

PÂMELA CRISTINI SILVA NICOLAU

Desenvolvimento de sistema de rastreamento solar para painel fotovoltaico

PÂMELA CRISTINI SILVA NICOLAU

Desenvolvimento de sistema de rastreamento solar para painel fotovoltaico

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Elétrica.

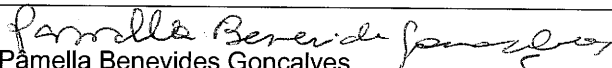
Orientador: Prof. Dr. José Feliciano Adami

Nicolau, Pâmela Cristini Silva
N639d Desenvolvimento de sistema de rastreamento solar para painel
fotovoltaico / Pâmela Cristini Silva Nicolau– Guaratinguetá, 2017.
55 f : il.
Bibliografia: f. 50-52

Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica – Universidade
Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2017.
Orientador: Prof. Dr. José Feliciano Adami

1. Energia - Fontes alternativas 2. Energia solar 3. Arduino
(Controlador programável). I. Título

CDU 620.91


Pâmella Benevides Gonçalves

Bibliotecária CRB/8: 9203

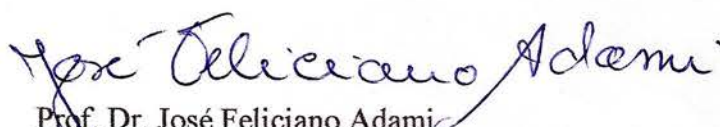
Pâmela Cristini Silva Nicolau

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"ENGENHEIRO ELETRICISTA"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Prof. Dr. Leonardo Mesquita
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. José Feliciano Adami
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. Rubens Alves Dias
UNESP-FEG


Prof. Dr. Francisco Lotufo
UNESP-FEG

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, João e Márcia, por sempre estarem presentes, me incentivando e apoiando nos estudos. Agradeço também ao meu namorado, Edson, com quem compartilhei estes anos e que esteve ao meu lado, me encorajou e ajudou em todos os momentos.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. José Feliciano Adami, por ser meu orientador não somente neste trabalho de conclusão de curso, mas também em outros projetos desde a minha admissão na Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, me auxiliando nos estudos e sempre se disponibilizando a me ajudar.

Agradeço aos amigos, Lucas, Erika, Luiza e Anderson, por terem me encorajado no desenvolvimento deste trabalho, e proporcionado bons momentos nesta trajetória.

Por fim, gostaria de agradecer também a todos os professores que me direcionaram nos estudos durante este período de aprendizado, e que se empenharam em transmitir da melhor forma seus conhecimentos.

RESUMO

Este trabalho mostra o desenvolvimento do protótipo de um sistema de rastreamento solar para painéis fotovoltaicos, utilizado a fim de aumentar a incidência solar captada por estes, e com isso permitir uma melhora na sua eficiência. Foram utilizados sensores, como o de medida da luminosidade (LDR), uma placa de Arduino Uno programada e um motor elétrico DC com seu circuito de acionamento, para movimentação da estrutura de pequeno porte construída no eixo leste-oeste. Esta estrutura comporta uma célula de um painel fotovoltaico, tendo como finalidade a realização de testes e de demonstração do funcionamento do sistema de posicionamento da mesma. Este controle de posicionamento foi desenvolvido de forma que, de posse de componentes adequados, sejam simples as adaptações necessárias para utilização da mesma lógica em estruturas maiores utilizando painéis fotovoltaicos. Buscou-se, a partir deste trabalho desenvolvido, motivar a utilização e o estudo deste tipo de sistema.

PALAVRAS-CHAVE: Energias renováveis. Energia solar. Eficiência energética. Rastreamento solar. Arduino UNO.

ABSTRACT

This work shows the development of the prototype of a solar tracking system for photovoltaic panels, used in order to increase the solar incidence received by them, and with that to allow an improvement in their efficiency. Sensors such as LDR (*Light Dependent Resistor*), an Arduino Uno board and a DC electric motor with its drive circuit were used to move the built structure on the east-west axis. This structure allows the system to move a cell of a photovoltaic panel, with the purpose of performing tests and demonstrating the operation of the photovoltaic positioning system. This positioning control was developed in such a way that, with adequate components, the necessary adaptations to use the same logic in larger structures using solar panels are simple. The aim of this work was to encourage the use and studies of this type of systems.

KEYWORDS: Renewable energy. Solar energy. Energy efficiency. Solar tracking. Arduino UNO.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Diagrama ilustrativo da diferença de energia do Sol à Terra.....	11
Figura 2 – Radiação solar chegando à Terra durante o verão no Hemisfério Sul	12
Figura 3 – Representação das estações do ano e do movimento da Terra em torno do Sol....	12
Figura 4 – Média de insolação diária no Brasil (horas).....	13
Figura 5 – Capacidade Global instalada de Sistemas Fotovoltaicos em 2016	15
Figura 6 – Estrutura da célula fotovoltaica de silício em corte	16
Figura 7 – Circuito Equivalente de uma Célula Fotovoltaica	18
Figura 8 – Curva Característica de uma Célula Fotovoltaica.....	20
Figura 9 – Evolução entre célula, módulo e painel fotovoltaico	21
Figura 10 – Efeitos causados pela temperatura e pela radiação em uma célula fotovoltaica..	22
Figura 11 – Exemplo de ligações de diodos <i>bypass</i> em uma célula ou conjunto de células ...	23
Figura 12 – Placa solar com deposição de poeira.....	24
Figura 13 – Média anual da irradiação global no território brasileiro	25
Figura 14 – Tipos de rastreadores solares	28
Figura 15 – Comparação da potência gerada por sistemas de rastreamento solar e o sistema fixo.....	28
Figura 16 – Curva Característica de um LDR	29
Figura 17 – Ponte H.....	31
Figura 18 – <i>Duty Cycle</i>	33
Figura 19 – Arduino UNO e seus conectores	34
Figura 20 – Fluxograma de funcionamento do sistema.....	36
Figura 21 – Conexões Realizadas no Arduino	38
Figura 22 – Circuito para a Leitura dos Sensores LDR e Fim de Curso	38
Figura 23 – Circuito para o Acionamento do Motor	39
Figura 24 – Materiais para construção da estrutura.....	41
Figura 25 – Estrutura Construída.....	42
Figura 26 – Fluxograma de funcionamento do sistema.....	43
Figura 27 – Componentes do Protótipo	44
Figura 28 – Estrutura Final	45
Figura 29 – Detalhes da Estrutura Final	46
Figura 30 – Detalhe do Sombreamento do Sensor LDR	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Eficiência das Células Fotovoltaicas conforme material utilizado.....	17
Tabela 2 – Potencial Fotovoltaico Residencial	26
Tabela 3 – Valores Típicos de Iluminância Conforme Fonte de Luz.....	30
Tabela 4 – Funcionamento da Ponte H.....	32

SUMÁRIO

1	OBJETIVOS	9
1.1	JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO	9
1.2	OBJETIVO	10
2	INTRODUÇÃO	11
2.1	ENERGIA SOLAR	11
2.1.1	Radiação Solar	11
2.1.2	Movimento da Terra e Estações do Ano	11
2.2	GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA VIA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	14
2.2.1	Efeito Fotovoltaico	14
2.2.2	Histórico dos Sistemas Fotovoltaicos	14
2.2.3	A Célula Fotovoltaica	15
2.2.4	Modelo Elétrico de uma Célula Fotovoltaica	18
2.2.5	Associação de Células Fotovoltaicas	21
2.2.6	Efeito da temperatura, da radiação, do sombreamento e da presença de poeira ou neve no desempenho do sistema fotovoltaico	21
2.3	CAPACIDADE E APLICAÇÕES NO BRASIL	24
2.4	RASTREAMENTO SOLAR	27
2.4.1	Tipos de rastreadores solares	27
2.5	SENSOR DE LUMINOSIDADE (LDR)	29
2.6	MOTORES DC E PONTE H	30
2.6.1	Motores DC	30
2.6.2	Ponte H	31
2.7	ARDUINO UNO	33
3	DESENVOLVIMENTO	35
3.1	MATERIAIS UTILIZADOS	35
3.2	METODOLOGIA	36
3.3	PROGRAMA E CIRCUITOS DESENVOLVIDOS	37
3.4	PROTÓTIPO	40
4	RESULTADOS	46
5	CONCLUSÃO	49
6	REFERÊNCIAS	50
	APÊNDICE A – Programa Desenvolvido	53

1. OBJETIVOS

1.1. JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO

Segundo Empresa de Pesquisa Energética - EPE (2014), o consumo total de energia elétrica no Brasil chegou a 517 TWh em 2016. Levando em consideração a análise do mercado e da conjuntura econômica e energética de 2016, espera-se para o horizonte 2017-2026, que este consumo chegue a 613 TWh em 2021 e a 744 TWh em 2026, o que representa um aumento no consumo de 3,7% ao ano. Nota-se então, através destes dados a necessidade de aumento na produção de energia elétrica em solo brasileiro nos próximos anos.

Outro ponto a ser considerado é a necessidade de se buscar alternativas renováveis na geração de energia elétrica, de modo a reduzir os impactos ambientais de fontes não renováveis. Segundo *Intergovernmental Panel on Climate Change* - IPCC (2011), até 2010, as emissões de gases do efeito-estufa aumentaram mais de 39% em relação aos índices pré-industriais, sendo que a geração de energia elétrica por meios poluentes é uma das principais fontes de emissões.

Dados do *Renewables 2017 Global Status Report* - REN21 (2017) mostram que, apenas 24,5% da energia elétrica produzida no mundo em 2016 foi proveniente de fontes renováveis, sendo que a geração de energia elétrica via sistemas fotovoltaicos representou apenas 1,6% da matriz energética mundial, mesmo essa sendo a fonte com maior potencial técnico de produção de energia, dentre as fontes de energia renováveis.

A principal forma de geração de energia elétrica utilizando a energia solar é através das chamadas Células Fotovoltaicas, dispositivos construídos a partir de materiais semicondutores que possibilitam a produção de eletricidade. Esta fonte de energia vem crescendo de forma considerável nas últimas décadas. Segundo dados do REN21 (2017), a capacidade global instalada de sistemas fotovoltaicos em 2016 chegou a 303 GW, tendo um aumento de cerca de 33% em relação a capacidade do ano anterior (228 GW), o que demonstra a tendência de investimentos em tecnologias referentes à energia solar no presente e no futuro próximo.

Um dos principais desafios dos sistemas fotovoltaicos é a obtenção de um bom rendimento na geração de energia elétrica. Pensando nisso, este trabalho apresenta o projeto de um Sistema de Rastreamento Solar para Painel Fotovoltaico. Tais sistemas são capazes de rastrear a posição do sol, ajustar o ângulo de inclinação de painéis fotovoltaicos e gerar um aumento no rendimento da geração de energia elétrica de até 40%, segundo Appleyard (2009).

Levando em consideração o aumento da demanda de energia elétrica previsto para os próximos anos e a busca por aprimoramento no rendimento de sistemas de energia solar, julgou-se como uma boa alternativa para este trabalho, o desenvolvimento de um protótipo de rastreados solar, a fim de exemplificar a simplicidade no desenvolvimento de tais sistemas e incentivar sua utilização, visando com isto incentivar também o uso de energias renováveis e reduzir impactos ambientais.

1.2. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho foi desenvolver o protótipo de um sistema de rastreamento solar que permita que painéis fotovoltaicos acompanhem um dos eixos do movimento solar, de leste a oeste. Os sistemas de eixo duplo de pequeno porte apresentam um aumento no consumo e complexidade que foram comprovados não ser compensados pela melhora na eficácia do painel (TREVELIN, 2014).

Criou-se então, um sistema de rastreamento solar de eixo simples, mas que permitisse o ajuste manual da angulação da placa com relação ao solo, de forma a aproveitar a maior quantidade de raios solares durante o decorrer do dia. Buscou-se, a partir do trabalho desenvolvido, encorajar a utilização e o estudo de sistemas capazes de:

- Aumentar a produtividade da geração de energia elétrica utilizando painéis fotovoltaicos;
- Utilizar o potencial solar para geração de energia elétrica de forma mais eficiente e rentável;
- Incentivar o uso de energias renováveis;
- Reduzir as emissões de gases do efeito estufa, através da apresentação de uma alternativa viável às fontes de energia fóssil.

2. INTRODUÇÃO

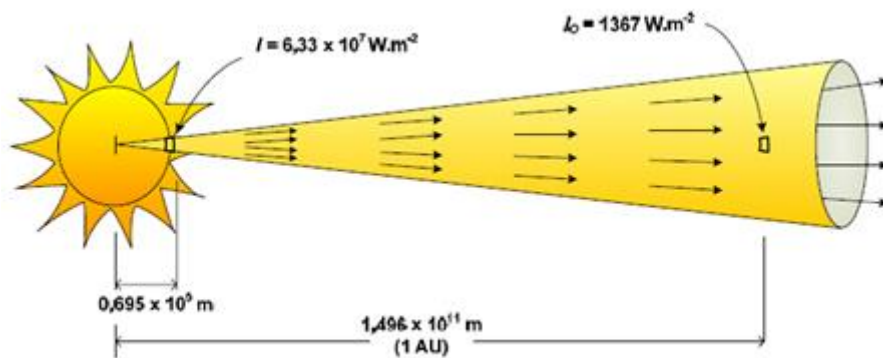
2.1. ENERGIA SOLAR

2.1.1. Radiação Solar

Segundo os estudos astronômicos, o Sol é uma estrela de brilho, grandeza e idade médios com temperatura aparente de superfície da ordem de 6000 K. A energia do Sol é liberada em forma de radiação eletromagnética da Fotosfera, uma concha externa esférica, composta de gases densos e aquecidos. A intensidade desta radiação é de aproximadamente $6,33 \cdot 10^7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ e é liberada a uma taxa relativamente constante (ALVES, 2008).

Considerando que a distância entre o Sol e a Terra é de $1,496 \cdot 10^{11} \text{ m}$ ou 1 UA (Unidade Astronômica), é possível calcular a energia radiante que chega a superfície terrestre, cuja estimativa está na ordem de $1367 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, valor chamado de Constante Solar. Esta diferença de energia é vista na Figura 1.

Figura 1 - Diagrama ilustrativo da diferença de energia do Sol à Terra.



Fonte: Adaptado de Stine e Geyer (2011).

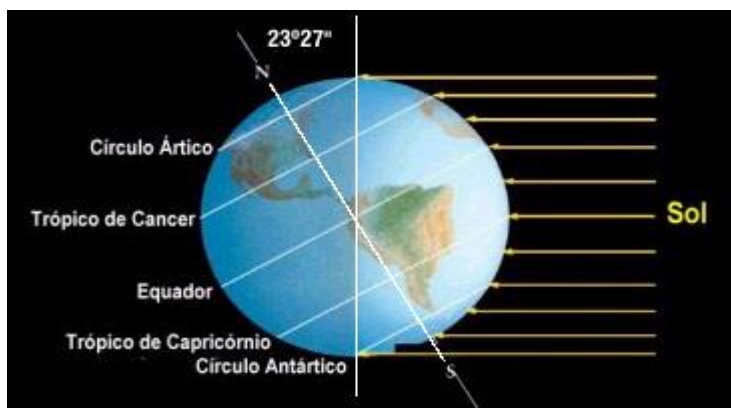
2.1.2. Movimento da Terra e Estações do Ano

A quantidade de radiação solar existente em determinado momento e local depende de diversos fatores, entre eles a latitude, a hora do dia em questão e a época do ano, além de condições atmosféricas como a nebulosidade e a umidade relativa do ar.

