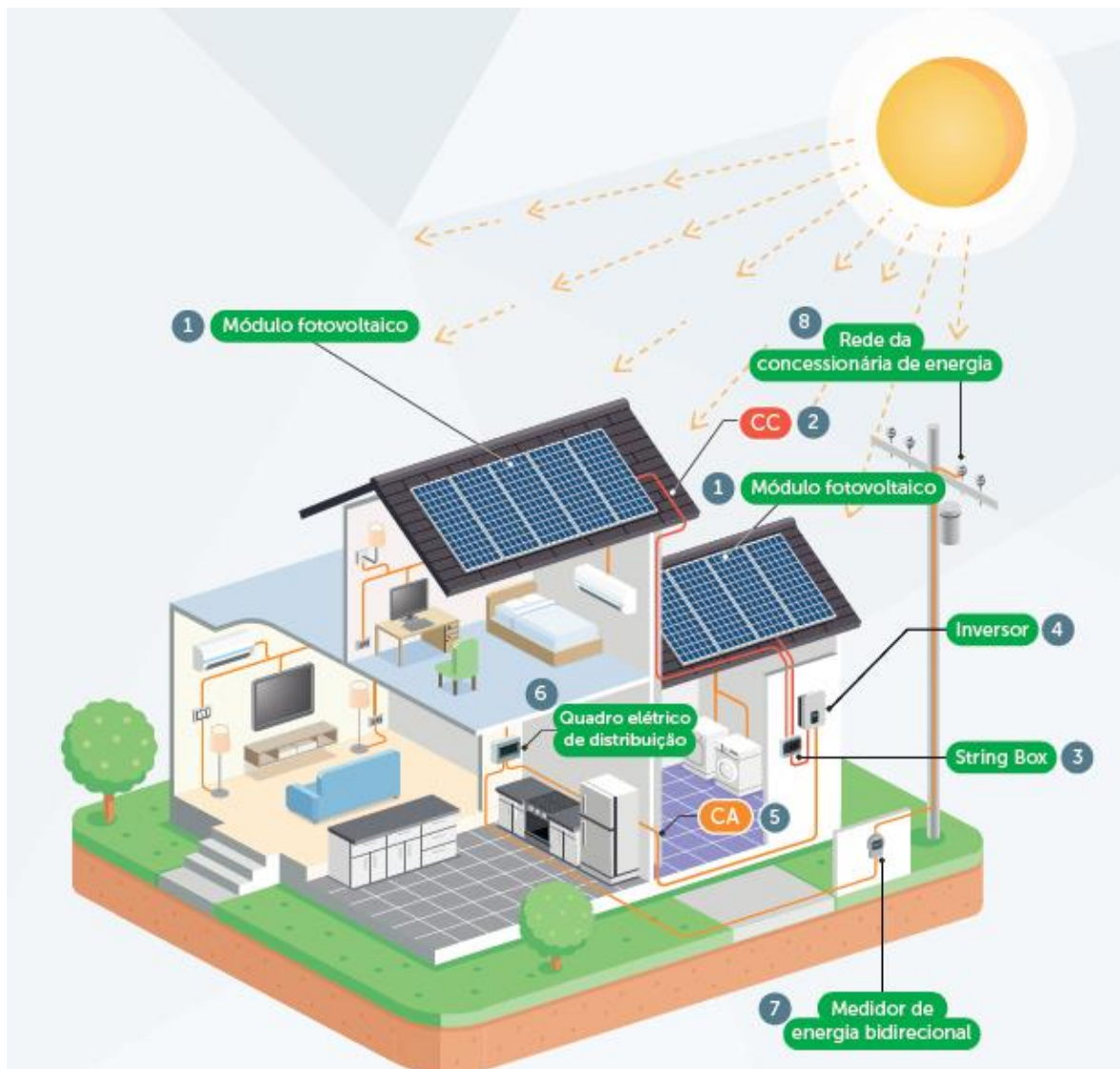
2.4 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Esses sistemas podem ser do tipo ON GRID, ou seja, sistemas conectados à rede elétrica ou OFF GRID, trabalhando de forma autônoma.

2.4.1 Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica

Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica, também conhecidos por sistemas ON GRID, conforme ilustrado na Figura 12, trabalham em paralelo com a rede elétrica oferecendo uma fonte de energia complementar à energia da concessionária ao qual o usuário está conectado. Normalmente, nesse tipo de aplicação, não são utilizados sistemas de armazenamento de energia, uma vez que todo o excedente de energia produzida pelo sistema é injetado na rede elétrica, (CAMARGO, 2017).

Figura 12 - Representação de um sistema ON GRID



Fonte: Intelbras, 2019

Esse sistema é configurado de forma que o inversor seja instalado entre o módulo fotovoltaico e o ponto de fornecimento de energia da concessionária. Os módulos fotovoltaicos fornecem energia em corrente contínua, a qual é convertida em energia alternada pelo inversor para que possa ser injetada na rede da concessionária de energia, (SOLAR, s.n).

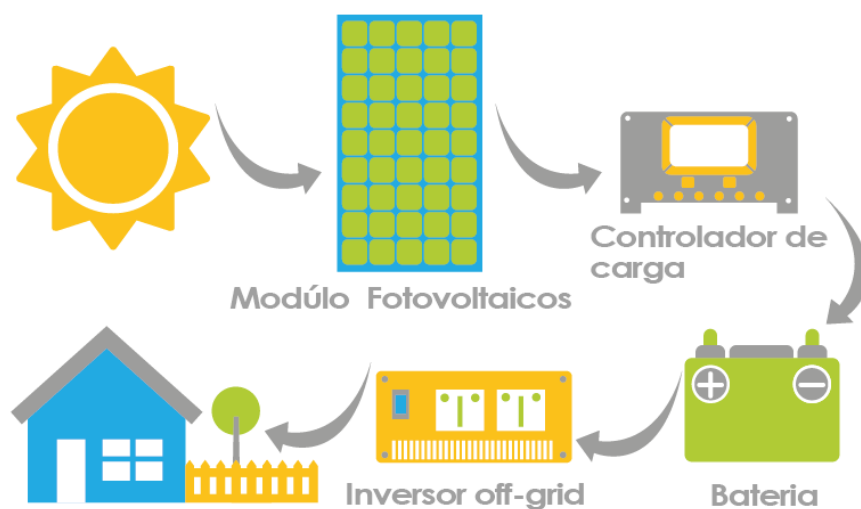
O sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica deve ser sincronizado com a energia elétrica da concessionária, pois, em caso de falta da energia da distribuidora, o sistema fotovoltaico é desligado automaticamente por questões de segurança, (SOLAR, s.n).

2.4.2 Sistemas fotovoltaicos desconectados da rede elétrica

Esse tipo de sistema também é conhecido por OFF GRID ou autônomo, ou seja, a energia é gerada e consumida no mesmo local e não interage com a rede de energia da concessionária. Um sistema autônomo é capaz de gerar eletricidade somente nas horas de sol, todavia é necessário a utilização de um banco de baterias para armazenamento de energia para que se tenha disponibilidade nos períodos sem sol (noites), chuvosos ou nublados. Esse banco de baterias é dimensionado de acordo com a autonomia que o sistema deve ter, (MOHANTY et al., 2015).

A Figura 13 ilustra esse tipo de sistema.

