

INSTITUTO FEDERAL DE MINAS GERAIS
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
Brenno Silva Pinheiro

**ESTUDO COMPARATIVO DE DESEMPENHO ENTRE PROTÓTIPOS DE
SEGUIDORES SOLAR DE BAIXO CUSTO COM UM PAINEL ESTÁTICO NO
MUNICÍPIO DE FORMIGA-MG**

FORMIGA – MG
2017

Brenno Silva Pinheiro

**ESTUDO COMPARATIVO DE DESEMPENHO ENTRE PROTÓTIPOS DE
SEGUIDORES SOLAR DE BAIXO CUSTO COM UM PAINEL ESTÁTICO NO
MUNICÍPIO DE FORMIGA-MG**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Rafael Vinicius Tayette da Nobrega

FORMIGA – MG

2017

Pinheiro, Brenno Silva

621.3 Estudo comparativo de desempenho entre protótipos de seguidores
P654a solar de baixo custo com um painel estático no município de Formiga-
MG / Brenno Silva Pinheiro. -- Formiga : IFMG, 2017.
91p. : il.

Orientador: Prof. Msc. Rafael Vinicius Tayette da Nóbrega
Trabalho de Conclusão de Curso – Instituto Federal de Educação,
Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – *Campus* Formiga.

1. Energia solar. 2. Energia renovável. 3. Painéis fotovoltaicos.
4. Seguidor solar. I. Título.

CDD 621.3

Brenno Silva Pinheiro

**ESTUDO COMPARATIVO DE DESEMPENHO ENTRE PROTÓTIPOS DE
SEGUIDORES SOLAR DE BAIXO CUSTO COM UM PAINEL ESTÁTICO NO
MUNICÍPIO DE FORMIGA-MG**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Engenharia Elétrica do Instituto
Federal de Minas Gerais como requisito para
obtenção do título de bacharel em Engenharia
Elétrica.

Avaliado em: 14 de novembro de 2017.

Nota: _____

BANCA EXAMINADORA

Prof. 01 – MSc. Rafael Vinicius Tayette da Nobrega

Prof. 02 – Dr. Otávio de Souza Martins Gomes

Prof. 03 – Dr. Ulysses Rondina Duarte

Dedico este trabalho a minha família, principalmente aos meus pais e irmã que, com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa da minha vida.

RESUMO

Com o passar dos anos o consumo de energia elétrica tem aumentado de forma continuada, o que eleva, conseqüentemente, a necessidade de produzir energia através de formas alternativas, ou seja, formas renováveis que não agredam tanto os recursos naturais, que um dia podem acabar. Assim, tem-se um cenário favorável na busca de dispositivos capazes de converter outros tipos de energia renovável em energia elétrica. A energia solar é a fonte mais abundante em nosso planeta, e o Brasil encontra-se em posição privilegiada, tendo uma alta taxa de radiação solar ao longo de todo ano. Assim, nesta monografia desenvolveu-se, a construção de dois protótipos de seguidor solar de baixo custo, um com rastreamento dinâmico e outro com algoritmo fixo. Foram avaliadas três configurações de rastreamento solar para cada protótipo, totalizando 6 configurações distintas, possibilitando a comparação de desempenho entre as propostas experimentais e a placa fotovoltaica fixa, utilizada comumente na cidade de Formiga/MG e região. A partir dos resultados obtidos, conclui-se que seguidores de dois eixos e de um eixo horizontal apresentam rendimento superior em até 40 % em relação à placa fotovoltaica fixa enquanto que o de um eixo vertical apresenta desempenho inferior em até 20% em relação à placa fotovoltaica fixa.

Palavras-chave: Energia Solar, energia renovável, painéis fotovoltaicos, seguidor solar.

ABSTRACT

With the passing of the years or consumption of electric energy with continuous increase, which consequently increases the need to produce energy through alternative forms, that is, renewable forms that do not attack so much natural resources. Thus, there is a favorable scenario in the search for devices capable of converting other types of renewable energy into electric energy. Solar energy is a more abundant source on our planet, and Brazil is in a privileged position, having a high rate of solar radiation throughout the year. Thus, this monograph was developed, a construction of two low-cost solar tracker prototypes, one with dynamic tracking and the other with fixed algorithm. Three solar development tests were evaluated for each prototype, totaling 6 different products, allowing a comparison of performance between experimental proposals and a fixed photovoltaic plate, commonly used in the city of Formiga / MG and region. From the obtained results, it can be concluded that followers of two axes and of a horizontal axis between superior yield in up to 40% in relation to the fixed photovoltaic plate while of a vertical axis presents inferior performance in up to 20% in relation to the photovoltaic plate fixed.