As diferenças entre as quantidades de radiação em diferentes épocas do ano podem ser explicadas pelos movimentos de rotação e translação. Conforme visto na Figura 2, o

movimento de rotação da Terra é realizado em torno de um eixo imaginário que possui uma inclinação de cerca de $23^{\circ}27''$.

Figura 2 - Radiação solar chegando à Terra durante o verão no Hemisfério Sul.



Fonte: Adaptado de Oliveira Filho e Saraiva (2012).

Levando em conta essa inclinação do eixo de rotação da terra e o movimento elíptico em torno do sol, chamado de translação, são definidas as estações do ano, que determinam a quantidade de radiação que determinado hemisfério terrestre receberá em cada época. A forma elíptica do movimento de translação faz com que a distância entre o Sol e a Terra varie no decorrer do ano, ficando entre a faixa de 0,8 UA e 1,2 UA, o que também influencia na radiação solar presente na superfície terrestre. A representação das estações do ano pode ser vista na Figura 3.

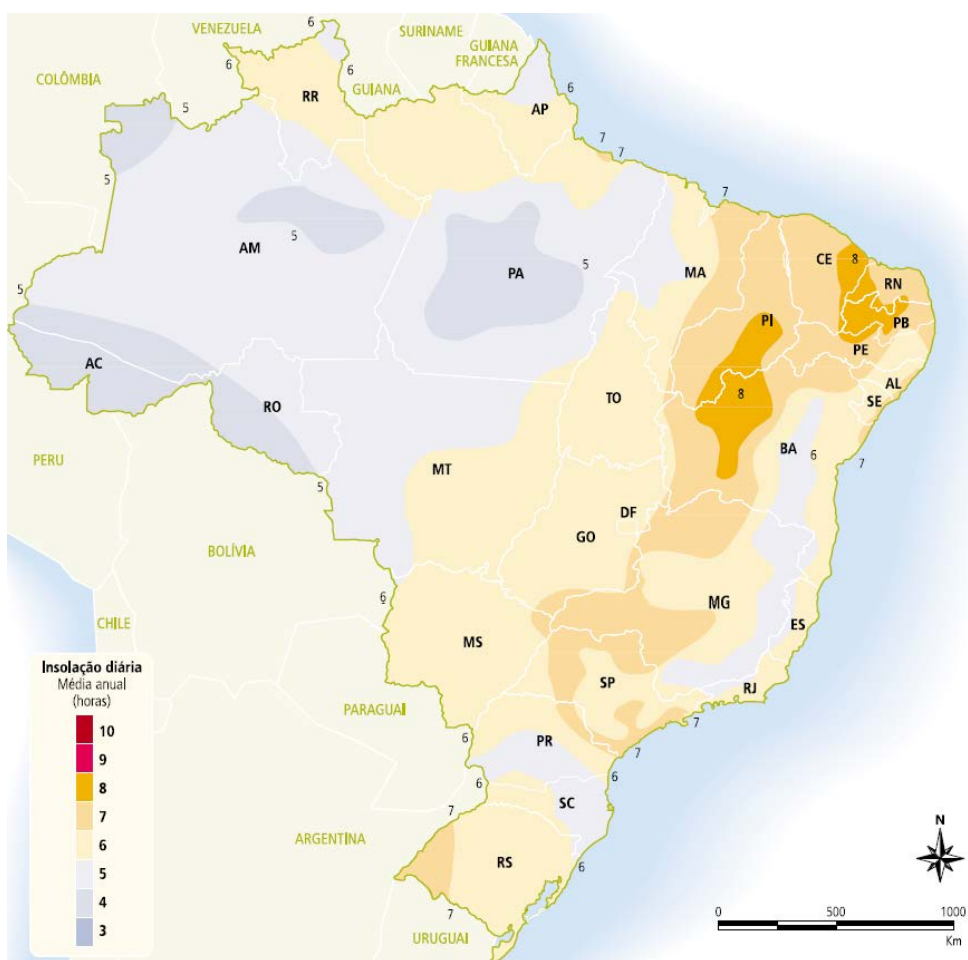
Figura 3 - Representação das estações do ano e do movimento da Terra em torno do Sol.



Fonte: Adaptado de Magnoli e Scalzaretto (1998).

Além da época do ano, outro fator importante para a definição da quantidade de radiação solar em determinado local é a latitude, uma vez que regiões mais próximas dos polos têm variações na duração solar do dia mais intensas, enquanto a insolação diária será mais estável em regiões próximas à linha do Equador. Desse modo, para melhorar o aproveitamento da radiação solar, pode-se ajustar a posição e a inclinação do painel fotovoltaico de acordo com a latitude local. No Hemisfério Sul, por exemplo, um sistema de captação solar fixo deve ser orientado para o Norte, com ângulo de inclinação similar ao da latitude local. A Figura 4 mostra uma estimativa da média anual de insolação diária em diferentes regiões brasileiras (ANEEL, 2005).

Figura 4 - Média de insolação diária no Brasil (horas).



Fonte: Adaptado de ATLAS Solarimétrico do Brasil (2000).

Além dos fatores apresentados, a radiação solar existente na superfície terrestre depende também das condições climáticas e atmosféricas, sendo que parte desta radiação é perdida ao atingir a atmosfera devido à reflexão e absorção dos raios solares. Ainda assim, estima-se que

a energia solar incidente sobre a superfície terrestre seja da ordem de 10 mil vezes o consumo energético mundial (BRASIL, 2008).

2.2. GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA VIA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

2.2.1. Efeito Fotovoltaico

As diversas fontes de energia são formas indiretas da energia solar, incluindo energia hidráulica, biomassa, eólica e de combustíveis fósseis. A energia proveniente do sol também é capaz de ser convertida diretamente em energia térmica, para aquecimento de fluidos e ambientes e para geração de potência mecânica ou elétrica, ou em energia elétrica, através dos efeitos termoeletrico e fotovoltaico (ANEEL, 2005).

O chamado efeito fotovoltaico foi inicialmente relatado pelo físico francês Edmond Becquerel em 1839. Este efeito consiste na emissão de elétrons por um determinado material semicondutor quando este absorve luz. O efeito fotovoltaico possibilitou a criação da célula fotovoltaica, unidade fundamental do processo de conversão da energia solar em energia elétrica (ALVES, 2008).

2.2.2. Histórico dos Sistemas Fotovoltaicos

O primeiro sistema a utilizar o efeito fotovoltaico foi concebido em 1876 e foi construído a partir de estruturas de estado sólido, porém, a produção industrial só teve início no ano de 1956, quando a microeletrônica possibilitou a produção de painéis fotovoltaicos. Inicialmente esta foi uma tecnologia com alto custo de produção e baixa eficiência, o que restringiu sua utilização a aplicações militares, principalmente nos satélites artificiais dos EUA e da União Soviética durante a corrida espacial.

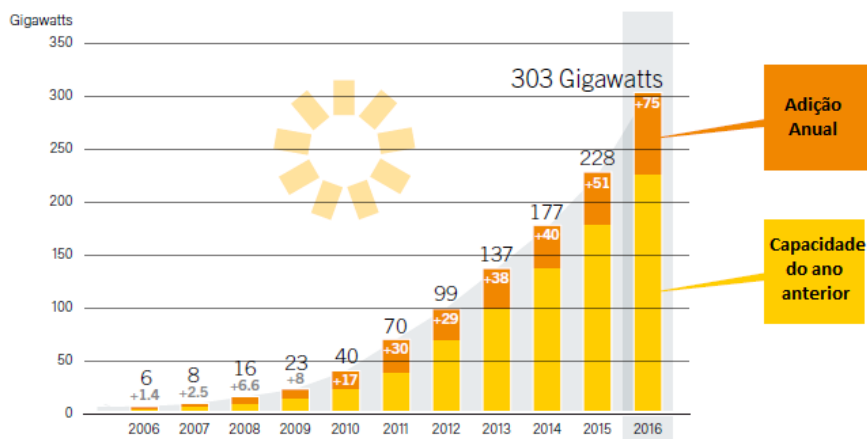
As aplicações comerciais da energia solar fotovoltaica tiveram início na década de 1970 em aplicações de empresas ferroviárias americanas. Estas empresas utilizavam módulos solares com o intuito de levar eletricidade a zonas remotas do país, possibilitando o funcionamento de sistemas de sinalização e repetidores de micro-ondas utilizados na comunicação, mesmo em localizações onde não existia o acesso a rede elétrica convencional. Outro país a utilizar a energia solar para alimentação de sistemas de comunicação por micro-ondas foi a Austrália que, em 1978, instalou setenta repetidores alimentados totalmente por energia fotovoltaica, cobrindo uma extensão de 2.400 km. Esta tecnologia foi então

rapidamente difundida para sistemas de comunicação, uma vez que estes sistemas geralmente demandam baixa potência e podem se localizar em locais sem acesso a energia elétrica convencional (ALVES, 2008).

Nas últimas décadas houve um grande aumento na eficiência dos sistemas fotovoltaicos devido ao desenvolvimento de novos materiais, o que permitiu que a tecnologia se difundisse com rapidez devido à diminuição dos custos.

Segundo dados do REN21 (2017), vistos na Figura 5, a capacidade global instalada de sistemas fotovoltaicos em 2016 chegou a 303 GW, sendo que este valor era de apenas 6 GW dez anos antes, em 2006, o que indica um crescimento com uma taxa média anual próxima a 50%.

Figura 5 – Capacidade Global instalada de Sistemas Fotovoltaicos em 2016.



Fonte: Adaptado de REN21 (2017).

2.2.3. A Célula Fotovoltaica

As chamadas células fotovoltaicas, também conhecidas como células solares, são construídas a partir de materiais semicondutores com o intuito de produzir eletricidade. São chamadas de unidades fundamentais do processo de conversão da energia solar em energia elétrica, pois podem ser conectadas formando módulos ou arranjos fotovoltaicos (*PV arrays*). São células com tamanhos e formatos variados.

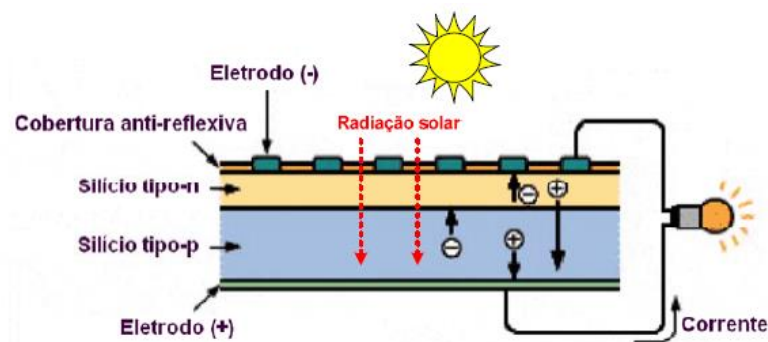
O objetivo da célula fotovoltaica é formar uma junção “pn”, onde o movimento de cargas é capaz de formar um campo elétrico. Para isso são utilizadas duas camadas de material semicondutor justapostas. Estes materiais devem ser do tipo tetravalente, o que significa que seu átomo possui quatro elétrons em sua camada de valência, sendo que o

material tetravalente mais comumente utilizado na confecção de células fotovoltaicas é o silício.

Uma das camadas de material tetravalente sofre a dopagem com um material penta valente, isto é, insere-se um elemento no cristal de silício que possua cinco elétrons na camada de valência, normalmente o fósforo, originando um elétron livre nas ligações covalentes, o que forma a camada chamada “n”, devido à carga negativa que o elétron livre gera. Da mesma forma um material trivalente é inserido no cristal de silício da outra camada, em geral o boro, gerando a falta de um elétron nas ligações covalentes, formando a camada “p”, já que esta falta de elétron gera uma carga equivalente à de um elétron, porém positiva. A justaposição da camada “n” com a camada “p” forma a chamada junção “pn”.

A geração de energia elétrica é possível quando a luz solar incide na célula semicondutora “pn”. Os fótons incididos na célula são capazes de liberar elétrons dos átomos do material semicondutor. Estes elétrons livres por sua vez se movimentam na estrutura cristalina da célula, criando uma sequência de pares elétron-lacuna, o que forma a corrente elétrica. A este processo físico se dá o nome de efeito fotovoltaico, sendo que a corrente elétrica será proporcional à intensidade da luz solar que incide sobre a célula fotovoltaica. A Figura 6 esquematiza a estrutura da célula solar de silício.

Figura 6 - Estrutura da célula fotovoltaica de silício em corte.



Fonte: Adaptado de EPIA (2008).

Como indicado anteriormente, o material tetravalente mais utilizado na confecção de células fotovoltaicas é o silício cristalino, chegando a 90% das células fotovoltaicas produzidas em 2007 segundo dados da Associação Europeia da Indústria Fotovoltaica (EPIA, 2008). Este material pode ser utilizado na forma monocristalino (mono-Si) e policristalino (poly-Si) ou ainda em sua forma não cristalina, o chamado silício amorfo (a-Si).

O silício amorfo é um dos materiais utilizados na produção de células fotovoltaicas utilizando filmes finos, que tem tido sua aplicação expandida nos últimos anos, uma vez que os filmes finos permitem a produção de células com menor quantidade de material que quando utilizadas estruturas cristalinas. Além disso, os filmes finos requerem uma menor quantidade de energia gasta em sua fabricação, o que indica um ponto positivo a aplicação deste tipo de material.

A produção de células de filmes finos consiste na deposição de camadas finas de materiais fotossensíveis sobre um substrato que pode ser vidro, aço inoxidável ou plástico. Estas camadas devem ter uma espessura extremamente pequena, na ordem de microns, o que, juntamente com o substrato de baixo custo, gera um custo baixo de matéria prima, fazendo com que a produção da célula seja mais barata que nos casos em que se utilizam materiais cristalinos.

Por sua vez, a utilização de materiais cristalinos tem a vantagem de gerar células com maior eficiência devido à uniformidade de sua estrutura molecular, sendo que esta eficiência chega a ordem de 20%, enquanto estruturas de filmes finos tem sua eficiência máxima na casa dos 11%.

Além do silício amorfo (a-Si), outros materiais podem ser utilizados na confecção de células fotovoltaicas utilizando filmes finos. Dentre os utilizados na produção comercial se destacam o Disseleneto de Cobre e Índio ou Gálio (CIS, CIGS) e o Telureto de Cádmio (CdTe). A tabela 1 indica a eficiência de células fotovoltaicas produzidas com os materiais mais comumente empregados.