Figura 13 - Representação de um sistema OFF GRID



Fonte: Solar, 2019

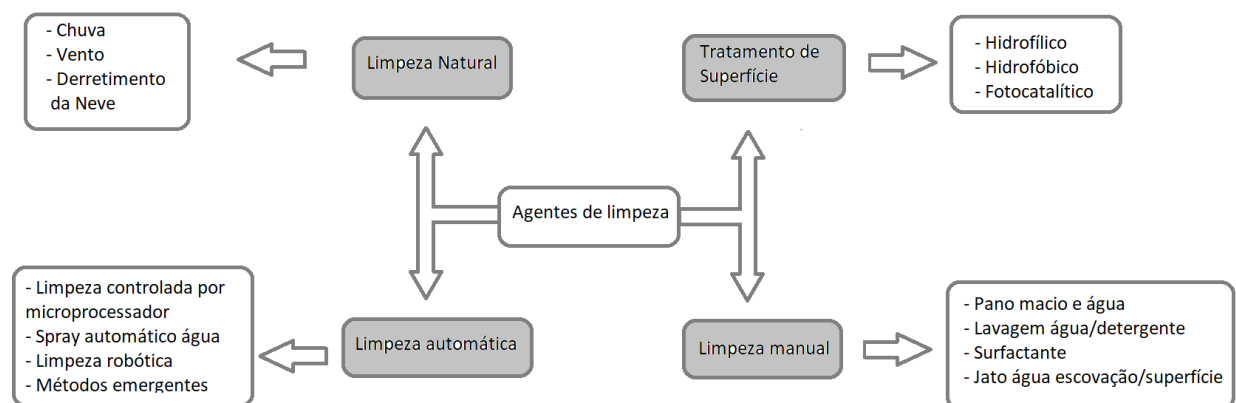
Esse tipo de sistema geralmente é utilizado em locais remotos, pois na maioria das vezes é o modo mais econômico e viável de se obter energia nesses lugares. Por exemplo, podem ser utilizados para bombeamento de água, iluminação e estações replicadoras de sinal (SOLAR, 2019).

2.5 EFEITO DA SUJEIRA SOBRE O PAINEL FOTOVOLTAICO

O efeito de sujeira, também conhecido do inglês como “*Soiling*”, refere-se às partículas de contaminação sob superfícies ópticas, sendo que estas causam um impacto significativo de deterioração do rendimento energético devido às perdas por absorção e dispersão da luz incidente (SAYYAH et al., 2014).

Embora os estudos relacionados a melhora do desempenho fotovoltaico tenham avançado ao longo dos anos, a interferência de fatores ambientais e naturais, tais como: poeira, maresia, excrementos de pássaros, neve, etc., resultam na ineficiência do desempenho dos sistemas fotovoltaicos. Desta forma, para garantir a eficiência ideal e rendimento energético máximo, é necessário manter o sistema limpo (MAGHAMI et al., 2016). A Figura 14 mostra algumas das técnicas de limpeza utilizadas.

Figura 14 - Agentes de Limpeza de Painéis Fotovoltaicos



Fonte: Adaptado de Sayyah et al. (2014, p. 4).

Segundo Sayyah et al. (2016), a deposição de poeira nas superfícies do painel solar depende de dois fatores principais: localização da instalação e condições ambientais locais, ou seja, clima. Além da sujeira, há outros fatores que influenciam na perda de rendimento do sistema fotovoltaico, como a temperatura, principalmente nas células mono e policristalinas de silício, velocidade do vento, corrosão e limitação dos dispositivos de conversão de energia.

Outro fator importante que tem grande influência sobre a deposição de poeira sobre os painéis fotovoltaicos está diretamente relacionado ao seu ângulo de inclinação. Desta forma, se o painel estiver a uma inclinação de 0° , a quantidade de depósitos sobre o painel será de grande intensidade, enquanto, que se ele estivesse a 90° , a quantidade seria muito menor devido à autolimpeza das chuvas e também em virtude da ação da gravidade (SAYYAH et al., 2014).

Ainda de acordo com Ruther (2004, p. 30):

Vários parâmetros podem afetar o rendimento do conjunto de módulos solares fotovoltaicos, também denominado gerador fotovoltaico. O principal deles é o parâmetro radiação solar, que depende fundamentalmente da localização geográfica da instalação, bem como de sua inclinação e orientação. A temperatura dos painéis, o sombreamento parcial, as resistências dos condutores e o estado de limpeza dos painéis também influenciam a performance do sistema gerador fotovoltaico.

De um modo geral, segundo Maghami et al. (2016), os métodos de limpeza da superfície fotovoltaica não têm estado no centro das atenções entre os pesquisadores. Essa falta de atenção pode derivar da ideia de que a quantidade de chuva na região é suficiente para limpar a superfície de um painel fotovoltaico.

2.6 LIMPEZA DOS PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

Fatores como a localização da planta instalada influenciam diretamente no plano de manutenção preventiva do sistema fotovoltaico. Deve-se levar em consideração se há tráfego intenso de veículos, podendo ocasionar o acúmulo de poeira sobre os painéis, bem como árvores propiciando áreas de sombra, concentração de folhas e dejetos de pássaros. Além disso, o ângulo de inclinação do painel influencia na sua autolimpeza realizada em função da água da chuva. Sendo assim, para regiões próximas ao equador, com latitudes variando entre -10° e $+10^\circ$, aconselha-se uma inclinação mínima de 10° (PINHO; GALDINO, 2014).

Segundo Messenger e Ventre (2005, p. 162), caso a célula fotovoltaica seja instalada em um local empoeirado, deve-se levar em consideração uma perda de 20% sobre a potência total gerada. Nesses casos é necessário realizar a limpeza mensal do sistema, entretanto é necessário tomar cuidado para não danificar a superfície do painel. Recomenda-se a utilização de água e um pano macio. Além disso, sugere-se efetuar a limpeza no início da manhã ou final da tarde, pois nesses horários o painel está frio e a produção de energia não é relevante (PINHO; GALDINO, 2014).

2.6.1 Limpeza Natural

O processo de limpeza natural do sistema fotovoltaico é dependente de uma série de fatores tais como latitude, ângulo de inclinação dos painéis, localização, condições climáticas da região, entre outros. Segundo Ferretti (2018), locais com precipitação ao longo do ano e ângulos de inclinação superiores a 12° garantem uma boa limpeza das superfícies do módulo fotovoltaico. Para Sayyah (2014), a precipitação é considerada a mais eficiente agente de limpeza para remover partículas contaminantes das superfícies fotovoltaicas, fazendo assim, a restauração do desempenho dos módulos.

Também é viável que a matriz de painéis fotovoltaicos possa ser movimentada para a posição vertical para remoção da poeira no período da manhã, noite ou em dias chuvosos (HE; ZHOU; LI, 2011). De acordo com Ferretti (2018), em regiões áridas (sem precipitação), a utilização de sistemas fotovoltaicos com rastreamento solar, permite a redução da sujeira durante tempestades de areia e à noite, colocando os módulos em seu ângulo máximo de inclinação, a fim de minimizar o acúmulo de poeira. Em qualquer caso, o ângulo variável de inclinação dos painéis aumenta a limpeza natural devido às forças gravitacionais.

Em regiões com algum nível de umidade ou salinidade no ar, o orvalho pode levar a uma cimentação da areia ou poeira na superfície do painel (FERRETTI, 2018). Após um período de tempo de exposição, esses pontos empoeirados se acumulam como resíduos, formando camadas de poeira fortemente aderentes, sendo necessária a lavagem manual com uso de detergente para remoção da sujeira (BETHEA et al., 1981).