Keywords: Solar energy, renewable energy, photovoltaic panels, solar tracker.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação da matriz elétrica brasileira em 2016.....	14
Figura 2 - Radiação solar global diária - média anual típica (Wh/m ²).	15
Figura 3 - Top 10 países com energia solar instalada.....	19
Figura 4 - Usina fotovoltaica instalada no Mineirão.	21
Figura 5 - Esquema de uma usina de microgeração residencial com medidor bidirecional.	23
Figura 6 - Modelo de bandas dos três tipos de materiais: condutor, semicondutor e isolante.....	25
Figura 7 - Ligações covalentes de um semicondutor intrínseco.	26
Figura 8 - Lacunas em um semicondutor extrínseco tipo P.....	27
Figura 9 - Elétrons livres em um semicondutor extrínseco tipo N.....	27
Figura 10 - Ilustração do efeito fotovoltaico.....	28
Figura 11 - Esquema estrutural da célula fotovoltaica. Figura adaptada.....	29
Figura 12 - Representação esquemática da confecção do módulo fotovoltaico utilizando células fotovoltaicas.	33
Figura 13 - Representação esquemática de um seguidor solar automatizado em funcionamento.	34
Figura 14 - Seguidor solar de eixo único.	35
Figura 15 - Seguidor solar de eixo duplo.	35
Figura 16 - Representação esquemática do movimento da Terra em torno do Sol.....	37
Figura 17 - Definições do ângulo azimutal solar e do ângulo de altitude solar. Figura adaptada.....	37
Figura 18 - Linha da trajetória solar em 01 de junho no IFMG Campus: Formiga.	38
Figura 19 - Ângulo de declinação em função da data Juliana.....	39
Figura 20 - Plataforma Arduino UNO.	43
Figura 21 - Ligação do RTC com o Arduino.	44
Figura 22 - Sensor de luminosidade, LDR.....	45
Figura 23 - Relação da intensidade luminosa do LDR em função da resistência.	45
Figura 24 - Servo-motor.....	46
Figura 25 - Estrutura interna dos servo-motores.	47
Figura 26 - Peça de acoplamento do painel e sensores ao motor vertical.	48
Figura 27 - Suportes para LDR's com os furos de passagem.....	49
Figura 28 - Estrutura final do protótipo de seguidor solar por rastreamento dinâmico.	50
Figura 29 - Circuito divisor de tensão desenvolvido, utilizando um LDR e um resistor de 10 k Ω	51
Figura 30 - Estrutura final do protótipo de seguidor solar por algoritmo fixo de controle.	52
Figura 31 - Testes de campo dos seguidores solar.	55
Figura 32 – Gráfico da potência gerada pelo seguidor Solar 2 com eixos e algoritmo fixo em comparação com a placa fotovoltaica fixa ao longo do dia 18/10/2017.	60