Tabela 1 - Eficiência das Células Fotovoltaicas conforme material utilizado.

Material	Filme Fino			Silício Cristalino	
	Silício Amorfo (a-Si)	Telureto de Cádmio (CdTe)	CI(G)S	Mono Cristalino	Poli Cristalino
Eficiência da Célula	5% - 7%	8% - 11%	7% - 11%	16% - 19%	14% - 15%
Área de módulos por kW	15 m ²	11 m ²	10 m ²	~ 7 m ²	~ 8 m ²

Fonte: EPIA (2008).

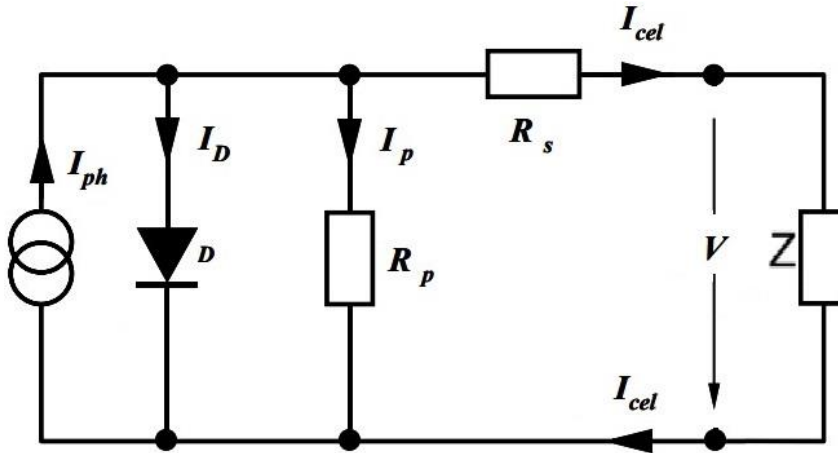
Existem ainda outras opções conhecidas, porém pouco disponíveis comercialmente, como o Arseneto de Gálio (GaAs), que possui estrutura similar à do Silício, mas com uma maior capacidade de absorção da luz, o que permite obter eficiências na ordem de 25% - 30%,

porém com alto custo de produção, o que faz com que este material seja aplicado principalmente nos sistemas espaciais, devido a sua alta resistência à radiação e ao calor (ALVES, 2008).

2.2.4. Modelo Elétrico de uma Célula Fotovoltaica

A célula fotovoltaica pode ser descrita por um circuito equivalente, conforme mostrado na Figura 7. A célula pode ser vista como um gerador de corrente, onde R_S e R_P indicam as resistências parasitas presente no sistema. R_S representa a resistência ao fluxo de corrente gerada pelos contatos metálicos da parte traseira e frontal da célula e pelas conexões e terminais do circuito. Já R_P representa as correntes parasitas causadas devido a imperfeições durante o processo de fabricação da célula, como uma junção “pn” não ideal. Ambas produzem perdas que reduzem a eficiência final da célula fotovoltaica (PESTANA, 2017).

Figura 7 – Circuito Equivalente de uma Célula Fotovoltaica.



Fonte: Adaptado de Pestana (2017).

A equação que define a corrente elétrica gerada pela célula é expressa pela equação (1).

$$I_{cel} = I_{ph} - I_D - I_P = I_{ph} - I_0 * e^{\frac{V+R_S*I}{V_t}} - \frac{V+R_S*I}{R_P} \approx I_{SC} * \left(1 - e^{\frac{V-V_{OC}+R_S*I}{V_t}} \right) \quad (1)$$

Sendo,

– Z: Representa a carga;

- V e I: Representam as características de tensão e corrente da célula, em [V] e [A];
- I_{SC} : Representa corrente em curto-circuito, em [A];
- I_{ph} : Representa a corrente gerada pelo efeito FV, em [A];
- V_{OC} : Representa a tensão em circuito aberto, em [V];
- I_D : Corrente unidirecional, interna da célula FV, em [A];
- I_0 : Corrente inversa de saturação do diodo, em [A];
- I_p : Corrente de fugas, em [A];
- V_t : Representa a tensão térmica, e é calculada segundo a equação (2);

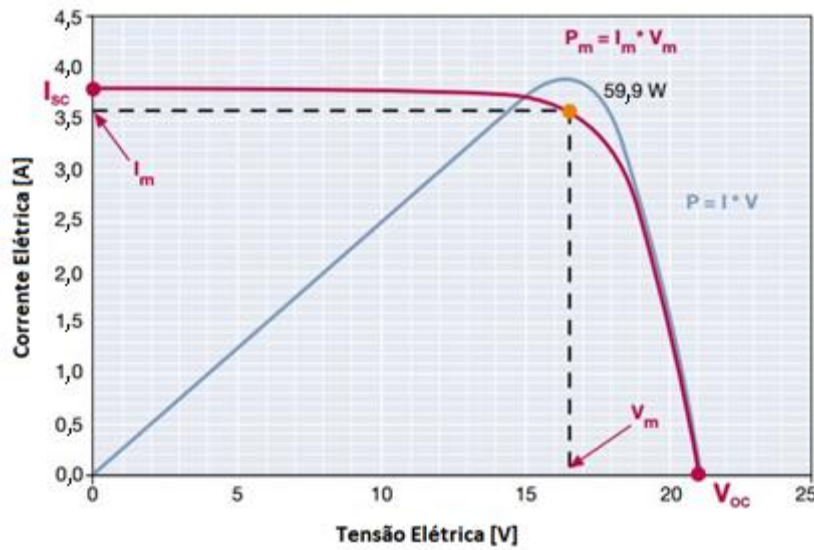
$$V_t = \frac{k*T}{q} \quad (2)$$

Sendo,

- k: Representa a constante de Boltzman, $1,346 \times 10^{-23}$ [J/K];
- T: Representa a temperatura da célula, em [° C];
- q: Representa a carga do elétron.

Uma vez definido o circuito equivalente que representa a célula fotovoltaica, é possível também representar a curva característica da célula, que mostra como se comporta a variação da tensão elétrica da célula conforme a variação da corrente elétrica desta. Esta curva é considerada importante para a análise do sistema, pois é capaz de indicar o desempenho e a eficiência de determinado sistema fotovoltaico, levando em conta as condições atmosféricas, como a temperatura e a radiação. Além disso, com a curva característica, pode-se definir a máxima potência que a célula fotovoltaica é capaz de produzir, através da curva potência elétrica versus tensão elétrica, representada em azul na Figura 8. Esta Figura representa a curva característica de célula fotovoltaica a uma temperatura ambiente de 25 °C e uma irradiação de 1000 W/m². Da curva, é possível obter a corrente elétrica de curto-circuito (I_{SC}), a tensão elétrica de circuito aberto (V_{OC}), a corrente elétrica no ponto de máxima potência elétrica (I_m), a tensão elétrica no ponto de máxima potência elétrica (V_m) e o ponto máximo de funcionamento, onde a potência elétrica é a máxima possível.

Figura 8 - Curva Característica de uma Célula Fotovoltaica.



Fonte: Adaptado de ABB Group (2010).

Além dos valores indicados na curva característica, outro parâmetro importante a ser analisado em uma célula fotovoltaica é o valor do seu fator de forma (FF), que é condicionado pelas resistências R_s e R_p do circuito elétrico, e pode ser calculado pela equação (3).

$$F_F = \frac{I_m * V_m}{I_{SC} * V_{OC}} \quad (3)$$

Sendo,

- I_m : Representa a corrente do ponto de funcionamento máximo da célula, em [A];
- V_m : Representa a tensão do ponto de funcionamento máximo da célula, em [V];
- I_{SC} : Representa a corrente de curto-circuito da célula, em [A];
- V_{OC} : Representa a tensão de circuito aberto da célula, em [V].

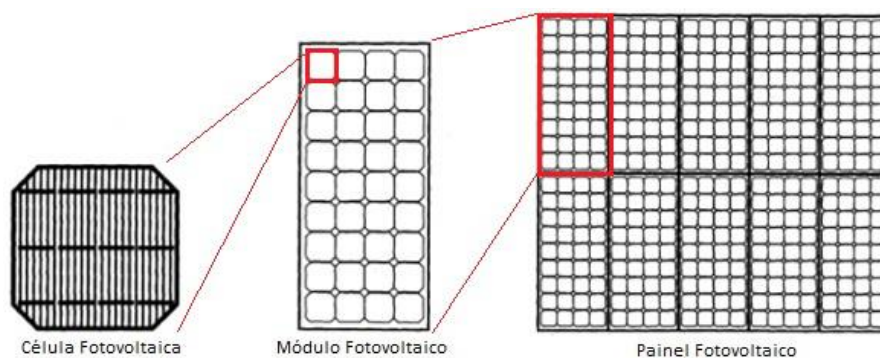
Este fator é importante na determinação do desempenho da curva característica de uma célula fotovoltaica, sendo que o seu valor é sempre menor que uma unidade (PESTANA, 2017).

2.2.5. Associação de Células Fotovoltaicas

Uma célula fotovoltaica por si só não é capaz de gerar uma potência elétrica relevante. Por isso normalmente estas células são interligadas entre si formando o chamado módulo fotovoltaico ou módulo solar. A quantidade de células interligadas para formar um módulo pode variar, sendo que para aplicações de média potência normalmente utilizam-se 72 células. Essa interligação pode ser feita em série, de modo que o nível de tensão elétrica obtido aumenta, ou em paralelo, aumentando o nível de corrente elétrica. Na formação dos módulos fotovoltaicos, as células geralmente são interligadas em série e em paralelo.

Da mesma forma que células fotovoltaicas podem ser interligadas formando os módulos solares, estes também podem ser interligados para formar os painéis fotovoltaicos, ou painéis solares. A Figura 9 exemplifica a formação de módulos e painéis solares.

Figura 9 - Evolução entre célula, módulo e painel fotovoltaico.



Fonte: Adaptado de Pestana (2017).

2.2.6. Efeito da temperatura, da radiação, do sombreamento e da presença de poeira ou neve no desempenho do sistema fotovoltaico.

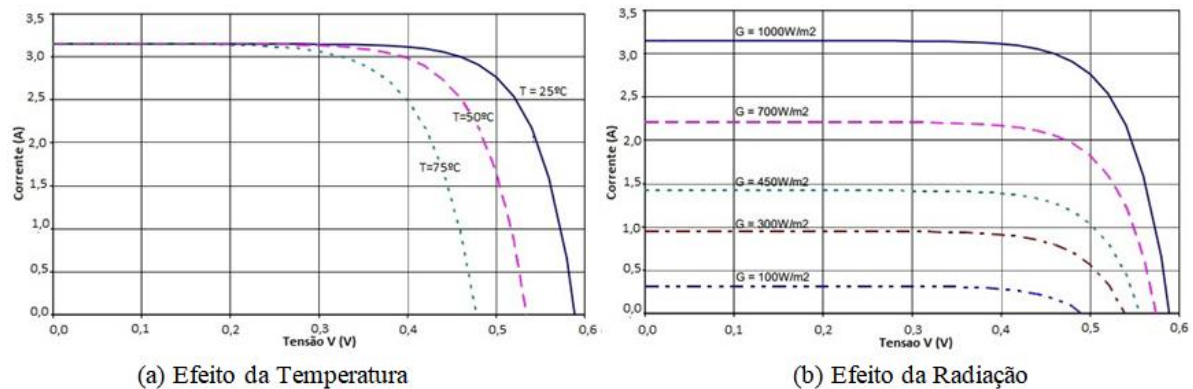
Alguns fatores podem afetar o desempenho de um sistema fotovoltaico, seja por tempo de vida ou por fatores externos como condições atmosféricas ou presença de objetos e resíduos que geram sombreamento sobre o sistema.

Os dois primeiros fatos que serão considerados são a temperatura e a radiação. Em relação à temperatura, conforme esta aumenta, o valor de tensão elétrica gerado pelas células fotovoltaicas diminui enquanto o valor da corrente elétrica permanece praticamente constante. Isso afeta negativamente o desempenho da célula, já que a potência elétrica gerada diminuirá. Além disso, temperaturas muito altas podem gerar uma degradação mais rápida do

equipamento, diminuindo sua vida útil e fazendo com que o sistema fotovoltaico possa ter seu desempenho negativamente afetado.

Já em relação à radiação, quanto menor a radiação solar incidente sobre a célula fotovoltaica, menor a corrente elétrica gerada e, conseqüentemente, menor a potência elétrica obtida, o que diminui o rendimento energético do sistema. A Figura 10 exemplifica o efeito da temperatura e da radiação no desempenho de uma célula fotovoltaica.

Figura 10 – Efeitos causados pela temperatura e pela radiação em uma célula fotovoltaica.



Fonte: Adaptado de Castro (2012).

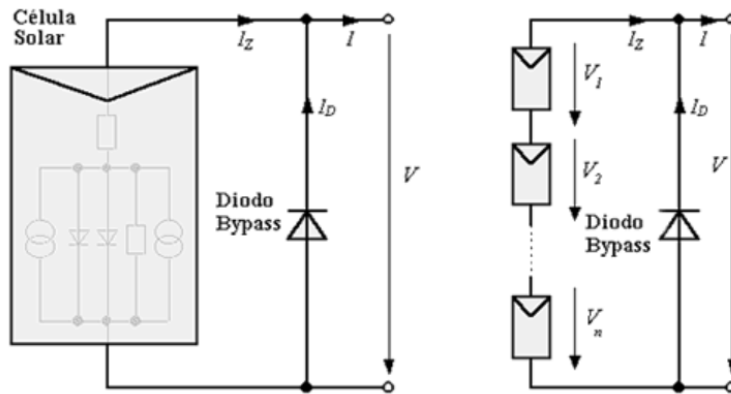
Tendo em vista os efeitos causados pela variação da temperatura e radiação no desempenho das células fotovoltaicas, deve-se assegurar que o sistema será instalado em um local com valores apropriados de temperatura e radiação, garantindo um desempenho favorável do sistema, otimizando a geração de potência elétrica.

Além da temperatura e da radiação, um fator importante a se levar em conta na escolha do local de instalação do sistema fotovoltaico é a presença de objetos capazes de sombrear o sistema, como edifícios e árvores. Como o módulo fotovoltaico consiste de diversas células conectadas em série e em paralelo, conforme mostrado anteriormente, se apenas uma das células estiver sombreada, a diminuição da corrente elétrica desta célula irá afetar a corrente elétrica das demais, reduzindo consideravelmente a potência elétrica de saída do sistema.

Uma forma de evitar que o sombreamento de uma célula, ou de um conjunto de células, afete consideravelmente todo o sistema, é utilizar diodos chamados de *bypass*, responsáveis por criar um caminho alternativo à passagem de corrente, o que reduz o impacto negativo do sombreamento desse conjunto de células. A Figura 11 demonstra a utilização desses diodos que podem estar em paralelo com cada célula fotovoltaica ou com um conjunto de células, sendo que esta última configuração é mais aplicada, já que a utilização de um diodo por célula

aumentaria consideravelmente o custo do projeto do módulo ou painel fotovoltaico, além de aumentar as perdas do sistema, uma vez que cada diodo requisita uma determinada potência para seu funcionamento.