Assim como a chuva, o vento também influencia no desempenho dos painéis fotovoltaicos. O vento é responsável por transportar as partículas de poeira pelo ar, ocasionando no acúmulo dessas partículas sobre o painel. No entanto, o vento também pode reduzir a sujeira dos painéis removendo partículas maiores de poeira (GAIO; APOLINÁRIO, 2017).

2.6.2 Limpeza Manual

Para limpar a superfície do painel fotovoltaico são utilizadas escovas com cerdas especiais projetadas para evitar arranhões. Algumas escovas também são conectadas diretamente a uma fonte de água permitindo, assim, a limpeza e lavagem simultaneamente (MAGHAMI et al., 2016). De acordo com Mohamed e Hasan (2012), a prática mais comum utilizada para limpeza dos painéis fotovoltaicos em pequena escala é a utilização da água da

torneira, sendo esta muitas vezes misturada com detergente e seguida da limpeza com um pano macio.

2.6.3 Tratamento de superfície

Esse método consiste em modificar a superfície de cobertura transparente dos painéis fotovoltaicos reduzindo a aderência de partículas de poeira e tornando a limpeza com água mais eficiente (SAYYAH *et al.*, 2014).

Segundo Ferreira (2013), revestir o painel solar com uma camada hidrofóbica, permite que este se mantenha consideravelmente mais limpa, aumentando desta forma a durabilidade da célula, assim como o seu rendimento em termos energéticos.

2.6.4 Limpeza Automatizada

O processo de limpeza automatizado tem por objetivo utilizar dispositivos mecânicos controlados por um computador como forma de automatizar o processo de limpeza, a fim de minimizar o uso de água, reduzir gastos com mão de obra e manter a eficiência do módulo fotovoltaico a um nível aceitável (SAYYAH *et al.*, 2014).

De acordo com Ferretti (2018), a maioria dos dispositivos automatizados (Figura 15), possuem um sistema de detecção de erros e leva em consideração as condições climáticas antes de operar. Todos os mecanismos totalmente automatizados operam com uma bateria integrada, embora alguns dispositivos possam ser adicionalmente carregados por seus próprios módulos fotovoltaicos.

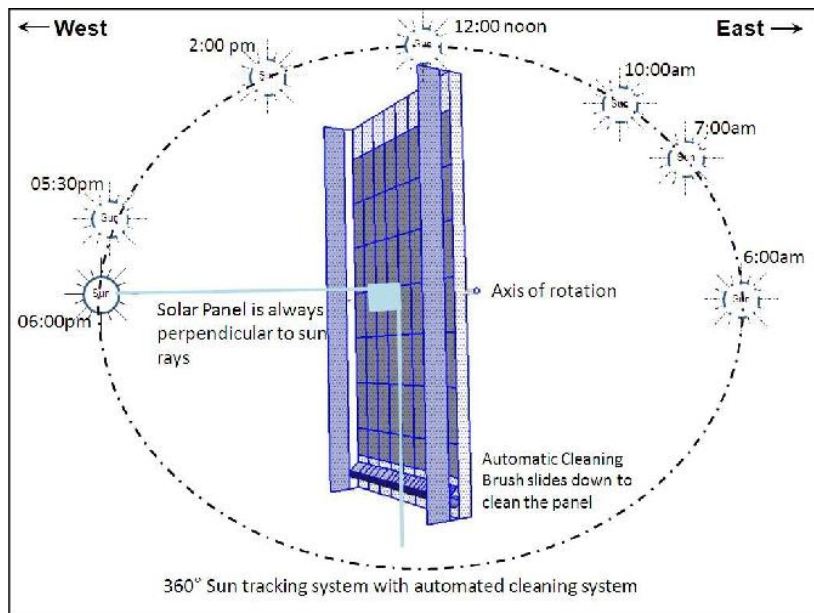
Figura 15 - Sistema automatizado para limpeza



Fonte: Ferretti (2018, p. 5)

Tejwani e Solanki (2010), realizaram um estudo no qual foi desenvolvido um equipamento capaz de realizar a limpeza do painel fotovoltaico de forma automática. Tratava-se de um sistema de rastreamento de ângulo azimutal, onde este completava uma rotação de 360° em 24 h usando passos de 15° e mantendo seu ângulo normal à radiação solar durante o dia, conforme apresentado na Figura 16.

Figura 16 - Sistema de rastreamento de ângulo azimutal



Fonte: Tejwani e Solanki (2010, p. 2)

Dessa forma, a superfície do módulo fotovoltaico ficava perpendicular ao solo duas vezes por dia. Nesses momentos, uma escova montada em uma haste deslizante limpava o sistema. A eficácia da solução foi mensurada através da comparação de produção diária de energia entre um módulo de rastreamento com equipamento de limpeza, um módulo de rastreamento sem o sistema de limpeza e um módulo fixo. O módulo com o sistema de limpeza apresentou um aumento de 15% de produção energia em comparação com o módulo sem o sistema de limpeza e de 30% em relação ao módulo estacionário.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia utilizada para avaliação da proposta fundamenta-se na comparação entre dois sistemas fotovoltaicos submetidos a mesma condição de funcionamento, no entanto, um sistema possui um dispositivo para limpeza automática acoplado a ele e o outro não. Essa comparação tem por objetivo demonstrar que o sistema que possui limpeza automática é viável, embora apresente uma maior complexidade de instalação.

Sendo assim, nesse capítulo serão detalhadas todas as etapas envolvidas na construção do protótipo, além de apresentar as dificuldades encontradas e a solução adotada para contornar os problemas enfrentados durante o desenvolvimento da solução proposta.

3.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE LIMPEZA AUTOMÁTICA

3.1.1 Características dos painéis fotovoltaicos utilizados

Foi utilizado um módulo fotovoltaico de silício policristalino, modelo EMS 30P, o qual, foi cedido pela empresa Intelbras para validação e avaliação da solução proposta.

A Tabela 1 apresenta as características elétricas e mecânicas dos painéis utilizados:

Tabela 1 - Especificação do módulo fotovoltaico

Potência Máxima (Pmax)	30 W
Tolerância de potência	$\pm 5\%$
Tensão de circuito aberto (Voc)	21,6 V
Corrente de curto circuito (Isc)	2,03 A
Tensão máxima de operação (Vmpp)	17,6 V
Corrente máxima de operação (Impp)	1,7 A
Máximo fusível em série	3 A
Tensão máxima do sistema	600 Vcc
Temperatura nominal de operação da célula (NOCT)	$45 \pm 3^{\circ}\text{C}$
Peso do módulo	2,5 Kg
Dimensões do módulo	338 x 664 x 18 mm
STC:1000 W/m ² ; AM 1,5; 25 °C	

Inicialmente pretendia-se utilizar um módulo fotovoltaico com dimensões reduzidas, no entanto, optou-se por escolher esse modelo da Intelbras por se tratar de um item que será comercializado.

O módulo foi disposto sobre um suporte mecânico construído em madeira, com inclinação fixa de 27°.

Para avaliação da geração de energia não foram utilizados sistemas de acumulação (baterias), em virtude de não haver essa necessidade. Sendo assim, como o objetivo principal foi a comparação na geração de energia, foram utilizadas cargas resistivas com valor fixo conectadas na saída do módulo fotovoltaico.