Figura 33 - Gráfico da potência gerada pelo seguidor Solar 2 com eixos e algoritmo fixo em comparação com a placa fotovoltaica fixa ao longo do dia 19/10/2017.	61
Figura 34 - Gráfico da potência gerada pelo seguidor Solar 2 com eixos e algoritmo fixo em comparação com a placa fotovoltaica fixa ao longo do dia 20/10/2017.	61
Figura 35 – Gráfico da potência gerada pelo seguidor solar 2 eixos e rastreamento dinâmico em comparação com a placa fotovoltaica fixa ao longo do dia 18/10/2017.	64
Figura 36 – Gráfico da potência gerada pelo seguidor solar 2 eixos e rastreamento dinâmico em comparação com a placa fotovoltaica fixa ao longo do dia 19/10/2017.	65
Figura 37 – Gráfico da potência gerada pelo seguidor solar 2 eixos e rastreamento dinâmico em comparação com a placa fotovoltaica fixa ao longo do dia 20/10/2017.	65
Figura 38 – Gráfico da potência gerada pelo seguidor solar 1 eixo horizontal e algoritmo fixo em comparação com a placa fotovoltaica fixa ao longo do dia 18/10/2017.	68
Figura 39 – Gráfico da potência gerada pelo seguidor solar 1 eixo horizontal e algoritmo fixo em comparação com a placa fotovoltaica fixa ao longo do dia 19/10/2017.	69
Figura 40 – Gráfico da potência gerada pelo seguidor solar 1 eixo horizontal e algoritmo fixo em comparação com a placa fotovoltaica fixa ao longo do dia 20/10/2017.	69
Figura 41 – Gráfico da potência gerada pelo seguidor solar 1 eixo horizontal e rastreamento dinâmico em comparação com a placa fotovoltaica fixa ao longo do dia 18/10/2017.....	72
Figura 42 – Gráfico da potência gerada pelo seguidor solar 1 eixo horizontal e rastreamento dinâmico em comparação com a placa fotovoltaica fixa ao longo do dia 19/10/2017.....	73
Figura 43 – Gráfico da potência gerada pelo seguidor solar 1 eixo horizontal e rastreamento dinâmico em comparação com a placa fotovoltaica fixa ao longo do dia 20/10/2017.....	73
Figura 44 – Gráfico da potência gerada pelo seguidor solar 1 eixo horizontal e algoritmo fixo em comparação com a placa fotovoltaica fixa ao longo do dia 18/10/2017.	76
Figura 45 – Gráfico da potência gerada pelo seguidor solar 1 eixo horizontal e algoritmo fixo em comparação com a placa fotovoltaica fixa ao longo do dia 19/10/2017.	77
Figura 46 – Gráfico da potência gerada pelo seguidor solar 1 eixo horizontal e algoritmo fixo em comparação com a placa fotovoltaica fixa ao longo do dia 20/10/2017.	77
Figura 47 – Gráfico da potência gerada pelo seguidor solar 1 eixo vertical e rastreamento dinâmico em comparação com a placa fotovoltaica fixa ao longo do dia 18/10/2017.....	80
Figura 48 – Gráfico da potência gerada pelo seguidor solar 1 eixo vertical e rastreamento dinâmico em comparação com a placa fotovoltaica fixa ao longo do dia 19/10/2017.....	81
Figura 49 – Gráfico da potência gerada pelo seguidor solar 1 eixo vertical e rastreamento dinâmico em comparação com a placa fotovoltaica fixa ao longo do dia 20/10/2017.....	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação da eficiência das diversas tecnologias de células fotovoltaicas.	32
Tabela 2 - Dados painel fixo em 18/10/2017.	56
Tabela 3 - Dados painel fixo em 19/10/2017.	56
Tabela 4 - Dados painel fixo em 20/10/2017.	57
Tabela 5 - Dados seguidor solar 2 eixos algoritmo fixo em 18/10/2017.	58
Tabela 6 - Dados seguidor solar 2 eixos algoritmo fixo em 19/10/2017.	58
Tabela 7 - Dados seguidor solar 2 eixos algoritmo fixo em 20/10/2017.	59
Tabela 8 - Dados seguidor solar 2 eixos rastreamento dinâmico em 18/10/2017.	62
Tabela 9 - Dados seguidor solar 2 eixos rastreamento dinâmico em 19/10/2017.	62
Tabela 10 - Dados seguidor solar 2 eixos rastreamento dinâmico em 20/10/2017.	63
Tabela 11 - Dados seguidor solar 1 eixo horizontal algoritmo fixo em 18/10/2017.	66
Tabela 12 - Dados seguidor solar 1 eixo horizontal algoritmo fixo em 19/10/2017.	66
Tabela 13 - Dados seguidor solar 1 eixo horizontal algoritmo fixo em 20/10/2017.	67
Tabela 14 - Dados seguidor solar 1 eixo horizontal rastreamento dinâmico em 18/10/2017.	70
Tabela 15 - Dados seguidor solar 1 eixo horizontal rastreamento dinâmico em 19/10/2017.	70
Tabela 16 - Dados seguidor solar 1 eixo horizontal rastreamento dinâmico em 20/10/2017.	71
Tabela 17 - Dados seguidor solar 1 eixo vertical algoritmo fixo em 18/10/2017.	74
Tabela 18 - Dados seguidor solar 1 eixo vertical algoritmo fixo em 19/10/2017.	74
Tabela 19 - Dados seguidor solar 1 eixo vertical algoritmo fixo em 20/10/2017.	75
Tabela 20 - Dados seguidor solar 1 eixo vertical e rastreamento dinâmico em 18/10/2017.	78
Tabela 21 - Dados seguidor solar 1 eixo vertical e rastreamento dinâmico em 19/10/2017.	78
Tabela 22 Dados seguidor solar 1 eixo vertical e rastreamento dinâmico em 20/10/2017.	79
Tabela 23 - Rendimentos dos diferentes tipos de seguidores em relação a placa fixa.	82
Tabela 24 - Orçamento e descritivo dos gastos estimados com o protótipo de rastreamento dinâmico.	83
Tabela 25 - Orçamento e descritivo dos gastos com o protótipo de algoritmo fixo.	84