Figura 11 - Exemplo de ligações de diodos *bypass* em uma célula ou conjunto de células fotovoltaicas.

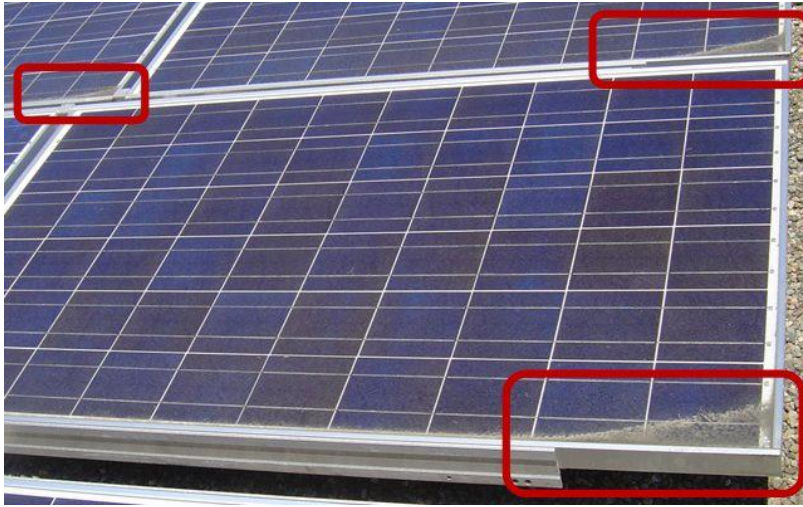


Fonte: CRESESB (2008).

A deposição de objetos como folhas, poeira, terra e neve sobre os módulos fotovoltaicos também geram efeitos negativos no desempenho do sistema, pois estes bloqueiam parte da radiação recebida pelas células. Esta deposição pode ser afetada pela inclinação dos painéis fotovoltaicos, uma vez que quanto mais horizontal for a superfície do painel, maior será a deposição de poeiras. Logo, além da latitude local conforme indicado anteriormente neste trabalho, a presença de deposição de objetos como poeira, terra e neve no ambiente também deve ser considerada na definição do ângulo de inclinação dos painéis fotovoltaicos durante a instalação.

A Figura 12 exibe um exemplo de deposição de poeira sobre um painel fotovoltaico, o que pode reduzir o desempenho de um sistema fotovoltaico (PESTANA, 2017).

Figura 12 - Placa solar com deposição de poeira.



Fonte: Lam (2009).

2.3. CAPACIDADE E APLICAÇÕES NO BRASIL

A média anual de irradiação global incidente em qualquer região do território brasileiro fica entre 1500 e 2500 Wh/m², o que indica um valor de irradiação maior que aquele encontrado em países onde as aplicações de tecnologias para obtenção de energia solar são muito mais disseminadas, como na Alemanha, onde a irradiação global média incidente fica entre 900 e 1250 Wh/m².

A Figura 13 mostra a média da irradiação solar anual nas diferentes regiões do território brasileiro (NASCIMENTO, 2017).

Figura 13 - Média anual da irradiação global no território brasileiro.



Fonte: Pereira et al (2006).

Pela Figura 13 observa-se que as regiões brasileiras com maior potencial para a aplicação da energia solar são os estados de Minas Gerais, Goiás, Tocantins e os estados da região nordeste em geral.

Mesmo com a grande irradiação solar presente no território brasileiro, verifica-se uma falta de investimento para a produção de energia solar no país, uma vez que apenas 81 MW de energia solar fotovoltaica estão instaladas no Brasil, o que representa apenas 0,05% da

capacidade total do país, enquanto países como China e Alemanha possuem cerca de 40 GW instalados, cerca de 500 vezes mais capacidade do que a instalada que o Brasil (EPE, 2017).

Também é possível analisar o potencial de instalação de painéis fotovoltaicos em telhados residenciais, caso estudado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) em 2014 que gerou os dados apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Potencial Fotovoltaico Residencial.

UF	Potencial Fotovoltaico Residencial (GWh/ano)	Consumo Residencial Anual em 2013 (GWh)	Potencial/Consumo
SP	62196	38783	160%
MG	32193	10118	318%
RJ	23521	12833	183%
BA	20674	6144	337%
RS	17257	7750	223%
PR	17170	6986	246%
CE	12527	3751	334%
PE	12352	4563	271%
GO	10687	3958	270%
SC	9417	4935	191%
MA	8935	2563	349%
PA	8935	2632	339%
PB	5738	1603	358%
ES	5212	2213	236%
MT	4993	2182	229%
RN	4862	1805	269%
PI	4862	1328	366%
MS	4424	1571	282%
AL	4424	1227	361%
AM	3679	1784	206%
DF	3592	2191	164%
SE	3066	979	313%
RO	2321	1084	214%
TO	2234	695	321%
AC	964	373	258%
AP	701	500	140%
RR	569	345	165%
BRASIL	287505	124896	230%

Fonte: Nascimento (2017).

Com os dados da Tabela 2, verifica-se que o potencial de geração de energia elétrica nos telhados residenciais é 2,3 vezes maior que o consumo residencial de energia elétrica no país,

o que por si só demonstra como a energia solar, se bem aplicada, pode ser uma ótima alternativa para a geração de energia limpa em território brasileiro.

2.4. RASTREAMENTO SOLAR

O rastreamento solar é uma técnica utilizada em sistemas fotovoltaicos que permite a variação angular de painéis fotovoltaicos conforme o horário do dia e/ou a época do ano, garantindo um maior aproveitamento da irradiação solar e aumentando a potência elétrica gerada pelo sistema.

O uso de tal tecnologia pode aumentar a produção de eletricidade em aproximadamente um terço, sendo que alguns aplicadores da técnica afirmam que este aumento chega a 40% em algumas regiões, quando comparados com o uso de painéis com angulação fixa.

Na maioria das aplicações de sistemas fotovoltaicos, os módulos ou painéis fotovoltaicos são instalados com uma angulação ótima fixa que respeita a latitude do local de instalação. Realizar a instalação dos módulos respeitando este ângulo ótimo faz com que a eficiência na geração de energia elétrica aumente em até 15% em relação a módulos instalados na horizontal. Entretanto, durante o curso de um ano, o local de aparição do sol no céu varia, fazendo com que este ângulo ótimo de instalação dos painéis fotovoltaicos mude em até 30°.

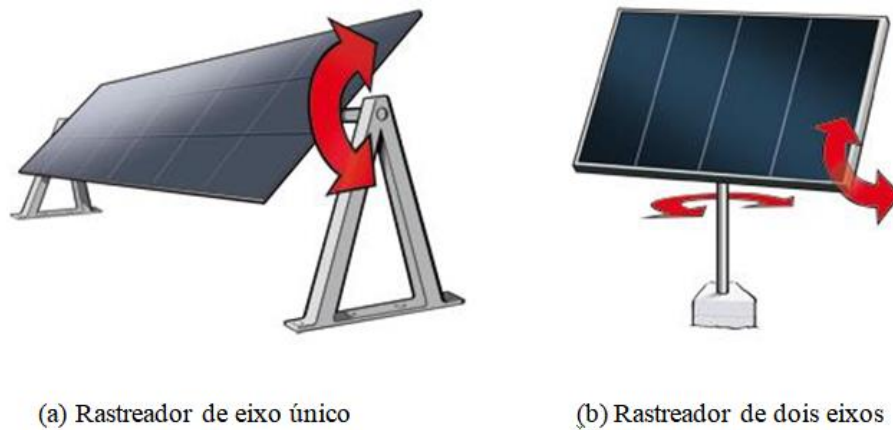
Com a utilização de sistemas de rastreamento solar, a eficiência do sistema fotovoltaico pode aumentar devido à adequação não só a passagem do sol durante o dia, mas também em relação à mudança da localização do sol no céu durante as diferentes estações do ano (APPLEYARD, 2009).

2.4.1. Tipos de rastreadores solares

Existem dois tipos principais de rastreadores solares. Os rastreadores de eixo único são capazes de variar apenas o ângulo de azimute (de leste para oeste) durante o curso do dia, enquanto rastreadores de dois eixos são capazes de, além de variar o ângulo de azimute, variar também o ângulo zenital (vertical).

A Figura 14 ilustra os dois tipos de rastreadores existentes (APPLEYARD, 2009).

Figura 14 – Tipos de rastreadores solares.

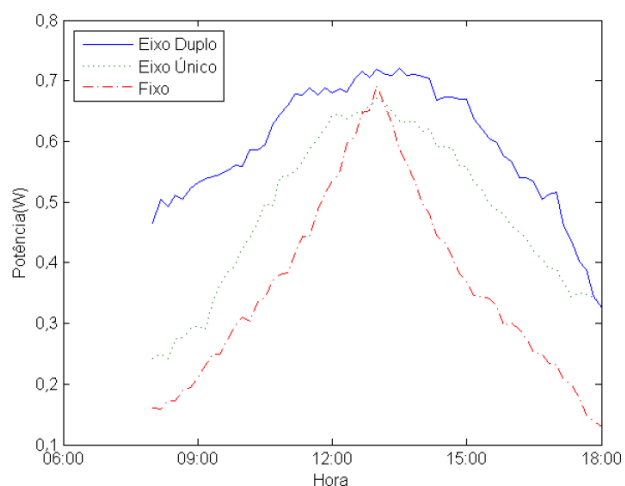


Fonte: Solar Choice (2010).

Um estudo realizado por Trevelin (2014) demonstra o aumento de produtividade ao se utilizar os dois tipos de rastreadores. Em seus ensaios, Trevelin obteve um aumento de 25% na potência elétrica gerada ao se utilizar sistemas de eixo único, em comparação com o sistema fixo, enquanto o aumento ao se utilizar sistemas de duplo eixo foi de 39,2%.

Entretanto, ao se considerar o aumento no consumo de energia e na complexidade do projeto, em especial para aplicações de pequeno porte, considera-se que sistemas de rastreamento de eixo simples podem ter uma aplicação mais rápida e satisfatória que sistemas de rastreamento de dois eixos em alguns casos. A Figura 15 indica as potências geradas pelo caso estudado por Trevelin, indicando o ganho em produtividade ao se utilizar sistemas de rastreamento solar.

Figura 15 - Comparação da potência gerada por sistemas de rastreamento solar e o sistema fixo.



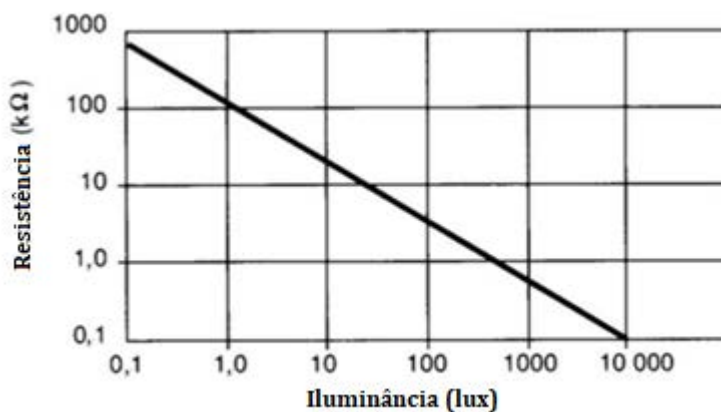
Fonte: Trevelin (2014).

2.5. SENSOR DE LUMINOSIDADE (LDR)

O LDR (*Light Dependent Resistor*) é um componente eletrônico cuja resistência elétrica diminui quando sobre ele incide energia luminosa, possibilitando sua utilização como sensor de luminosidade. Sua resistência varia de forma inversamente proporcional à quantidade de luz incidente sobre ele, ou seja, quanto menor a incidência de luz, maior sua resistência, cujo valor máximo costuma ser da ordem de mega ohms, e quanto maior for essa incidência, menor será sua resistência, cujo valor mínimo costuma ser da ordem de centenas de ohms.

A Figura 16 apresenta a curva característica de um LDR em relação à quantidade de luz incidente sobre o mesmo, medida em Lux, que equivale ao fluxo luminoso por unidade de área (lúmen/m²).

Figura 16 – Curva Característica de um LDR.



Fonte: Meneses (2015).

Percebe-se, pela Figura 16 que a resistência do LDR varia linearmente com a intensidade de luz incidente, podendo ter seu valor representado pela equação (4).

$$R = C.L.a \quad (4)$$

Sendo:

- L: iluminância [lux];
- C e a: constantes que dependem do processo de fabricação e do material utilizado.

A Tabela 3 apresenta exemplos de valores típicos de iluminância para diferentes fontes luminosas.

Tabela 3 – Valores Típicos de Iluminância Conforme Fonte de Luz.

Fonte de Luz	Iluminância (lux)
Lua cheia	0,27 a 1,0
Lâmpada incandescente (60W)	50
Lâmpada fluorescente	500
Luz do sol direta	$32 \cdot 10^3$ a $100 \cdot 10^3$
Pôr-do-sol	400

Fonte: Meneses (2015).

Os LDRs são fabricados com materiais como o Sulfeto de Cádmio (CdS) ou o Sulfeto de Chumbo (PbS), que possuem poucos elétrons livres quando em ambientes escuros, e liberam elétrons quando há luz sobre eles, o que aumenta sua condutividade. Conforme a incidência de luz diminua, estes elétrons retornam à camada de valência, e sua condutividade diminui.

Porém, essa variação do valor da resistência do LDR não ocorre de forma instantânea. É decorrido um tempo até que a resistência atinja um valor estável após uma mudança das condições luminosas. Esse tempo é consideravelmente mais rápido na transição de um ambiente escuro para um claro, do que do inverso, fator este que deve ser levado em consideração ao utilizar LDRs em projetos que acionem dispositivos de acordo com o nível de iluminação ambiente. Um valor típico de tempo de transição de um ambiente escuro para um iluminado é de cerca de 10ms, enquanto que de um ambiente iluminado para um escuro, a resistência varia numa taxa de aproximadamente 200 kΩ/s (MENESES, 2015).

2.6. MOTORES DC E PONTE H

2.6.1. Motores DC

Os motores de corrente contínua consistem na forma mais utilizada de se converter energia elétrica em energia mecânica, são amplamente utilizados em robôs móveis e projetos de automação, tendo em vista que possibilitam que a fonte de alimentação seja uma bateria.

Os motores DC são constituídos por uma parte móvel, o rotor, montado sobre o eixo do mesmo, e por uma parte fixa, o estator, montado em volta do rotor de forma a permitir que este possa girar internamente.