3.1.2 Descrição do sistema de movimentação

Para ser viável à proposta do tema de pesquisa, foi necessário criar um sistema de movimentação, o qual consiste em dois trilhos de alumínio instalados nas duas laterais do painel, fixados em duas madeiras com comprimento de 850 mm e com altura de 53mm. Foram utilizadas essas dimensões, pois a escova precisa avançar o comprimento do painel para garantir sua completa limpeza. Em relação à altura, utilizou-se a dimensão de 53 mm para garantir uma distância razoável entre os rolamentos para facilitar a movimentação.

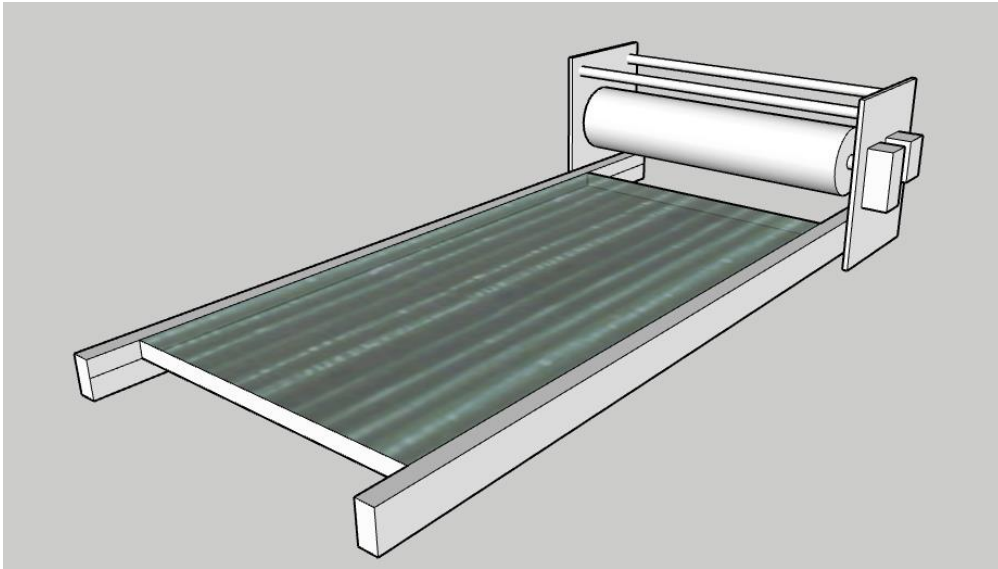
Sobre os trilhos foi utilizada uma correia de borracha em que quatro rolamentos, dois na parte superior e dois na parte inferior, deslizam com o auxílio de um motor de passo. Há quatro esticadores no sistema para deixar a correia tensionada para que o movimento seja viável. Entre os mecanismos de movimentação de cada lateral existem duas barras roscadas para fazer com que o sistema se movimente de forma simultânea, evitando esforços que possam acarretar em quebras do mecanismo.

Para fazer a parte da limpeza do painel, foram utilizadas cerdas macias para evitar que o painel fosse danificado durante a limpeza. As cerdas foram distribuídas ao longo de um cilindro para assegurar a completa limpeza. O movimento do painel através dos trilhos é limitado por duas caves fim de curso.

Por fim, foi montada uma estrutura mecânica para dar o ângulo necessário para obter a melhor irradiação solar. De acordo com Villalva e Gazoli (2013), para a região de Florianópolis o ângulo dever ser de 27°.

Na Figura 17 é possível ver os principais componentes descritos acima.

Figura 17- Ilustração do sistema de limpeza fotovoltaico automático



Fonte: Elaboração dos autores, 2019

Figura 18 - Dispositivo para limpeza de painel fotovoltaico automático



Fonte: Elaboração dos autores, 2019

3.1.3 Descrição do Hardware

3.1.3.1 Controlador do sistema

O protótipo desenvolvido realiza um conjunto de operações, que entre as quais, engloba a coleta de dados obtida através de sensores, além do envio de comandos para controle

do dispositivo mecânico. Todo o gerenciamento dessas atividades é realizado através de um sistema microcontrolado. Sendo assim, para esta aplicação foi escolhido o *kit* Arduino UNO (Figura 19), por ser uma ferramenta de fácil utilização para prototipagens rápidas, além de apresentar todos os recursos necessários para implementação do projeto.

Figura 19 - Arduino UNO



Fonte: Arduino, 2019

O Arduino UNO é uma placa microcontrolada baseada no ATmega 328P, a qual possui 14 pinos de entrada/saída digitais (sendo que 6 deles podem ser utilizados como saída PWM), 6 entradas analógicas, um cristal de 16 Mhz, conexão USB e botão de reset. A placa possui conector para alimentação 12V, além disso pode ser alimentada através da própria entradas USB, as quais também são utilizadas para transferência de dados com o microcontrolador.

Quanto à aquisição dos dados realizada pelo microcontrolador, esta é realizada através de sensores de corrente e tensão. Também está sendo utilizado um relógio de tempo real afim de apontar a data e hora no momento do registro dos dados. Todos os dados de corrente, tensão, data e hora são registrados em cartão de memória micro SD para leitura posteriormente em um computador.

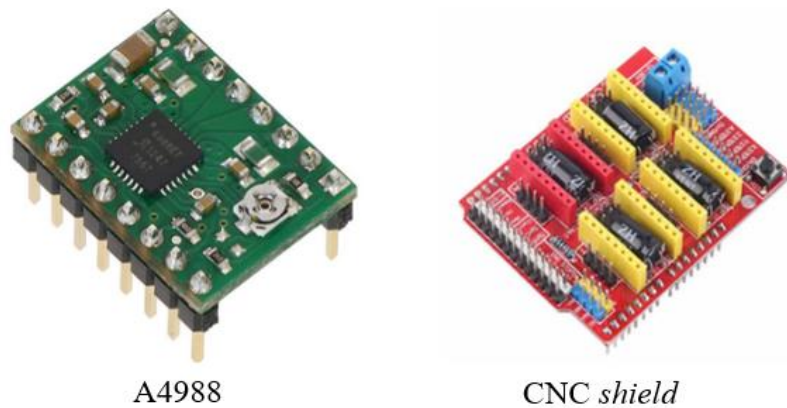
3.1.3.2 Descrição dos motores

Frente à necessidade de movimentação do sistema de limpeza sobre o módulo fotovoltaico, fez-se necessário a escolha de um par de motores para movimentação do mecanismo que se desloca sobre o trilho lateral do painel e um terceiro motor para realizar o movimento de rotação do rolo de limpeza. Optou-se então por utilizar um motor DC 12V com velocidade de 210 RPM para acionamento do rolo de limpeza e um par de motores de passo bipolar modelo NEMA 17 para movimentação da estrutura móvel que corre sobre o trilho, uma vez, que havia a necessidade de alto torque para realização dessa tarefa. Inicialmente tentou-se utilizar apenas um motor DC para realizar o movimento da estrutura móvel, contudo não foi possível pois o torque não era suficiente. Além disso, como o motor estava posicionado em apenas uma lateral, acabava sendo gerado um momento fletor impedindo a movimentação do mecanismo. Em virtude desse problema, foram utilizados dois motores de passo, conforme já mencionado.