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 Justificativa.....	13
1.2 Objetivos geral	16
1.3 Objetivo específico	16
1.4 Estrutura do Trabalho.....	17
1.5 Trabalhos Publicados	17
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	18
2.1 Breve Histórico da Energia Solar	18
2.2 Energia Solar Fotovoltaica no Brasil	20
2.3 Célula Fotovoltaica	24
2.3.1 Materiais Semicondutores.....	25
2.3.2 Efeito Fotovoltaico.....	28
2.3.3 Funcionamento da Célula Fotovoltaica	29
2.3.4 Módulo Fotovoltaico	32
2.4 Seguidor Solar	33
2.5 Descrição e Cálculo da Trajetória Solar.....	36
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	42
3.1 Microcontrolador	42
3.1.1 Arduino	42
3.2 Sensores.....	45
3.3 Servo-Motor	46
3.4 Confeção dos protótipos de seguidor solar.....	47
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	54
4.1 Painel fixo	56
4.2 Seguidor solar de dois eixos com algoritmo fixo de controle	58

4.3 Seguidor solar de dois eixos com rastreamento dinâmico.....	62
4.4 Seguidor solar de um eixo horizontal com algoritmo fixo.....	66
4.5 Seguidor solar de um eixo horizontal com rastreamento dinâmico.....	70
4.6 Seguidor solar de um eixo vertical com algoritmo fixo.....	74
4.7 Seguidor solar de um eixo vertical com rastreamento dinâmico.....	78
5 CONCLUSÕES	85
6 TRABALHOS FUTUROS	86

1 INTRODUÇÃO

A energia solar fotovoltaica é uma das fontes de energia cujo uso mais cresce em todo o mundo, ela é uma forma promissora de geração de energia elétrica, pois esta forma de geração trata-se da captação da radiação solar para geração direta de corrente elétrica por meio do efeito fotovoltaico. Ela utiliza células fotovoltaicas para captar a radiação incidente em uma determinada área (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

Muitos países estão investindo cada vez mais para implantação da energia solar fotovoltaica em suas matrizes energéticas, uma vez que esta é uma forma de geração considerada completamente limpa, por não liberar nenhum tipo de resíduo no meio ambiente, além de depender apenas da radiação solar que é abundante em nosso planeta (COGEN, 2012).

Esta forma de geração pode ser utilizada de duas maneiras, geração distribuída (pequenas usinas destinadas a atender a demanda local, desconectadas da rede – sistema *off-grid*) que acumula a energia gerada em baterias (para isto é necessário utilizar um controlador de carga, que potencializa a capacidade de geração do módulo, fazendo com que armazene a maior quantidade de energia) ou conectada diretamente à rede (sistema *on-grid*), neste caso se utiliza um inversor de frequência que torna possível a ligação da corrente contínua gerada pelo módulo à rede alternada (VILLALVA; GAZOLI, 2012). No Brasil, a energia solar fotovoltaica vem sendo utilizada principalmente na forma de geração distribuída, pois se tornou a opção mais viável para atender conjuntos populacionais isolados de grandes distâncias da rede, porém possui uma participação tímida na matriz energética. Entretanto, esta modalidade de geração de energia elétrica já foi notada, o que faz com que cada vez mais possa ser percebida em projetos de estudos e de implantação da mesma na matriz energética brasileira, além das normas e regulamentações técnicas que já estão vigorando, para que as pessoas interessadas possam utilizar seus painéis e a rede elétrica nos momentos em que a geração não for suficiente.