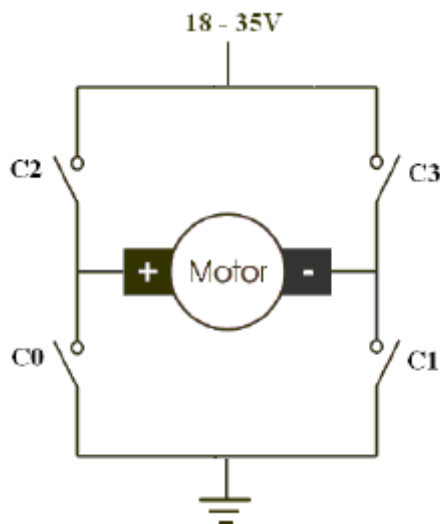
As características importantes de serem observadas na escolha de um motor DC são, sua tensão e corrente nominais, potência, torque e velocidade, sendo que a potência do motor varia diretamente com a velocidade, e esta com a tensão de alimentação.

Os motores de corrente contínua possuem comumente dois terminais, nos quais ao se aplicar uma tensão o motor gira em um sentido, e invertendo-se a polaridade desta tensão, o motor gira no sentido oposto.

2.6.2. Ponte H

A ponte H possui este nome devido ao posicionamento dos componentes comutadores e carga no circuito, conforme ilustrado de maneira simplificada na Figura 17. Ela permite o controle de velocidade do motor, através da tensão aplicada, e do sentido de rotação, através da abertura e fechamento das chaves.

Figura 17 – Ponte H.



Fonte: Matos (2008).

Essas chaves, representados na Figura 17 por C1, C2, C3 e C4, ou se encontram todas abertas, ou são fechadas aos pares, de forma que não seja criado um curto circuito. A Tabela 4 descreve o funcionamento desta ponte H, de acordo com os estados das chaves.

Tabela 4 – Funcionamento da Ponte H.

Estados das chaves				Estado do Motor
C0	C1	C2	C3	
Aberta	Aberta	Aberta	Aberta	Parado
Aberta	Fechada	Fechada	Aberta	Rotação para direita
Fechada	Aberta	Aberta	Fechada	Rotação para esquerda
Fechada	Fechada	Aberta	Aberta	Travagem forçada
Aberta	Aberta	Fechada	Fechada	Travagem forçada
Fechada	Aberta	Fechada	Aberta	Curto-circuito
Aberta	Fechada	Aberta	Fechada	Curto-circuito

Fonte: Matos (2008).

Uma forma de realizar o controle de velocidade de um motor, acionado através de uma ponte H, é utilizando um sinal PWM (*Pulse Width Modulation*), que consiste em ligar e desligar o motor a uma frequência fixa, fazendo com que a tensão média aplicada sobre ele seja proporcional ao intervalo de tempo em que as respectivas chaves encontram-se fechadas (t_{on}) e ao período deste sinal. Esta relação é denominada *Duty Cycle* (D), e é determinada conforme mostrado na equação (5).

$$D = \frac{t_{on}}{t} \cdot 100\% \quad (5)$$

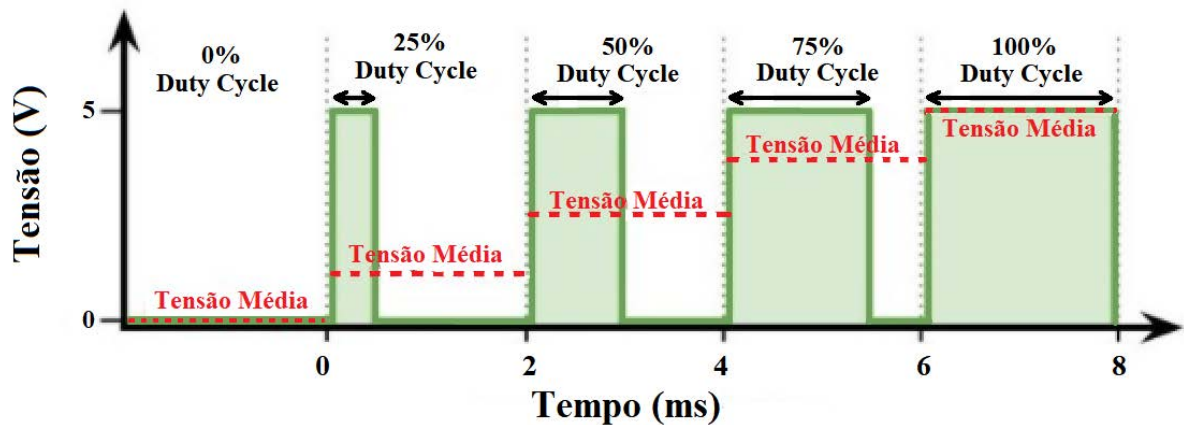
Sendo:

t_{on} : tempo em nível alto do sinal;

t: período do sinal.

Na Figura 18, é possível observar a variação de tensão média aplicada de acordo com o valor de *duty cycle* escolhido para um sinal PWM (MATOS, 2008).

Figura 18 – *Duty Cycle*.



Fonte: adaptada de Loflin (2012).

2.7. ARDUINO UNO

O Arduino consiste de um microcontrolador de placa única, que ao ser programado permite o processamento de entradas e saídas entre o dispositivo e componentes externos conectados a ele. É um exemplo de plataforma de computação embarcada, ou seja, um sistema que pode interagir com seu ambiente por meio de hardware e software.

Existem diversos componentes de entrada e saída que podem ser conectados ao Arduino, sendo alguns exemplos LEDs, displays de matriz de pontos, botões, interruptores, motores, sensores de temperatura, sensores de pressão, sensores de distância, receptores GPS, módulos Ethernet, entre outros dispositivos que emitam dados ou possam ser controlados.

Existem alguns modelos da placa Arduino, sendo que o modelo utilizado neste trabalho foi o Arduino UNO. O microprocessador utilizado na composição do Arduino UNO é o ATMEL ATMEGA16U2. São também, componentes importantes na formação desta placa, o cristal ou oscilador, que define a frequência e velocidade de funcionamento do dispositivo, e regulador linear de tensão de 5 volts. O Arduino UNO também possui uma saída USB, que permite sua conexão a um PC ou Mac. Sua programação é feita através do IDE (Ambiente de Desenvolvimento Integrado), um software livre que permite a operação da placa em linguagem própria do Arduino, que é baseada na linguagem C. A Figura 19 mostra uma placa de Arduino UNO e seus conectores.

Figura 19 – Arduino UNO e seus conectores.



Fonte: Autoria própria.

A placa Arduino também pode ser estendida ao se utilizar um dos shields feitos para interagir com este dispositivo. Estes shields são placas de circuito contendo outros dispositivos que são facilmente conectados ao arduino, trazendo funcionalidades adicionais.

Devido à natureza aberta tanto do software quanto do hardware, existe uma grande quantidade de projetos e aplicações utilizando Arduino divulgadas em diversas plataformas, o que facilita sua aplicação, especialmente em projetos acadêmicos (MCROBERTS, 2011).

3. DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo do trabalho, é mostrado o desenvolvimento de um sistema para rastreamento solar de pequeno porte. Esse sistema, ou protótipo, tem como objetivo mostrar que as técnicas para se realizar um controle do posicionamento de placas fotovoltaicas com relação à incidência dos raios solares são relativamente simples e de fácil utilização.

3.1. MATERIAIS UTILIZADOS

O protótipo foi desenvolvido de forma a ser capaz de movimentar uma célula fotovoltaica, e não um painel completo. O material utilizado para sua confecção foi escolhido de forma a minimizar o custo do projeto, mas permitir a demonstração do funcionamento do sistema, sendo assim, este não deve ser exposto a condições ambientais externas, como por exemplo, chuva, mas possui caráter didático, com a finalidade de incentivar a aplicação e o estudo deste tipo de automação.

A estrutura foi construída com madeira MDF, normalmente utilizada para artesanato. As engrenagens utilizadas foram retiradas de uma impressora que já não estava mais em funcionamento, e foram utilizados como seus eixos, tubos de plástico reaproveitados de canetas.

O motor utilizado é proveniente de um sistema de churrasqueira rotativa e possui um redutor de velocidade, característica esta desejada, tendo em vista os pequenos deslocamentos que devem ser realizados na posição da célula fotovoltaica durante um dia.

Este motor é acionado através de uma ponte H, comandada por um Arduino UNO. A fim de monitorar a incidência dos raios solares e indicar se a célula atingiu sua máxima posição à oeste ou leste, são utilizados dois LDRs e dois sensores de fim de curso, respectivamente, conectados também ao Arduino.

Sendo assim, os materiais utilizados para a confecção deste protótipo foram:

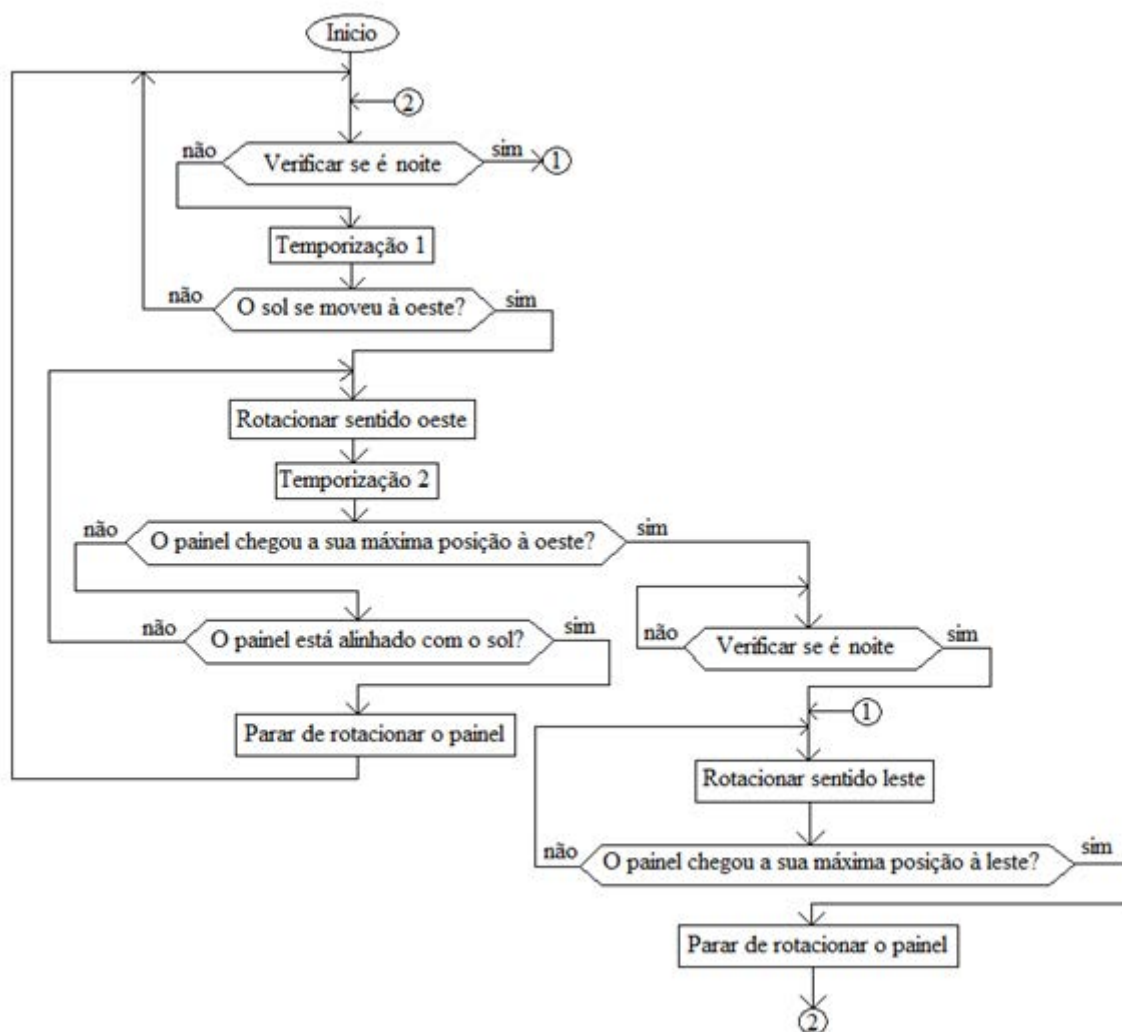
- 1 placa Arduino UNO e seu cabo conector USB;
- 1 motor DC 5V, 193RPM;
- 1 CI L293D;
- 2 LDRs;
- 2 sensores de fim de curso;
- 4 resistores de 10k Ω ;

- 1 fonte DC 5V;
- 1 protoboard;
- placas e varas de madeira MDF, 2 engrenagens plásticas, 2 tubos plásticos, cola e serra para madeira, furadeira e fita adesiva.

3.2. METODOLOGIA

Para desenvolvimento do protótipo, foi inicialmente criado um fluxograma com o funcionamento desejado do sistema. A última versão deste fluxograma desenvolvido, que contempla o funcionamento atual do sistema, pode ser visto na Figura 20.

Figura 20 – Fluxograma de funcionamento do sistema.



Fonte: Autoria própria.

No início do dia, ou a qualquer momento em que o sistema entre em funcionamento, este irá verificar se está de noite, através dos níveis lidos nos sensores de luminosidade (LDRs). Caso esteja de noite, o motor é acionado de forma a fazer o painel retornar à sua posição inicial à leste, determinada por um sensor de fim de curso.

Caso esteja de dia, será verificado se houve um deslocamento significativo da posição do sol à oeste, em intervalos de tempo determinados pela “Temporização 1”. Se houver ocorrido esta mudança na posição do sol, o motor será acionado, por um curto tempo no sentido de acompanhar seu movimento à oeste. O motor será acionado diversas vezes por este curto período de tempo até que o painel se alinhe com a incidência de raios solares ou atinja um segundo sensor de fim de curso, que indica que o painel chegou à sua máxima posição à oeste. Neste caso, o painel permanecerá nesta posição máxima à oeste até que os níveis dos sensores de luminosidade indiquem que é noite, e então ele voltará à sua posição inicial à leste, onde aguardará o início de um novo dia.

Para o teste do sistema desenvolvido foi criada uma estrutura de tamanho reduzido, para uma célula de placa solar, de dimensões 15,5 cm x 15,5 cm.

Foi utilizado o CI L293D, que possui internamente duas pontes H, e pode prover até 600 mA de corrente bidirecional, podendo ser utilizadas fontes DC para o motor de 4,5 a 36 V.