Os motores de passo exigem um controle mais complexo, sendo necessário o envio de uma sequência pré-definida de pulsos para realização correta dos passos e do sentido de rotação. Assim sendo, optou-se por utilizar uma placa de controle que utiliza o *driver* A4988. Esse *driver* conta com alguns bons recursos, tais como: limitação de corrente, proteção contra sobrecorrente e sobretemperatura, cinco opções de resolução de passos, suporta até 2 amperes por bobina, etc. Outra característica muito importante desse *driver* está relacionada ao controle dos motores, pois é necessário apenas enviar um sinal de nível lógico alto ou baixo para estabelecer a direção e um sinal pulsado para controlar a velocidade.

Também foi utilizada a placa CNC *shield* para fazer a interface entre o microcontrolador e o *driver* A4988. O conjunto utilizado para controle dos motores de passo pode ser observado na Figura 20.

Figura 20 – Drive do motor de passo



A4988

CNC shield

Fonte: <https://www.filipeflop.com/produto/cnc-shield-v3-para-arduino-impressora-3d/>

Quanto ao motor DC 12V utilizado para acionamento do rolo de limpeza, este é controlado através de uma ponte H L298N. Dessa forma o sentido de rotação do motor pode ser alterado melhorando a eficiência da limpeza, uma vez que gira em um sentido quando está subindo e em outro quando estiver descendo.

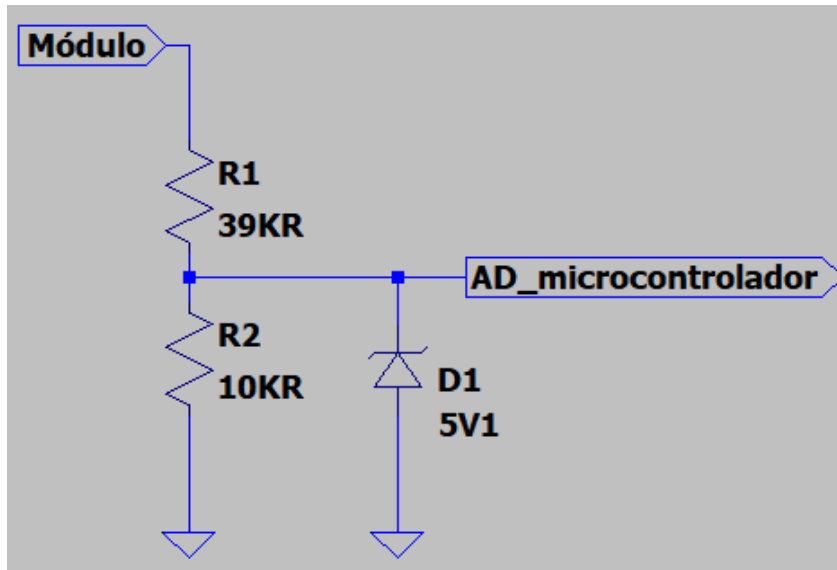
3.1.3.3 Descrição dos sensores utilizados

3.1.3.3.1 Medida da tensão elétrica

A medida de tensão elétrica foi realizada através de um divisor resistivo conforme mostrado na Figura 21.

Este divisor será conectado de maneira direta nos terminais do módulo fotovoltaico e a tensão será amostrada a cada 1 minuto. A amostragem será realizada através da porta AD (analógico/digital) do microcontrolador e a calibração do sensor de tensão será realizada através do firmware. O diodo zener foi utilizado como forma de proteção da porta de entrada do microcontrolador, caso a tensão ultrapasse o limite de 5V.

Figura 21 - Sensor de tensão

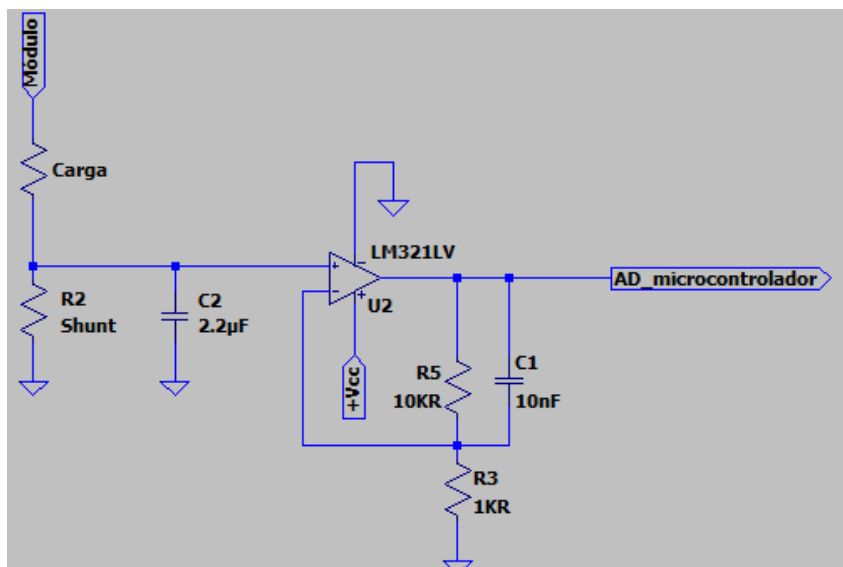


Fonte: Elaboração dos autores, 2019

3.1.3.3.2 Medida da corrente

Primeiramente pensou-se em fazer a medida da corrente elétrica provida pelo módulo fotovoltaico de maneira indireta, por meio da amostragem de tensão sobre um resistor *shunt* conectado em série com a carga utilizada, conforme Figura 22. Entretanto, não houve necessidade da sua utilização, já que a carga era conhecida, bem como a tensão. Sendo assim, a corrente foi obtida através da relação $I=V/R$.

Figura 22 - Sensor de corrente



Fonte: Elaboração dos autores, 2019

3.1.3.3 Chave fim de curso

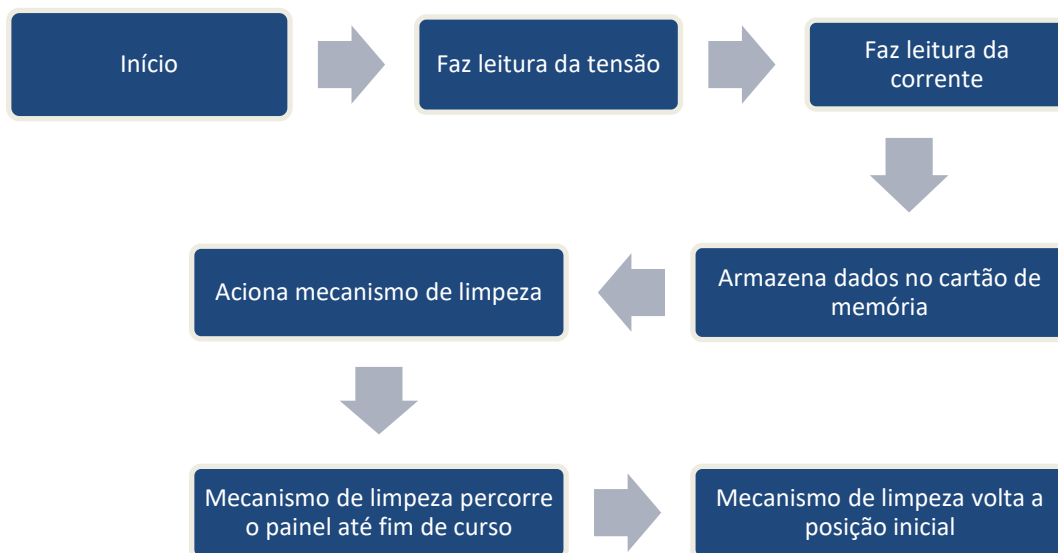
As chaves fim de curso foram utilizadas para delimitar o ponto de parada dos motores que movimentam o mecanismo de limpeza do módulo fotovoltaico. As duas chaves fim de curso utilizadas estão conectadas nas entradas digitais do microcontrolador, sendo que essas entradas estão configuradas como *pullup*.