Ultimamente tem-se discutido bastante a respeito de métodos para melhorar a eficiência desta forma de geração, uma vez que ela possui uma eficiência média de 10 a 15% (VILLALVA; GAZOLI, 2012). Uma forma para que este aumento ocorra seria a fabricação de placas mais eficientes através do aprimoramento das que já existem no mercado, porém esta etapa envolve o emprego de tecnologia de ponta, sendo

assim, inviável economicamente, outra forma seria a otimização da captação de radiação pela placa. A segunda forma é a proposta principal desta monografia.

Como a geração de energia elétrica pela placa depende diretamente da captação da radiação solar, nesta monografia é apresentado a construção de um seguidor solar automatizado (dispositivo eletromecânico controlado por microcontroladores, que se orienta através de sensores ou equações solares e garante que a placa esteja sempre voltada perpendicularmente com o Sol a fim de garantir que as placas captem o máximo de radiação durante o período em que esta estiver disponível).

Na próxima seção encontra-se a descrição da caracterização do problema em que esta monografia se baseia.

1.1 Justificativa

Durante muitos anos, os recursos fósseis e hídricos proporcionaram o desenvolvimento da civilização e da economia mundial. Em consonância ao restante do mundo, o Brasil também se apoiou nessas fontes energéticas para realizar o desenvolvimento de atividades industriais, agrícolas, de serviços e da própria sociedade. Entretanto, vive-se hoje uma crise no abastecimento energético, fruto de diversos problemas no âmbito geopolítico, econômico e ambiental, principalmente, pela comercialização de recursos que possuem caráter não renovável (PENSAMENTO VERDE, 2014).

Outro grande problema é a extensão do território brasileiro, que possui um sistema de transmissão e distribuição de energia elétrica bastante complexo. As grandes usinas hidrelétricas geradoras de energia elétrica encontram-se afastadas dos grandes centros urbanos, culminando assim, em grandes investimentos em transmissão e distribuição da energia elétrica. E por muitas vezes, este sistema convencional de distribuição não atende algumas localidades, com eficiência, confiabilidade e custo acessível (ALVES *et al.*, 2012). A construção destas usinas hidrelétricas acarreta em outros problemas no âmbito ambiental e social tais como o alagamento de grandes áreas férteis, o deslocamento de pessoas e principalmente perdas consideráveis no bioma de algumas regiões brasileiras (KRYBUS *et al.*, 2011). A Figura 1 apresenta a situação atual da matriz energética brasileira.