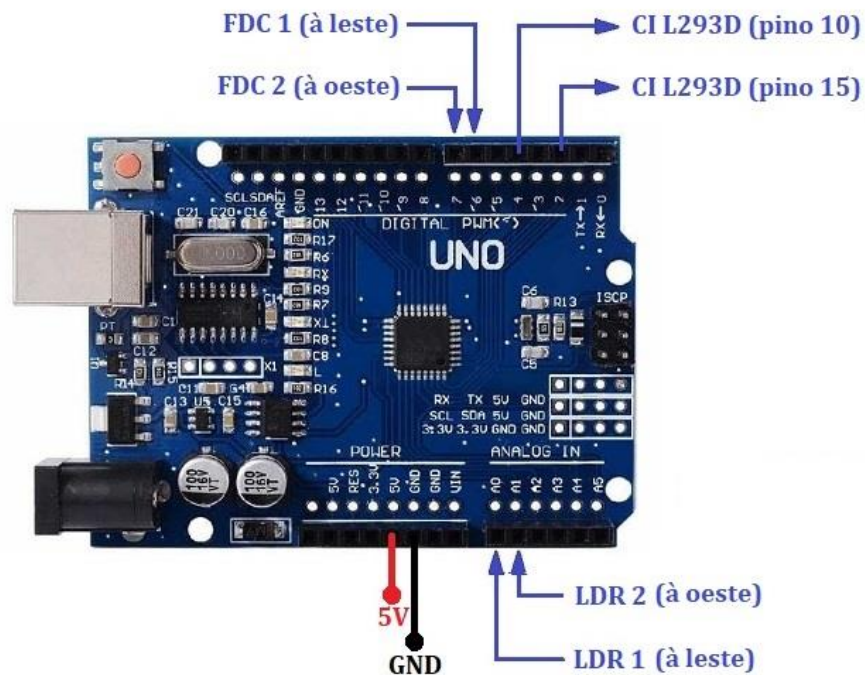
Essa alimentação do motor deve ser e foi realizada de forma independente ao Arduino, pois o Arduino pode não suprir a corrente necessária para o acionamento do motor. Neste caso, foi utilizado um motor DC 5V/193RPM, reaproveitado de um sistema de churrasqueira rotativa e uma fonte 5V DC.

3.3. PROGRAMA E CIRCUITOS DESENVOLVIDOS

Foi desenvolvido um programa, baseado no fluxograma apresentado na Figura 20, com o qual a placa do Arduino UNO foi programada para realizar o controle do sistema. Este programa é mostrado em detalhes no Apêndice A.

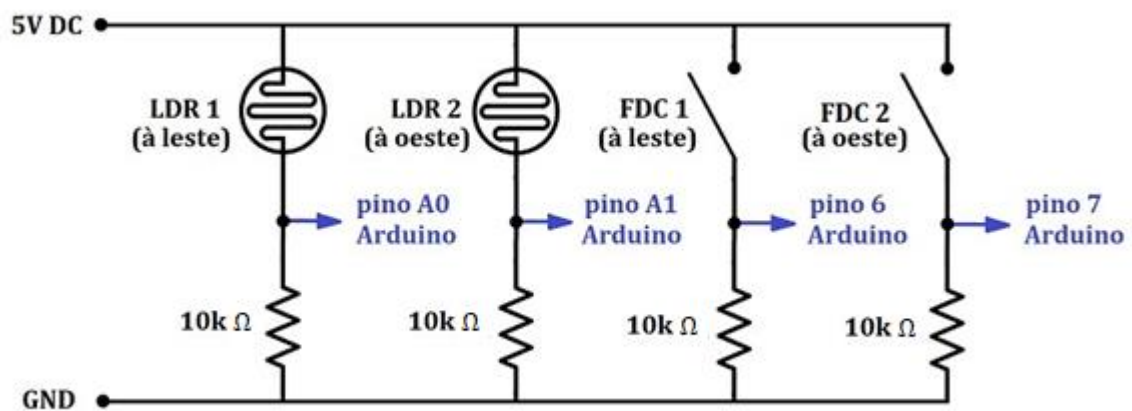
As Figuras 21, 22 e 23, mostram as conexões realizadas no Arduino e os circuitos que foram desenvolvidos para a leitura dos sensores e para o acionamento do motor, respectivamente. Nestas figuras, a sigla FDC corresponde a sensor de fim de curso.

Figura 21 – Conexões Realizadas no Arduino.



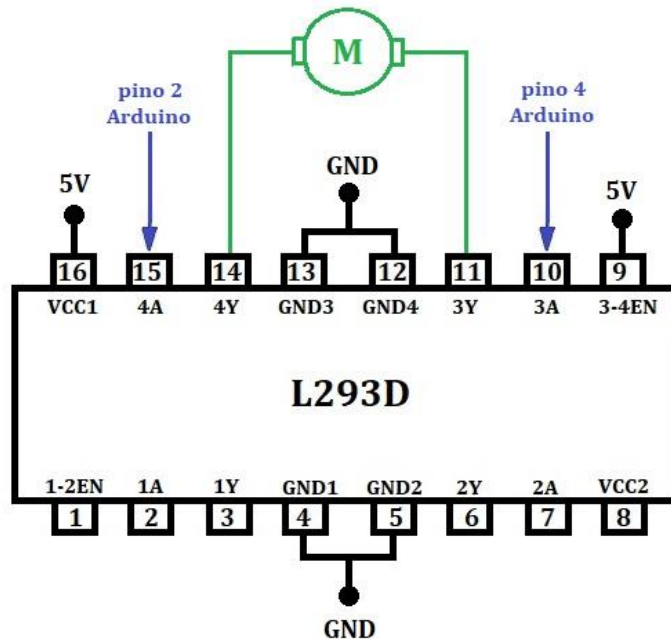
Fonte: Autoria própria.

Figura 22 – Circuito para a Leitura dos Sensores LDR e Fim de Curso.



Fonte: Autoria própria.

Figura 23 – Circuito para o Acionamento do Motor.



Fonte: Autoria própria.

Percebe-se, pela Figura 22, que os valores de tensão nos circuitos que contêm os LDRs, são lidos por portas analógicas do Arduino, sendo assim, ao se utilizar o monitor serial disponível na IDE do Arduino, verifica-se que os valores lidos dos LDRs variam, quando convertidos para formato digital, entre 0 e 1023. No caso da configuração destes circuitos, mostrada na Figura 22, quanto mais próximos de 0 estes valores se mostrarem, mais escuro o ambiente se encontra. Estes valores retornados foram observados sob condições de iluminação natural e artificial, e determinou-se que quando este valor está abaixo de 200, pode-se dizer que já anoiteceu. Um valor menor que este seria suficiente para caracterizar a noite, caso houvesse a certeza do ambiente não ter iluminação artificial nos arredores.

No fluxograma da Figura 20, nos locais indicados com “Temporização 1” e “Temporização 2”, define-se um tempo para o intervalo após o qual será verificado se houve mudança na posição do sol, e um tempo no qual o Arduino aguarda os valores lidos dos LDR’s estabilizarem após o motor ter sido ligado por um curto período de tempo, pois como a temperatura não é uma grandeza que apresenta variações abruptas, é necessário este tempo de assentamento. É utilizado também, o menor intervalo de tempo necessário para o acionamento do motor utilizado a fim de se obter a menor rotação possível. De forma empírica, chegou-se para as condições deste projeto, em um tempo de 100 ms mínimo para acionamento do motor.

Para o protótipo criado, como a finalidade é de demonstração de seus princípios de funcionamento, foi determinada a “Temporização 1” como sendo 20 s e a “Temporização 2” como sendo 5 s. Isso significa que a cada 20 segundos, irá ser verificado se houve um descolamento significativo da posição do sol, de leste a oeste, e caso tenha havido, o motor será acionado por 100 ms.

Após esse curto acionamento do motor, por 100 ms, aguarda-se 5 segundos, para que os valores lidos dos LDRs possam estabilizar, e é verificado se o motor deve ser novamente acionado ou se o painel já se encontra alinhado com o sol. O motor será então acionado quantas vezes forem necessárias, para que haja a correção da posição do painel. Após se ter conseguido o alinhamento do painel com o sol, são aguardados mais 20 segundos até a próxima verificação.

Para verificar se a placa está alinhada com o sol, são obtidas 10 leituras dos sensores, espaçadas de 2 segundos cada. Se em 8 destas 10 leituras, o sensor localizado mais a oeste estiver indicando um valor superior ao localizado à leste, inicia-se o procedimento para realinhamento da placa com o sol.

Da mesma forma, se em 8 destas 10 leituras, os níveis lidos estiverem indicando noite, inicia-se também o retorno do painel para a sua posição inicial, onde o mesmo aguardará o início do dia seguinte.

Em uma aplicação de maior porte, estes intervalos de tempo devem ser estudados levando-se em consideração a quantidade média de horas de sol em um dia, as características dos novos componentes utilizados, a presença de nuvens esporádicas, entre outros fatores. A fim de exemplificação, poder-se-ia, por exemplo, verificar se houve um deslocamento significativo da posição do sol, de leste a oeste, a cada 15 minutos e aguardar 10 leituras, espaçadas de 10 segundos entre si, para se confirmar o alinhamento ou não da placa com os raios solares.

3.4. PROTÓTIPO

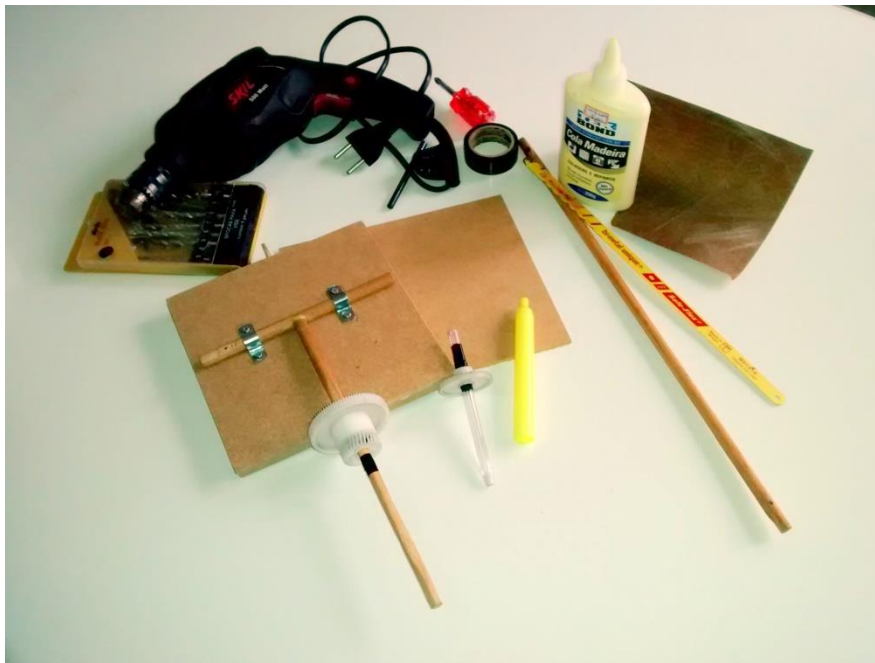
O motor utilizado, alimentado por uma tensão de 5 V quando acionado, apresenta uma velocidade de rotação muito superior à desejada para o sistema de rastreamento solar desenvolvido, mesmo com a presença do redutor de velocidade.

O painel solar deverá se movimentar num ângulo de aproximadamente 180° durante o dia, de leste a oeste. Isto significa que o eixo no qual ele está apoiado deve realizar meia rotação neste período.

Foram analisadas algumas possibilidades para se fazer essa redução de velocidade e decidiu-se pelo uso de engrenagens. Além disso, o motor será acionado por uma tensão de 5V, mas por um tempo reduzido, no qual se verifica pouco deslocamento do painel.

Foi construída uma estrutura em miniatura para implementação do sistema, utilizando-se materiais de baixo custo, como se pode observar na Figura 24.

Figura 24 – Materiais para construção da estrutura.



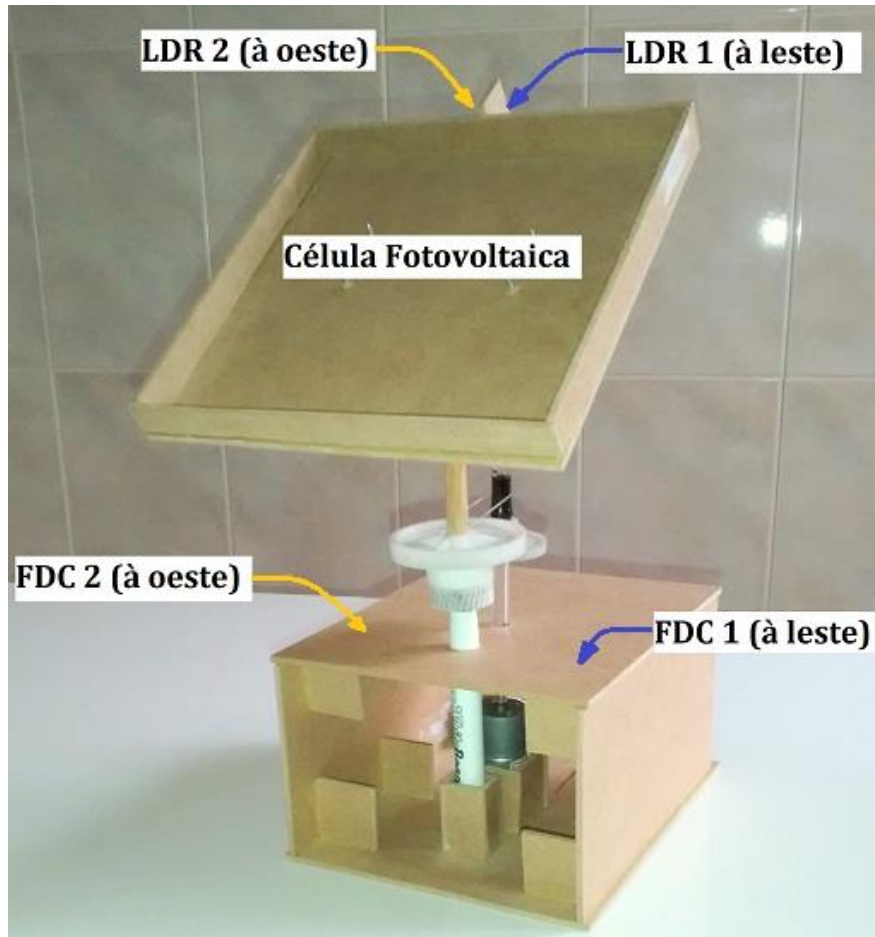
Fonte: Autoria própria.

O suporte para a célula do painel fotovoltaico foi fixado à sua base de forma que permitisse o ajuste de sua angulação manualmente.

Buscou-se realizar tais adaptações para se construir o protótipo, porém, é importante salientar, que em um projeto de maior porte, onde o sistema controlaria o posicionamento de painéis fotovoltaicos, o sistema de engrenagens e o motor, devem ser escolhidos levando em consideração a velocidade de rotação desejada para o painel. Este método de acionamentos sucessivos e curtos do motor, foi necessário tendo em vista o material disponível, e não causa grandes implicações devido ao caráter didático e ao tamanho do protótipo, porém, em uma aplicação real, não é recomendado se realizar o movimento do painel solar desta forma. Devem, neste caso, ser escolhido um motor que consiga operar com velocidade baixa o suficiente, ou que apresente este valor desejado de velocidade de rotação quando associado à engrenagens de tamanhos adequados.

A Figura 25 mostra a estrutura física após ter sido montada, e onde se localizarão os sensores utilizados, bem como o apoio da célula fotovoltaica.

Figura 25 – Estrutura construída.



Fonte: Autoria própria.