3.1.4 Descrição de Software

O software é um conjunto de instruções, dados ou programas usados para executar tarefas singulares. O responsável por interpretar essas informações é o processador utilizado no circuito. No caso em questão, o Arduino interpreta e executa as operações programadas.

Conforme ilustrado na Figura 23, o software terá uma rotina diária de realizar um ciclo de limpeza, que constitui em descer e subir uma vez o painel fotovoltaico.

Figura 23 - Fluxograma do software



Fonte: Elaboração dos autores, 2019

3.2 RESULTADOS

Para verificar a eficiência do projeto, foi utilizado o painel fotovoltaico EMS 30P já descrito anteriormente. Devido ao tempo de resolução dos problemas enfrentados para a confecção do protótipo e as condições climáticas desfavoráveis para fazer a aquisição de dados em uma janela de tempo maior, onde a poeira seria proveniente do próprio ambiente, optou-se em utilizar talco como sendo o agente causador da poeira em um intervalo de tempo de uma hora. Para isso, também foi necessário fazer alguns ajustes no Software, já que a ideia original consiste em o dispositivo realizar uma limpeza completa (subida e descida) diariamente.

Durante o intervalo foram feitas medições para observar o comportamento do painel em diferentes condições. Inicialmente ele foi colocado em uma condição favorável para o processo de obtenção de energia, onde o painel não tinha poeira e não possuía áreas de sombras, conforme mostrado na Figura 24.

Figura 24 - Painel solar em condições ideais



Fonte: Elaboração dos autores, 2019

Após vinte minutos em uma condição favorável, o talco foi adicionado em ambos os painéis com o intuito de simular a poeira acumulada ao longo de um determinado período. A quantidade de talco utilizada foi a necessária para fazer com que os itens tivessem uma perda significativa com o intuito de verificar se o dispositivo implementado e alvo do estudo seria capaz de trazer um resultado satisfatório quando fosse demandado. Na Figura 25 é possível verificar o módulo coberto de talco. Quando isso foi feito, a eficiência reduziu em aproximadamente 62%. As medições nessas condições duraram vinte e seis minutos. Após esse intervalo, o mecanismo foi acionado e observou-se que, frente às medições de quando o painel estava empoeirado, houve uma melhora em torno de 95%. Logo, o sistema mostrou-se eficiente quando utilizado.

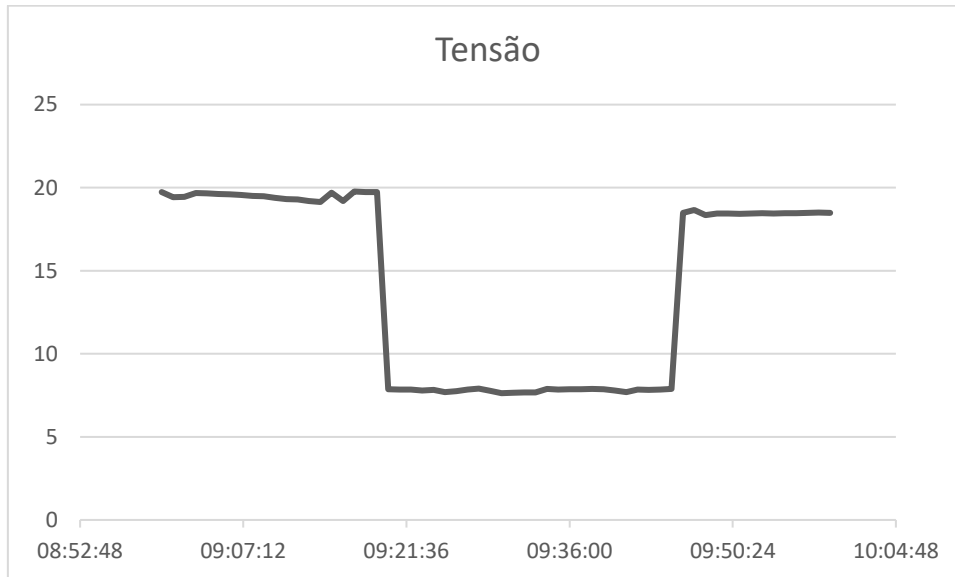
Figura 25 - Painel com sujeira depositada



Fonte: Elaboração dos autores, 2019

O Gráfico 9 mostra as medições feitas ao longo do tempo e as suas respectivas variações.

Gráfico 9 - Dados coletados



Fonte: Elaboração dos autores, 2019

4 CONCLUSÃO

As fontes de energia renováveis já são uma realidade. Países estão preocupados com os efeitos causados em detrimento da obtenção de energia através do uso de combustíveis fósseis, que agredem o meio ambiente, devido à liberação de gases do efeito estufa, tais como: metano e dióxido de carbono. Tendo isso em vista, a geração de energia fotovoltaica é vista como uma fonte limpa, sustentável, de fácil instalação e que se baseia em uma fonte renovável de energia amplamente disponível, o sol.

Com o desenvolvimento do presente trabalho, pode-se compreender a evolução da energia solar fotovoltaica, as características que influenciam na sua captação e os principais elementos que compõe um sistema fotovoltaico. Também foi descrito de forma objetiva os tipos de sistema que utilizam a energia fotovoltaica, que são: os sistemas ON GRID e OFF GRID.

Além disso, o estudo possibilitou a implementação de um dispositivo capaz de auxiliar na limpeza automática das placas fotovoltaicas com o objetivo de manter sua eficiência energética. Como pode ser observado, o mecanismo obteve uma eficiência de aproximadamente 95% quando comparado às medições de quando o painel estava coberto de impurezas. Portanto conclui-se que, o resultado obtido foi satisfatório.

4.1 IMPLEMENTAÇÕES FUTURAS

Com as delimitações auto impostas pelo contexto proposto, houve a abertura de diferentes campos de investigação que possam ser desenvolvidos em trabalhos futuros, como o acionamento do dispositivo. Da forma que o projeto foi estruturado, o mecanismo realiza a limpeza diariamente, sem verificar se houve uma queda na tensão do painel. Para melhorar esse aspecto, é necessário fazer um sistema em malha fechada. Para isso, é possível utilizar um sensor de luminosidade como referência. Quando o nível desse sinal cair a um determinado percentual, indica que o painel está começando a ficar sujo e precisa ser limpo. Ademais, a abrangência do tipo de sujeira que é possível efetuar a limpeza é outro ponto que pode ser melhorado. Se a escova for mais densa e/ou for adicionado um novo item que possa fazer coleta da chuva e posteriormente utilizar na própria limpeza, a eficiência será aumentada.

REFERÊNCIAS

ABRAHAM LOUW (Germany). Frankfurt School Unep (Org.). **Global Trends in Renewable Energy Investment 2018**. Frankfurt: Un Environment's Economy Division, 2018. 86 p. Disponível em: http://www.iberglobal.com/files/2018/renewable_trends.pdf. Acesso em: 22 set. 2018.