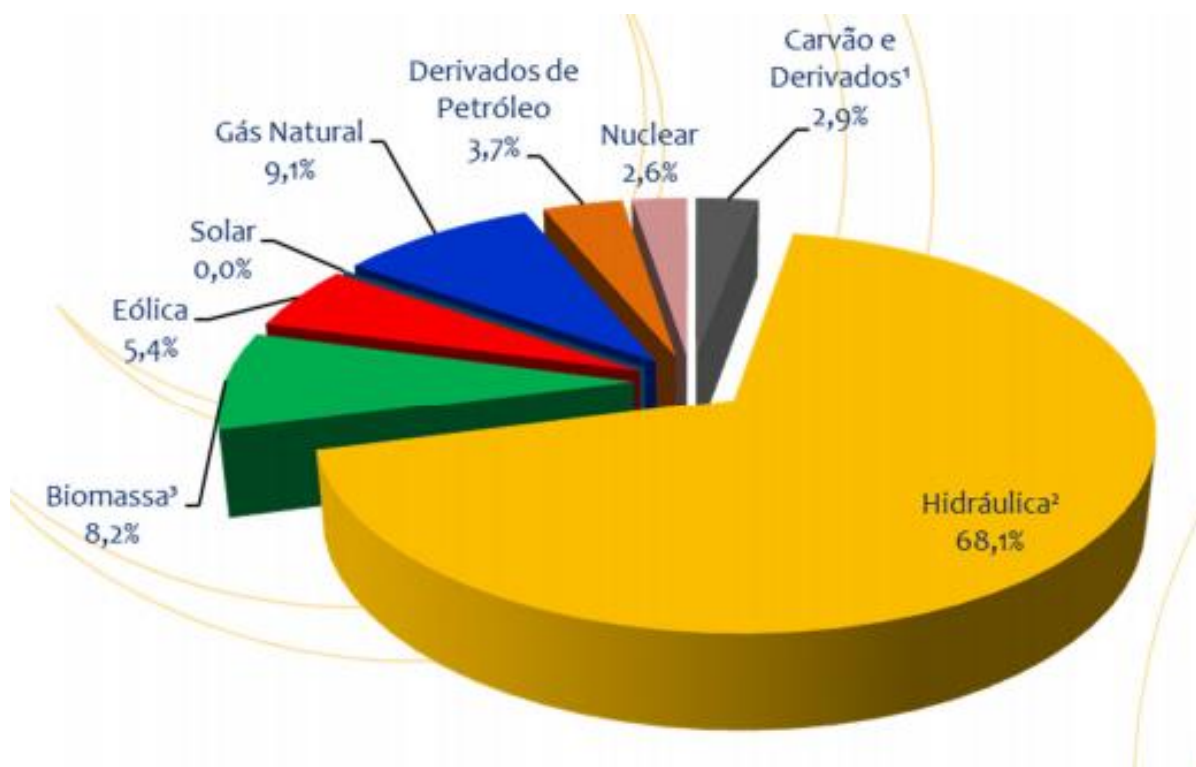


Figura 1 - Representação da matriz elétrica brasileira em 2016.

Fonte: Figura extraída de (EPE, 2017).

No Brasil, a base da matriz energética de energia elétrica de acordo com o Balanço Energético Nacional de 2017 – ano base 2016 (EPE, 2017) é a energia hidrelétrica, que representa aproximadamente 68,1% (incluindo as importações) do total de energia elétrica produzida no país, como pode ser visualizada na Figura 1. Esta é uma fonte de caráter renovável, já que para a geração de energia elétrica não é necessário qualquer tipo de queima de combustível (HINRICHS *et al.*, 2010). Com isso, mantendo a participação de renováveis na matriz elétrica brasileira no patamar de 43,5%, muito acima da média mundial, de 13,5 % conforme a Agência Internacional de Energia (EPE, 2017).

Entretanto, com a crise energética de 2001, causada pelos baixos níveis de água nos reservatórios das usinas hidrelétricas acarretando uma transformação no setor elétrico brasileiro, aumentou-se significativamente a preocupação com a dependência do país em relação a essa matriz energética. Diante desse fato, a obtenção de energia oriunda de outras fontes, inclusive a energia solar, é fundamental para evitar futuros colapsos de energia (CASTRO *et al.*, 2009).

A energia solar é a fonte de energia mais abundante em nosso planeta, o fluxo de energia solar incidente na superfície orientada normal aos raios solares, tem um valor médio de 1353 W/m^2 (HODGE, 2011). O Brasil recebe elevados índices de radiação solar praticamente durante todos os meses do ano, vide Figura 2, (ANEEL, 2017).