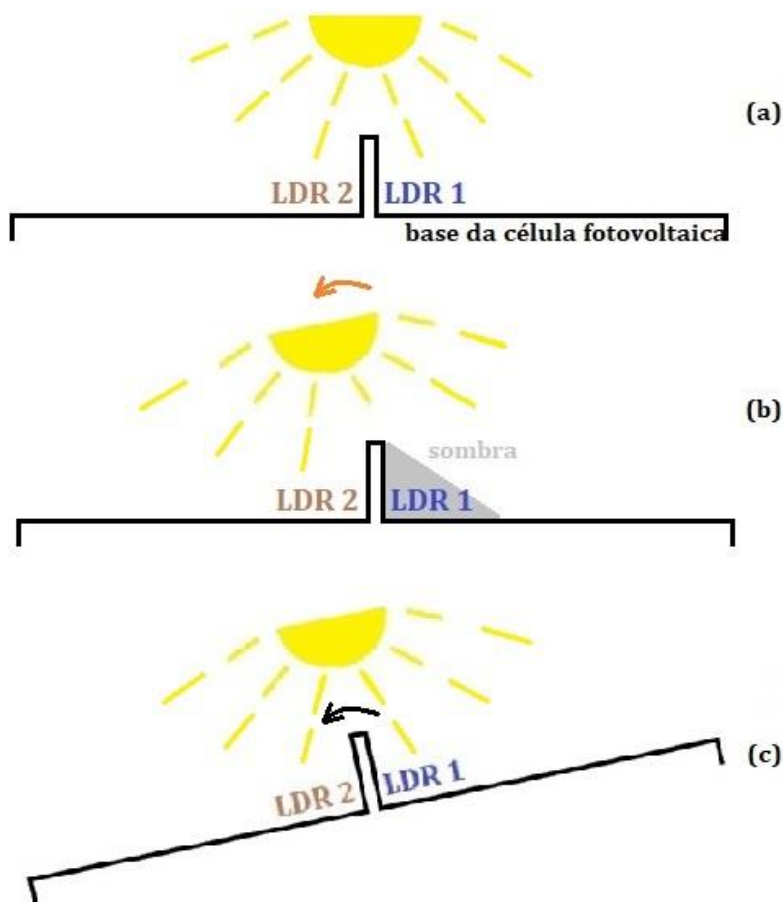
Nesta figura anterior, nota-se que para melhor funcionamento do projeto, foi necessário adicionar uma “barreira” entre um LDR e o outro. O objetivo desta barreira é acentuar a diferença nos valores lidos dos LDRs pelo Arduino, na condição em que a placa não está alinhada com o sol.

Deseja-se, neste controle do posicionamento da placa, verificar se o valor lido para o LDR à oeste, indica que este está recebendo mais incidência solar que o LDR à leste, necessitando que a placa seja novamente alinhada com o sol.

Em um primeiro momento, ao posicionar cada um dos dois LDR's em uma extremidade do apoio da célula fotovoltaica, notou-se que os mesmos apresentavam valores lidos muito próximos, mesmo quando havia ocorrido um desalinhamento da fonte luminosa com a placa. Para contornar este problema, decidiu-se posicionar os dois LDRs mais ao centro

do apoio da célula fotovoltaica e para acentuar a diferença entre os valores lidos no caso de desalinhamento da placa com o sol, colocou-se uma barreira entre eles. Desta forma, é mostrado na Figura 26, um desalinhamento da placa com a incidência de raios solares, faz com que o LDR à oeste receba mais luminosidade, e que o LDR à leste fique na sombra causada por esta barreira, apresentando uma diferença significativa dos valores lidos para estes.

Figura 26 – Correção da Angulação da Célula Fotovoltaica.

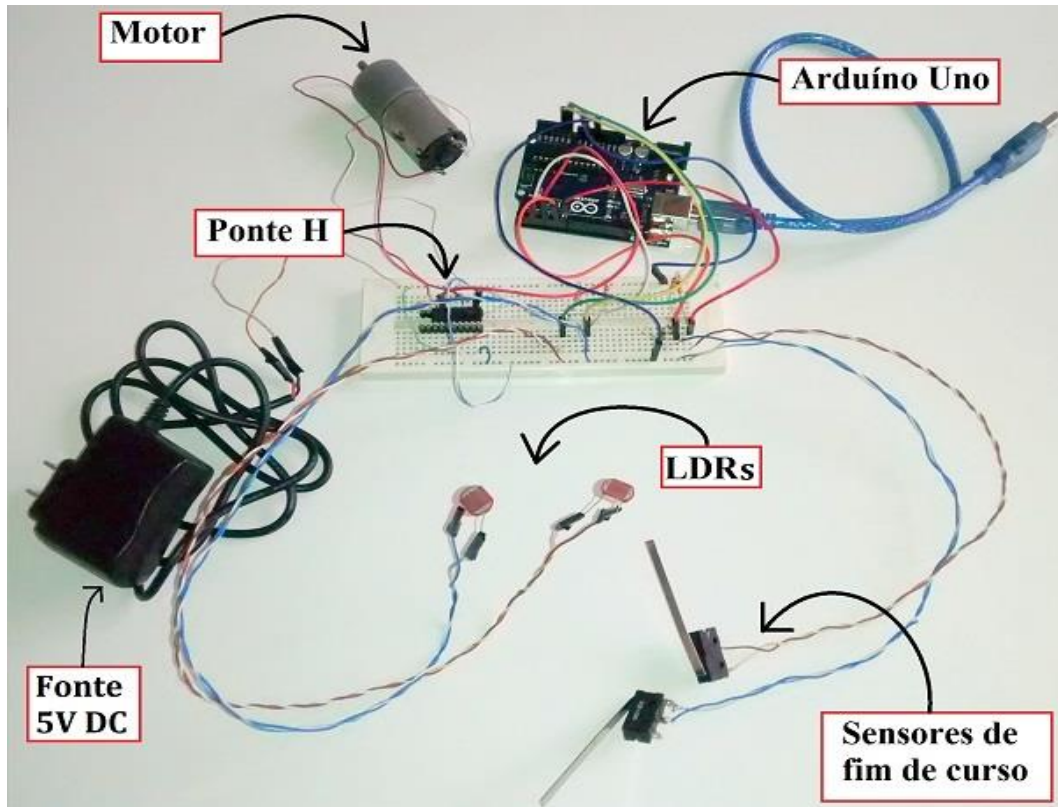


Fonte: Autoria própria.

Na Figura 26, é mostrada em (a), uma situação em que a placa se encontra alinhada com a incidência solar, em (b), quando ocorre uma mudança significativa no posicionamento do sol e a placa se encontra desalinhada e em (c), a placa realizando movimento para se alinhar novamente com o sol.

Os sensores de luminosidade (LDR), sensores fim de curso, motor utilizado, Arduino Uno e circuito para acionamento do motor, utilizados neste projeto, podem ser vistos na Figura 27.

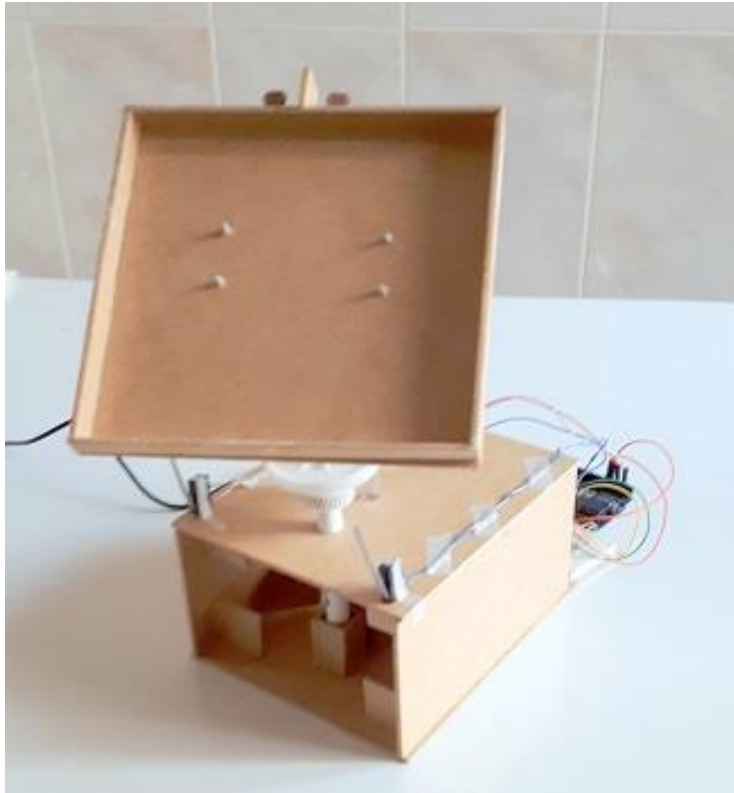
Figura 27 – Componentes do Protótipo.



Fonte: Autoria própria.

Após a confecção da estrutura, a programação do Arduino e a montagem dos circuitos necessários, foi montada a estrutura final deste protótipo, que pode ser vista na Figura 28.

Figura 28 – Estrutura Final.

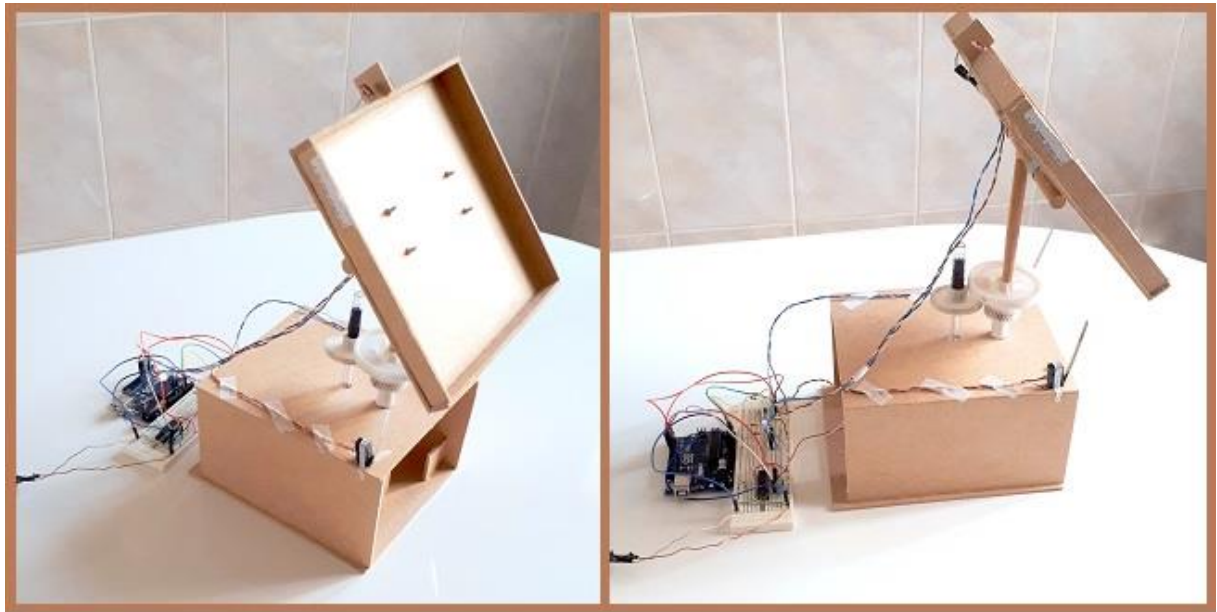


Fonte: Autoria própria.

4. RESULTADOS

Após a confecção da estrutura, foram feitos os primeiros testes, e como resultado, algumas modificações no programa e na própria estrutura, até que se chegasse à estrutura final apresentada na Figura 29 e ao programa final apresentado no Apêndice A.

Figura 29 – Detalhes da Estrutura Final.



Fonte: Autoria própria.

Também foram realizados testes para verificar o funcionamento do sistema, antes da construção da estrutura mostrada na Figura 29, a fim de observar o tamanho de estrutura que seria adequado ao motor DC disponível.

Nesta estrutura final, é possível observar o funcionamento do rastreador solar, tendo somente que simular o momento em que a placa atinge os sensores de fim de curso. Para confirmar o correto funcionamento do sistema, foram simuladas algumas situações.

Primeiramente, em um ambiente interno escuro, utilizou-se uma lanterna para simular o deslocamento do sol de leste a oeste, movendo o feixe de luz da mesma sobre o painel. Tendo sido observado que o painel se moveu conforme o esperado, este teste foi realizado novamente, só que desta vez em ambiente iluminado, utilizando a mesma lanterna.

O objetivo deste teste foi simular, dentro de condições atingíveis e em tempo reduzido, o funcionamento de um seguidor solar real para painel fotovoltaico. Do nascer ao pôr do sol, os sensores ficam expostos à luz solar, de menor ou maior intensidade, conforme seu

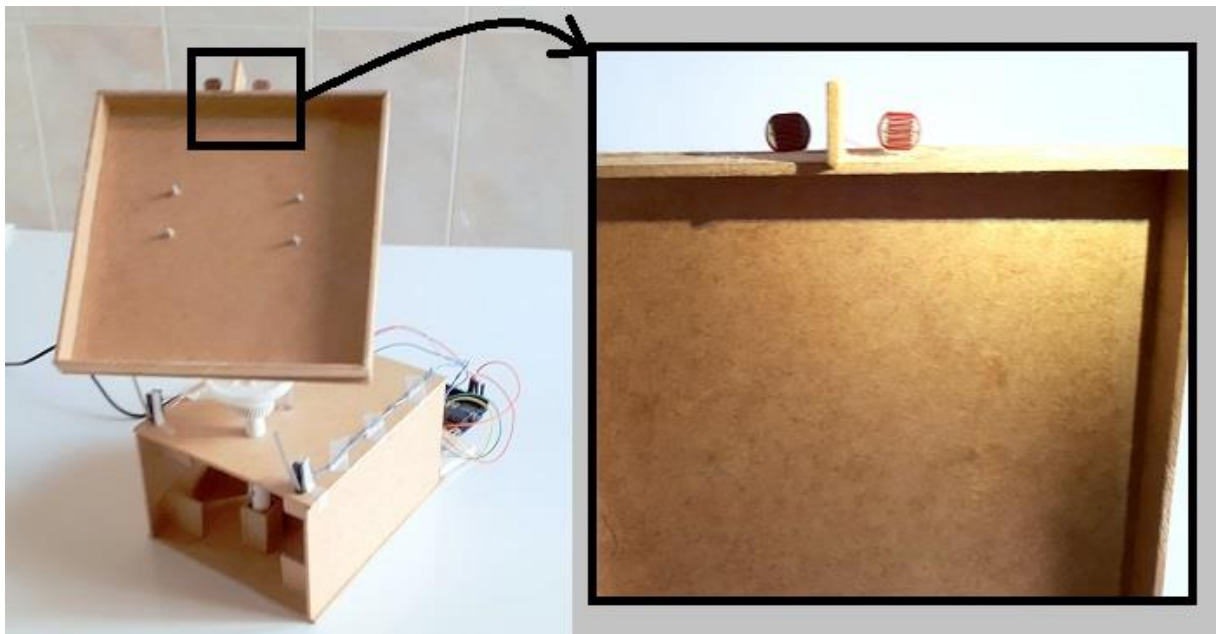
alinhamento com o sol. Porém, devem-se observar as limitações deste projeto ao considerar uma estrutura que ficaria realmente exposta a condições externas.