AGHAMI, Mohammad Reza *et al.* Power loss due to soiling on solar panel: Areview. **Elsevier: Renewable and Sustainable Energy Reviews**. Malaysia, p. 1-10. 30 jan. 2016. Disponível em: www.elsevier.com/locate/rser. Acesso em: 11 nov. 2018.

ALTOGAGREEN. **Dimensionar um Power Bank**. Disponível em: <http://www.altogagreen.com/sf/if/pt/powerbank/power2.htm>. Acesso em: 24 de março 2019.

ANEEL. **Geração Distribuída**. Disponível em: http://www2.aneel.gov.br/scg/gd/GD_Fonte.asp. Acesso em: 27 abr. 2017.

ARDUINO (Org.). **What is Arduino?** 2019. Disponível em: <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>. Acesso em: 07 abr. 2019.

BETHEA, R.M., BARRIGER, M.T., WILLIAMS, P.F., CHIN, S., 1981. **Environmental effects on solar concentrator mirrors**. *Solar Energy* 27 (6), 497–511.

BRITO, Miguel Centeno. **Meio Século de História Fotovoltaica**. 2006. Disponível em: <http://solar.fc.ul.pt/gazeta2006.pdf>. Acesso em: 22 set. 2018.

CAMARGO, Lucas Tamanini. **Projeto de Sistemas Fotovoltaicos conectados à Rede Elétrica**: Projeto de Sistemas Fotovoltaicos conectados à Rede Elétrica. 2017. 103 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2017.

CRESESB. **Tutorial de Energia Solar Fotovoltaica**. 2008. Disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&catid=4. Acesso em: 3 nov. 2018.

EPE. **Matriz Energética e Elétrica**. 2016. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em: 9 set. 2018.

FERRETTI, Nicoletta. **PV Module Cleaning**. [2018]. PI Photovoltaic-Institute Berlin AG. Disponível em: <https://www.pi-berlin.com>. Acesso em: 15 nov. 2018.

FERREIRA, Lúcia Marisa Vieira. **Revestimentos Hidrofóbicos**. 2013. 77 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Materiais, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2013.

FLOP, Filipe. **Shield CNC**. Disponível em: <https://www.filipeflop.com/produto/cnc-shield-v3-para-arduino-impressora-3d/>. Acesso em: 10 maio 2019.

GAIO, João Nicolau; APOLINÁRIO, Kleverson Moisés. **Determinação Do Tempo Ótimo Para Limpeza De Painéis Fotovoltaicos Para Obtenção Da Melhor Produtividade - Estudo De Caso Dos SFVCR's Implantados Na UTFPR**. 2017. 85 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Acadêmico de Eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

HE, Gaofa; ZHOU, Chuande; LI, Zelun. Review of Self-Cleaning Method for Solar Cell Array. **Procedia Engineering**, [s.l.], v. 16, p.640-645, 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2011.08.1135>

INTELBRAS. **O sol com selo de qualidade**. 2019. Disponível em: www.intelbras.com.br. Acesso em: 23 abr. 2019.

MAGHAMI, Mohammad Reza et al. Power loss due to soiling on solar panel: A review. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 59, p.1307-1316, jun. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.044>.

MOHANTY, Parimita et al. PV System Design for Off-Grid Applications. **Solar Photovoltaic System Applications**, [s.l.], p.49-83, 17 set. 2015. Springer International Publishing. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-14663-8_3.

MME. **Novos empreendimentos solares devem gerar investimentos de R\$ 8 bilhões**. 2018. Disponível em: http://www.mme.gov.br/web/guest/pagina-inicial/outras-noticias/-/asset_publisher/32hLrOzMKwWb/content/novos-empreendimentos-solares-devem-gerar-investimento-de-r-8-bilhoes. Acesso em: 8 set. 2018.

PEREIRA, Enio Bueno et al. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2. ed. São José dos Campos: Inpe, 2017. 80 p.

PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Antonio. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: Cepel - Cresesb, 2014. 530 p.

PRODANOV, Cleber Cristiano; FREITAS, Ernani Cesar de. **Metodologia do trabalho científico: Métodos e Técnicas da Pesquisa e do Trabalho Acadêmico**. 2. ed. Novo Hamburgo: Feevale, 2013. 277 p.

RENTECHNO. **Global Growth of Solar Industry**. 2018. Disponível em: <https://rentechno.ua/en/blog/>. Acesso em: 3 nov. 2018.

RUTHER, Ricardo. **Edifícios Solares Fotovoltaicos: O Potencial da Geração Solar Fotovoltaica Integrada a Edificações Urbanas e Interligada à Rede Elétrica Pública no Brasil**. Florianópolis: Ufsc, 2004. 118 p.

SANTOS JÚNIOR, S. L. R. **Análise de materiais e técnicas de encapsulamento de módulos fotovoltaicos**. Porto Alegre, 2008.

SAYYAH, Arash; HORENSTEIN, Mark N.; MAZUMDER, Malay K.. Energy yield loss caused by dust deposition on photovoltaic panels. **Solar Energy**, [s.l.], v. 107, p.576-604, set. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2014.05.030>.

SOLAR, Brasil (Org.). **O que são os Sistemas Conectados à rede (On-Grid)?** 2019. Disponível em: <http://www.solarbrasil.com.br/blog-da-energia-solar/73-o-que-sao-os-sistemas-conectados-a-rede-on-grid>. Acesso em: 23 abr. 2019.

SOLAR, Fonte. **Sistema de energia solar fotovoltaico OFF-GRID**. 2019. Disponível em: <http://www.fontesolar.eng.br/solucoes/sistema-de-energia-solar-fotovoltaico-off-grid/>. Acesso em: 23 abr. 2019.

TEJWANI, Ravi; SOLANKI, Chetan S. 360° sun tracking with automated cleaning system for solar PV modules. **2010 35th Ieee Photovoltaic Specialists Conference**, [s.l.], p.1-4, jun. 2010. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/pvsc.2010.5614475>.

ZILLES, ROBERTO... [et al.] **Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica**. 1ª ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

ANEXOS

ANEXO A – CÓDIGO FONTE

```
1 //Projeto : Limpador automatizado de painel solar
2 //Autores: Bruno Rozza, Luis Fernando Segala
3
4 //*****
5 //                                BIBLIOTECAS UTILIZADAS
6 //*****
7
8 #include <DS1307.h> //Carrega a biblioteca do RTC DS1307
9 #include <SPI.h>    //biblioteca utilizada para comunicação cartão SD
10 #include <SD.h>    //biblioteca cartão SD
11
12 const int chipSelect = 4;
13
14 DS1307 rtc(A4, A5); //Modulo RTC DS1307 ligado as portas A4 e A5 do Arduino
15 File myFile;
```

```

17 //*****
18 //                                MAPEAMENTO DO HARDWARE
19 //*****
20
21 //                                -----
22 //                                |      13 |   SCK
23 //                                |IOREF 12 |   MISO
24 //                                |RESET 11 |   MOSI
25 //                                |3.3V  10 |  motorDC_B
26 //                                |5V     9 |  motorDC_A
27 //                                |GND    8 |  dir_M2
28 //                                |GND    7 |  dir_M1
29 //                                |Vin     6 |  fim_descida
30 //                                V_modulo1 |A0    5 |  fim_Subida
31 //                                |A1     4 |   CS
32 //                                I_modulo1 |A2    3 |  step_M2
33 //                                |A3     2 |  step_M1
34 //                                SDA       |A4    1 |
35 //                                SCL       |A5    0 |
36 //                                -----
37
38 #define V_modulo1  A0 //Leitura de tensão módulo 1
39 #define I_modulo1  A2 //Leitura de corrente módulo 1
40 #define dir_M1     7 //direção do motor de passo 1
41 #define dir_M2     8 //direção do motor de passo 2
42 #define step_M1    2 //velocidade do motor de passo 1
43 #define step_M2    3 //velocidade do motor de passo 2
44 #define fimSubida  5 //fim de curso superior
45 #define fimDescida 6 //fim de curso inferior
46 #define motorDC_A  9 //controle do motor DC
47 #define motorDC_B 10 //controle do motor DC