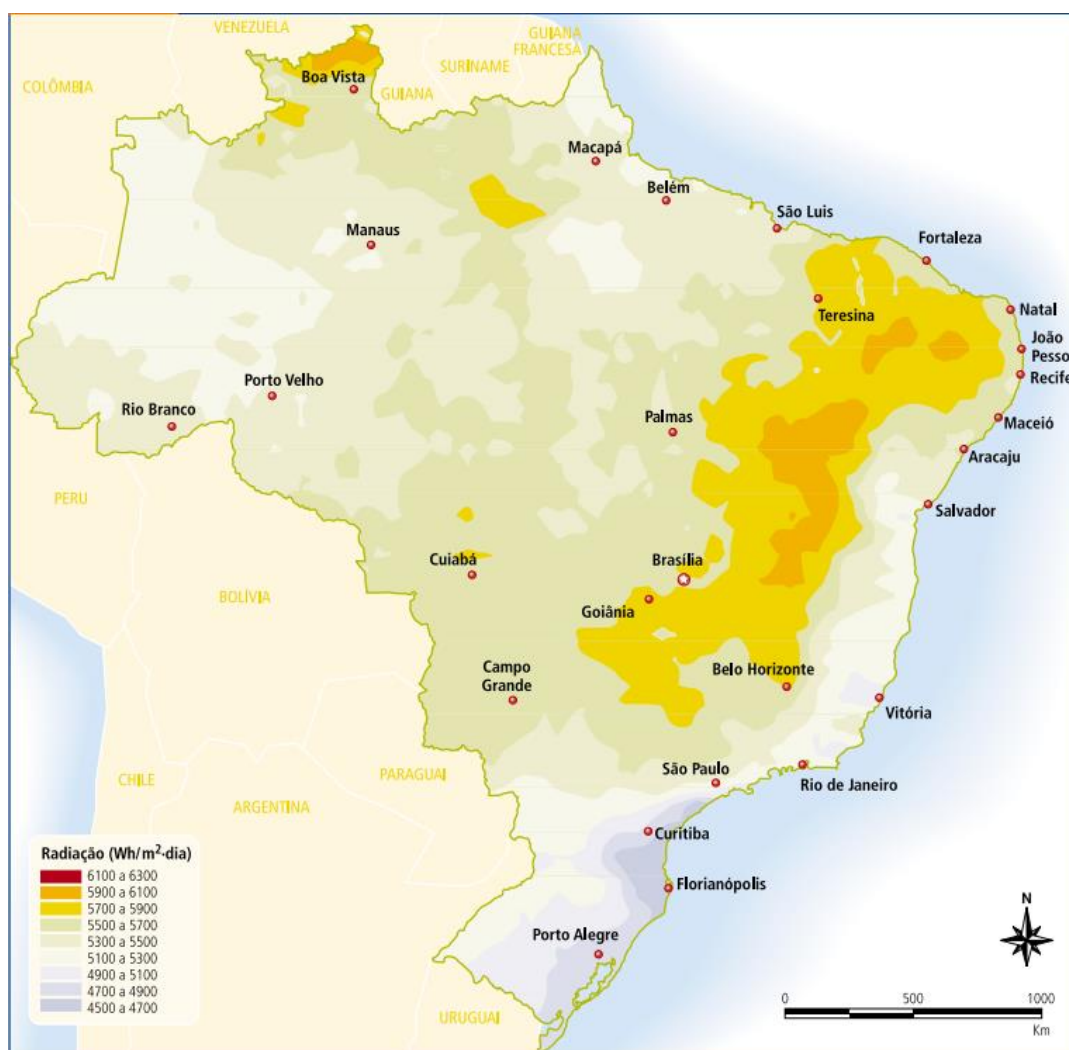


Figura 2 - Radiação solar global diária - média anual típica (Wh/m²).

Fonte: Figura extraída de (ANEEL, 2017).

Devido todo este potencial energético brasileiro a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL publicou em 17 de abril de 2012 a Resolução Normativa nº 482 (ANEEL, 2012) que estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica e o sistema

de compensação de energia elétrica. A mais recente modificação dessa resolução normativa é a de nº 687, publicada em 2015 (ANEEL, 2015).

Assim, tem-se um cenário favorável na busca de dispositivos capazes de converter outros tipos de energia elétrica, principalmente a conversão de energia solar em energia elétrica. Na seção subsequente apresenta-se os objetivos do trabalho de conclusão de curso desenvolvido.

1.2 Objetivos geral

Esta monografia tem como objetivo principal o desenvolvimento de dois protótipos de seguidor solar de baixo custo, um baseado em rastreamento dinâmico e o outro em equacionamento da trajetória solar (algoritmo de controle fixo), realizando também um estudo de rendimento destes protótipos em relação ao painel fotovoltaico estático na cidade de Formiga/MG.

1.3 Objetivo específico

Como objetivos específicos podem-se listar os seguintes:

- Realizar um levantamento bibliográfico para familiarizar com os conceitos relacionados à energia fotovoltaica;
- Realizar levantamento técnico dos conceitos relacionados as células fotovoltaicas;
- Realizar um estudo para escolher o microcontrolador e os sensores a serem utilizados no desenvolvimento do protótipo;
- Realizar um estudo dos sistemas de posicionamento disponíveis na literatura;
- Desenvolver os algoritmos a serem implementados no protótipo;
- Implementar o sistema de controle do seguidor solar;
- Implementar os protótipos de seguidor solar;
- Realizar um estudo comparativo de desempenho dos protótipos do seguidor solar de baixo custo com um painel estático no município de Formiga/MG.