O protótipo desenvolvido não apresentou dificuldades em realizar movimento seguindo a luz da lanterna quando este estava em um ambiente escuro. Já em ambiente claro, dificuldades apareceram à medida que a intensidade do feixe de luz da lanterna se aproximava da intensidade da luz ambiente. Notou-se que os dois LDRs utilizados no projeto, quando submetidos lado a lado ao mesmo feixe de luz, não apresentavam valores idênticos o suficiente para que o programa não comandasse o acionamento do motor, muito provavelmente devido à tolerância existente nos valores destes componentes.

Então, em um ambiente claro, um feixe de luz somente um pouco mais intenso que a luz deste ambiente, fazia com que esse protótipo não respondesse de forma previsível.

Como este protótipo é de caráter didático, sua finalidade de demonstração de funcionamento do sistema foi atingida, pois em ambiente claro, um feixe de luz de média intensidade já foi o suficiente para seu correto funcionamento. Pode-se observar com mais detalhes na Figura 30, como um feixe de luz desalinhado com a estrutura causa sombra em um dos LDRs.

Figura 30 – Detalhe do Sombreamento do Sensor LDR.



Fonte: Autoria própria.

Porém, algumas considerações devem ser feitas nos projetos de maior porte. Deve-se atentar à tolerância dos sensores de luminosidade escolhidos, e para contornar o inconveniente

da tolerância existente, observar não se eles retornam o mesmo valor, mas se retornam valores dentro de uma mesma faixa.

Assim, em um dia nublado com pouca incidência solar, o sistema só não responderia à direção da incidência dos raios solares se realmente luminosidade destes não diferir de forma visível da luminosidade ambiente, mas nessas condições, o rastreo do sol também não contribuiria de forma significativa para a melhoria da eficiência dos painéis.

Deve-se também observar quais os melhores intervalos de tempo a ser utilizados, tanto entre as verificações de movimento do sol, quando para validar cada uma destas verificações. Deve-se considerar, por exemplo, que uma nuvem pode bloquear por alguns minutos um dos sensores de luminosidade, mas o sistema deve ser capaz de observar que as leituras destes sensores neste tempo não indicam um movimento do sol, pois este não se move de forma abrupta durante o dia.

Outras funcionalidades interessantes de serem implementadas em um sistema de maior porte seriam, um modo "*sleep*" para que o mesmo não ficasse durante a noite verificando mudanças nos sinais lidos dos sensores, uma função "reinício" que permitisse o retorno do painel solar para sua posição inicial a qualquer momento a partir de, por exemplo, um botão, e de forma similar um modo "sem rastreo", que faria o painel ficar parado em uma posição fixa e não realizar o rastreo solar.

Essas funcionalidades seriam interessantes em situações nas quais, por exemplo, deseja-se ligar o sistema de rastreo solar, mas as placas já estão com um posicionamento diferente do inicial, ou então em um dia em que o tempo esteja tão nublado, que o rastreo solar é indiferente para a quantidade de energia gerada pelos painéis, tendo em vista que a quantidade de energia utilizada pelo sistema de rastreo pode até mesmo ser superior à que os painéis estão gerando.

Essas funcionalidades poderiam até mesmo ser estendidas, de forma a permitir que o próprio sistema de rastreo verifique se deve ou não manter seu funcionamento.

5. CONCLUSÃO

A cada dia, mais pessoas tem interesse em investir em sistemas próprios de abastecimento de energia, seja para redução de gastos mensais, tendo em vista os recentes e constantes aumentos de taxas de energia, ou também a diminuição da degradação do meio ambiente, uma vez que se trata de uma fonte de energia renovável, cujos impactos da utilização no meio ambiente são mínimos, quando não, inexistentes.

Estudos citados comprovam o aumento da eficácia de painéis fotovoltaicos quando estes possuem um sistema de rastreamento solar. Os sistemas do gênero podem ser aplicados tanto em países como o Brasil, que possui grande insolação durante todo o ano, como em países em que a insolação não é tão grande, de forma a aproveitar o máximo possível dos raios solares no decorrer do dia.

Sendo assim, observando-se o grande potencial de produção de energia elétrica utilizando painéis fotovoltaicos no Brasil e como sistemas de rastreamento solar tornam esta prática ainda mais rentável, procedeu-se o desenvolvimento deste trabalho.

Projetou-se, então, um protótipo de um rastreador solar capaz de comportar uma célula de um painel fotovoltaico, com objetivo didático de demonstrar o funcionamento e a pertinência da implementação de tais sistemas, uma vez que com simples adaptações na lógica do sistema empregado neste protótipo, bem como estrutura física e equipamentos apropriados (sensores, motor, entre outros), é possível o desenvolvimento de estruturas maiores que podem se tornar relevantes em escala regional.

Para o desenvolvimento do protótipo foram utilizados materiais de baixo custo, como uma placa Arduino UNO e sensores LDR. Estes, juntamente com o programa desenvolvido e demais materiais e conexões de hardware realizadas, se mostraram capazes de realizar um rastreamento efetivo de uma fonte de luminosidade, mesmo se tratando de um sistema de pequeno porte desenvolvido com fins didáticos.

Portanto, a estrutura e o sistema desenvolvidos neste trabalho permitem observar como este rastreamento solar pode ser realizado de forma simples e com custo consideravelmente reduzido. O propósito deste projeto é, sobretudo, encorajar a utilização e o estudo de sistemas de rastreamento solar e incentivar o uso de energias renováveis.

6. REFERÊNCIAS

- ABB GROUP. **Technical application papers no.10: photovoltaic plants**. Zurique: ABB, 2010. 107 p.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 2 ed. Brasília: ANEEL, 2005. 243 p.
- ALVES, A. F. **Desenvolvimento de um sistema de posicionamento automático para painéis fotovoltaicos**. 2008. Tese (Doutorado em Agronomia - Área de Concentração em Energia na Agricultura) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2008.
- APPLEYARD, D. **Solar trackers: facing the sun**. Londres: Renewable Energy World Magazine, 2009.
- ATLAS Solarimétrico do Brasil**. Recife: Editora Universitária da UFPE, 2000.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Tutorial de energia solar fotovoltaica**. Brasília: Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito (CRESESB), 2008.
- CASTRO, R. M. G. **Energias renováveis e produção descentralizada: introdução à energia fotovoltaica**. Lisboa: Universidade Técnica de Lisboa, 2012.
- CORTEZ, R. J. M. **Sistema de seguimento solar em produção de energia fotovoltaica**. 2013. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2013.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Nota Técnica DEA 19/14: inserção da geração fotovoltaica distribuída no Brasil: condicionantes e impactos**. Rio de Janeiro: EPE, 2014.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Nota Técnica DEA 001/17: projeção da demanda de energia elétrica para os próximos 10 anos (2017-2026)**. Rio de Janeiro: EPE, 2017.
- EPIA – European Photovoltaic Industry Association. **Solar generation V**. Bruxelas: SolarPower Europe, 2008.
- GIL, F. J. G. et al. **A review of solar tracker patents in Spain**. Burgos: WSEAS Press, 2009.
- GIOPPO, L. L. et al. **Robô seguidor de linha**. 2009. Dissertação (Graduação em Engenharia da Computação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2009.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Renewable energy sources and climate change mitigation: summary for policymakers and technical summary**. Genebra: UNEP, 2011.
- JUNIOR, A. M. et al. **Desempenho de sistemas FV de acordo com a inclinação e azimute**. São Paulo: Aranda, 2017.

LAM, W. **Should you spring clean your solar panels?** Google Official Blog, 2009. Disponível em: <<https://googleblog.blogspot.com.br/2009/07/should-you-spring-clean-your-solar.html>>. Acesso em: 10 dez. 2017.

LOFLIN, L. **WiringPi and pulse-width-modulation with raspberry pi.** Bristol Watch, 2012. Disponível em: <<http://www.bristolwatch.com/rpi/pwmRpi.htm>>. Acesso em: 04 fev. 2018.

MAGNOLI, D.; SCALZARETTO, R. **Geografia, espaço, cultura e cidadania.** São Paulo: Moderna, 1998. v. 1.

MATOS, B. G. G. **Controlador e acionador para motor DC em malha fechada.** 2008. Dissertação (Mestrado em Electrónica Industrial e Computadores) – Universidade do Minho, Braga, 2008.

MCROBERTS, M. **Arduino básico.** São Paulo: Novatec, 2011.

MENESES, A. **Tudo sobre LDR:** resistor dependente da luz. Mundo da Engenharia, 2015. Disponível em: <<http://mundoengenharia.com.br/tudo-sobre-ldr-resistor-dependente-da-luz/>>. Acesso em: 04 fev. 2018.

NASCIMENTO, R. L. **Energia solar no Brasil:** situação e perspectivas. Brasília: Consultoria Legislativa da Câmara dos Deputados, 2017.

NEOYAMA. **Micro Motor DC com caixa de Redução:** P/N: AK280/1.1PF5R193SC. Joinville: Neoyama, 2015.

OLIVEIRA FILHO, K. S.; SARAIVA, M. F. O. **Movimento anual do sol e as estações do ano.** Porto Alegre: UFRGS, 2012.

PEREIRA, D. S. **Avaliação de desempenho de protótipo de seguimento solar passivo biaxial.** 2015. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e Ambiente) – Universidade de Lisboa, Lisboa, 2015.

PEREIRA, E. B et al. **Atlas brasileiro de energia solar.** São José dos Campos: INPE, 2006.

PESTANA, L. I. A. **Estudo do recurso solar fotovoltaico:** previsão e dimensionamento de um parque fotovoltaico de média potência. 2017. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2017.

REN21. **Renewables 2017 global status report.** Paris: REN21 Secretariat, 2017.

SILVA, R. M. **Energia solar no Brasil:** dos incentivos aos desafios. Brasília: Núcleo de Estudos e Pesquisas/CONLEG/Senado, fev. 2015 (Texto para Discussão n. 166). Disponível em: <<http://www.senado.leg.br/estudos>>. Acesso em: 05 nov. 2017.

SOLAR CHOICE STAFF. **Solar Trackers.** Solar Choice Blog, 2010. Disponível em: <<https://www.solarchoice.net.au/blog/solar-trackers/>>. Acesso em: 10 dez. 2017.

STINE, W. B.; GEYER, M. **Power from the sun**. Pomona: California State Polytechnic University, 2001.

TEXAS INSTRUMENTS. **L293x quadruple Half-H drivers**. Dallas: Texas Instruments, 2016.

TREVELIN, F. C. **Estudo comparativo entre métodos de rastreamento solar aplicados a sistemas fotovoltaicos**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica com ênfase em Eletrônica) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

APÊNDICE A - Programa Desenvolvido

```
// Sistema de rastreamento do sol
// Pâmela Nicolau

int IN3 = 2; // para comando do motor
int IN4 = 4; // para comando do motor
int FimDeCursoInicio = 6; //Fim de curso 1 (à leste)
int FimDeCursoFinal = 7; Fim de curso 2 (à oeste)
int LDR1 = A0; //- LDR 1 (à leste)
int LDR2 = A1; //LDR 2 (à oeste)

int EstadoFCinicio; // Valor lido do Fim de curso 1
int EstadoFCfinal; // Valor lido do Fim de curso 2
int ValorLido1; //Valor lido do LDR 1
int ValorLido2; //Valor lido do LDR 2
int Luminosidade;
int TempoRotacao;
int Tempo;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  pinMode (IN3, OUTPUT);
  pinMode (FimDeCursoInicio, INPUT);
  pinMode (FimDeCursoFinal, INPUT);
  pinMode (LDR1, INPUT);
  pinMode (LDR2, INPUT);
}

int verificarLuminosidade (int tempo){
  // se tempo = 1 : verifica luminosidade por um período maior
  // se tempo = 0 : verifica luminosidade no tempo de ativação do motor (tempo menor
  possível)
  // retorna 0 : caso não seja necessário rotacionar o motor à oeste
  // retorna 1 : caso seja necessário rotacionar o motor à oeste
  // retorna 2 : caso seja noite
  int Luminosidade;
  int a = 0;
  int b = 0;

  if (tempo == 1) {
    for (int x = 0; x <=10; x++) {
      ValorLido1 = analogRead (LDR1);
      ValorLido2 = analogRead (LDR2);
```

```

if ((ValorLido1 <= 200) && (ValorLido2 <= 200)) {
  a = a+1;
}
if (ValorLido2 > ValorLido1) {
  b = b+1;
}
delay (5000);
}

```

```

}
else {
  for (int x = 0; x <=10; x++) {
    ValorLido1 = analogRead (LDR1);
    ValorLido2 = analogRead (LDR2);

```

```

if ((ValorLido1 <= 200) && (ValorLido2 <= 200)) {
  a = a+1;
}
if (ValorLido2 > ValorLido1) {
  b = b+1;
}
delay (5000); //
}
}

```

```

if (a >= 8) {
  Luminosidade = 2;
}
else if (b >= 8) {
  Luminosidade = 1;
}
else {
  Luminosidade = 0;
}
return Luminosidade;
}

```

```

void loop() {

```

```

  // motor nao acionado
  digitalWrite (IN3, LOW);
  digitalWrite (IN4, LOW);

```

```

  delay (20000); // Temporização 1, 20 segundos

```

```

Tempo = 1;
Luminosidade = verificarLuminosidade (Tempo);
EstadoFCinicio = digitalRead (FimDeCursoInicio);
EstadoFCfinal = digitalRead (FimDeCursoFinal);

if ((Luminosidade == 1)&& (EstadoFCfinal == 0)) {
    Tempo = 0;
    TempoRotacao = verificarLuminosidade (Tempo);

    while ((TempoRotacao == 1)&& (EstadoFCfinal == 0)) {
        digitalWrite (IN3, HIGH);
        digitalWrite (IN4, LOW);
        delay (100); // Tempo de acionamento do motor: 100ms
        digitalWrite (IN3, LOW);
        digitalWrite (IN4, LOW);
        delay (5000); // Temporização 2: 5 segundos
        TempoRotacao = verificarLuminosidade (Tempo);
        EstadoFCfinal = digitalRead (FimDeCursoFinal);

        if (EstadoFCfinal == 1){
            TempoRotacao == 0;
            digitalWrite (IN3, LOW);
            digitalWrite (IN4, LOW);
        }
    }
}

elseif ((Luminosidade == 2)&&(EstadoFCfinal == 0)) {
    if (EstadoFCinicio == 0){
        while (EstadoFCinicio == 0){
            digitalWrite (IN3, LOW);
            digitalWrite (IN4, HIGH);
            delay (100);
            digitalWrite (IN3, LOW);
            digitalWrite (IN4, LOW);
            delay (2000);
            EstadoFCinicio = digitalRead (FimDeCursoInicio);
        }
    }
    if (EstadoFCinicio == 1){
        digitalWrite (IN3, LOW);
        digitalWrite (IN4, LOW);
    }
}
}

```