```

```

48
49 //*****
50 //                                VARIÁVEIS GLOBAIS
51 //*****
52
53 String hora,
54     horaMnt = "10:16:00"; //Define hora da limpeza diária
55
56 int tempo = 1,
57     baseTempo_lm = 0;
58
59
60 //*****
61 //                                CONFIGURAÇÕES INICIAIS
62 //*****
63
64 void setup(){
65
66 // --- DEFINIÇÕES DE ENTRADAS E SAÍDAS ---
67
68     pinMode(V_modulol, INPUT);
69     pinMode(I_modulol, INPUT);
70     pinMode(dir_M1, OUTPUT);
71     pinMode(dir_M2, OUTPUT);
72     pinMode(step_M1, OUTPUT);
73     pinMode(step_M2, OUTPUT);
74     pinMode(fimSubida, INPUT_PULLUP); //habilita pullup na entrada dos sensores de fim de curso
75     pinMode(fimDescida, INPUT_PULLUP); //habilita pullup na entrada dos sensores de fim de curso
76     pinMode(motorDC_A, OUTPUT);
77     pinMode(motorDC_B, OUTPUT);

```

```

79 // --- DEFINIÇÕES GERAIS ---
80
81   rtc.halt(false);           //Aciona o relógio
82   //rtc.setDOW(THURSDAY);     //Define o dia da semana      |
83   //rtc.setTime(22,36, 0);     //Define o horário           |-> utilizado apenas para configuração uma única vez
84   ///rtc.setDate(6, 6, 2019);  //Define o dia, mês e ano     |
85
86   //Definições do pino SQW/Out
87   rtc.setSQWRate(SQW_RATE_1);
88   rtc.enableSQW(true);
89
90   Serial.begin(9600);         //Define taxa de transmissão da serial
91
92   // --- INICIALIZA CARTÃO SD ---
93
94   Serial.print("Iniciando cartão SD...");
95
96   if (!SD.begin(chipSelect)) {
97       Serial.println("Falha na Inicialização!");
98       Serial.println("Verifique se o cartão SD está conectado");
99       while (1);
100  }
101  Serial.println("Cartão SD inicializado com sucesso.");
102
103  //-----
104
105  myFile = SD.open("dados.txt", FILE_WRITE); //abre o arquivo de dados

```

```

104
105 myFile = SD.open("dados.txt", FILE_WRITE); //abre o arquivo de dados
106
107 if(myFile){
108     myFile.println("Data      Hora      Tensão Ml      correnteMl");
109     myFile.close(); //fecha arquivo de dados
110     Serial.println("Arquivo fechado");
111 }else{
112     Serial.println("Erro ao abrir o arquivo");
113 }
114
115 Serial.println("Data      Hora      Tensão Ml      correnteMl");
116
117 //horaMnt = "22:59:00"; //Define hora da limpeza diária
118 }
119
120 //*****
121 //                                PROTÓTIPOS DE FUNÇÕES
122 //*****
123
124 void ler_tensao();
125 void controle_motorDC(boolean dir_MA, boolean dir_MB);
126 void inicia_limpeza();
127

```

```

128 //*****
129 //                                PROGRAMA PRINCIPAL
130 //*****
131
132 void loop(){
133
134     if(baseTempo_lm == 10){
135
136         baseTempo_lm = 0;
137         myFile = SD.open("dados.txt", FILE_WRITE); //abre o arquivo de dado
138         if(myFile){
139             Serial.print(rtc.getDateStr(FORMAT_SHORT));
140             myFile.print(rtc.getDateStr(FORMAT_SHORT));
141             Serial.print(" ");
142             myFile.print(" ");
143             Serial.print(rtc.getTimeStr());
144             myFile.print(rtc.getTimeStr());
145             Serial.print(" ");
146             myFile.print(" ");
147
148             ler_tensao();
149
150             myFile.close(); //fecha arquivo de dados
151         }else{
152             Serial.println("Erro ao abrir o arquivo");
153         }
154     }

```

```
155 |
156 | hora = rtc.getTimeStr();
157 | if(hora == horaMnt){
158 |     Serial.println("Limpeza Iniciada");
159 |     inicia_limpeza();
160 |     inicia_limpeza();
161 | }
162 |
163 | baseTempo_lm ++;
164 | delay(100); //100 ms
165 | }
166 |
```

```

167 //*****
168 //          FUNÇÕES DE CONTROLE DO SISTEMA
169 //*****
170
171 void ler_tensao(){
172
173     int    valorAD_Vml = 0;
174
175     float  tensaoM1 = 0,
176           correnteM1 = 0;
177
178     for(int i = 0; i < 20; i++){           //buffer tensão módulo 1
179         valorAD_Vml += analogRead(V_modulo1);
180         delay(10);                         //tempo de 10 ms entre cada medida
181     }
182
183     tensaoM1 = ((valorAD_Vml/20)*0.0239);   //Tensão módulo 1 - divisor de de tensão: 24,5 V equivale 5V na saída - 24,5/1024 = 0,0239
184     Serial.print(tensaoM1);
185     myFile.print(tensaoM1);
186     Serial.print("          ");
187     myFile.print("          ");
188
189     correnteM1 = tensaoM1/33.8;             //Corrente módulo 1
190     Serial.println(correnteM1);
191     myFile.println(correnteM1);
192
193 }
194
195 void controle_motorDC(boolean dir_MA, boolean dir_MB){ //dir_MA = 0 e dir_MB =1, sentido horário
196     digitalWrite(motorDC_A, dir_MA);           //dir_MA = 1 e dir_MB =0, sentido anti-horário
197     digitalWrite(motorDC_B, dir_MB);           //dir_MA = 0 e dir_MB =0, motor parado
198 }
199

```

```

200 void inicia_limpeza(){
201
202     while(digitalRead(fimSubida) == 1){
203         controle_motorDC(1,0);    // direção da escova
204         digitalWrite(dir_M1, 0);   // direção motor de passo
205         digitalWrite(dir_M2, 1);   // direção motor de passo
206         digitalWrite(step_M1,0);   // passo do motor
207         digitalWrite(step_M2,0);
208         delay(tempo);              // tempo = 1ms
209         digitalWrite(step_M1,1);
210         digitalWrite(step_M2,1);
211         delay(tempo);
212     }
213
214     delay(1000);
215
216     while(digitalRead(fimDescida) == 1){
217         controle_motorDC(0,1);
218         digitalWrite(dir_M1, 1);
219         digitalWrite(dir_M2, 0);
220         digitalWrite(step_M1,0);
221         digitalWrite(step_M2,0);
222         delay(tempo);
223         digitalWrite(step_M1,1);
224         digitalWrite(step_M2,1);
225         delay(tempo);
226     }
227
228     controle_motorDC(0,0);
229     delay(1000);
230 }

```