1.4 Estrutura do Trabalho

Esta monografia de conclusão de curso é organizada em seis capítulos, sendo que no Capítulo 1 tem-se a introdução do trabalho, contextualizando a problemática do trabalho, seus objetivos e trabalhos publicados. No Capítulo 2 apresenta-se os conceitos teóricos utilizados no desenvolvimento do protótipo de seguidor solar de baixo custo. No Capítulo 3 são expostos os materiais e a metodologia utilizada no desenvolvimento do protótipo. Os resultados e as discussões do estudo comparativo do desempenho entre o protótipo de seguidor solar e o painel fotovoltaico estático são apresentados no Capítulo 4. No capítulo 5 são apresentadas as considerações finais da monografia. E por fim, no Capítulo 7 são apresentadas sugestões para a continuidade do trabalho.

1.5 Trabalhos Publicados

Nesta parte do trabalho são apresentadas as publicações relacionadas ao desenvolvimento do mesmo.

Artigo completo publicado em periódico

BRANDAO, R. R.; CAETANO, I. F.; PINHEIRO, B. S.; GOMES, O. S. M.; NOBREGA, R. V. T. **Desenvolvimento de um seguidor solar automatizado de baixo custo**. XII Conferência de estudos em engenharia elétrica (CEEL), 9, p. 1-6, 2014.

Apresentação de trabalho

PINHEIRO, B. S.; BRANDAO, R. R.; PINTO, P. A.; NOBREGA, R. V. T. **Estudo e implementação de sistemas seguidores solares**. In: VI Congresso Brasileiro de Energia Solar (CBENS), Belo Horizonte, 2016.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo é apresentado um levantamento bibliográfico com o intuito de compreender o estado da arte dos conceitos relacionados à energia fotovoltaica.

2.1 Breve Histórico da Energia Solar

A energia solar fotovoltaica é uma modalidade de energia elétrica utilizada em larga escala em países como China, Japão, Alemanha e Estados Unidos (PORTAL SOLAR, 2017). A sua evolução tem se dado de maneira bastante rápida, devido à redução acentuada de seu custo de produção ao longo dos últimos 20 anos, tornando a sua aplicação viável até mesmo em locais que já contam com energia elétrica convencional. Outro fator que contribui também é devido seu caráter ecologicamente correto, ou seja, uma fonte de energia totalmente renovável.

A primeira célula solar foi desenvolvida em Março de 1953, quando Calvin Fuller, um químico dos Bell Laboratories (Bell Labs), desenvolveu um processo de difusão para introduzir impurezas em cristais de silício, de modo a controlar as suas propriedades elétricas (um processo chamado “dopagem”). Ele produziu uma barra de silício dopado com uma pequena concentração de gálio, que o torna condutor, sendo as cargas móveis positivas (“tipo p”). Seguindo as instruções de Fuller, o físico Gerald Pearson, mergulhou esta barra de silício dopado num banho quente de lítio, criando assim na superfície da barra uma zona com excesso de elétrons livres, portadores com carga negativa (“tipo n”). Na região onde o silício “tipo n” fica em contato com o silício “tipo p”, surge um campo elétrico permanente (FACULDADE DE CIÊNCIAS DA UNIVERSIDADE DE LISBOA, 2006).

Ao caracterizar eletricamente esta amostra, Pearson verificou que produzia uma corrente elétrica quando a amostra era exposta à luz. Pearson tinha acabado de fazer a primeira célula solar de silício (FACULDADE DE CIÊNCIAS DA UNIVERSIDADE DE LISBOA, 2006).

O grande esforço dos cientistas nas décadas de 1960 e 1970 foi fazer da célula solar fotovoltaica um elemento com aplicação comercial. O custo de 1 Wp (Watt-pico) de célula solar alcançava na época valores superiores a US\$ 100, o que inviabilizava sua utilização em larga escala.

As aplicações nesta época estavam voltadas para o campo espacial, como exemplo, a energização de satélites espaciais. Os primeiros anos da década de 1970 foram marcados pela ameaça de colapso mundial provocada pelas crises do petróleo. Esta crise anunciada forçou grandes empresas a investirem fortemente no desenvolvimento de energias alternativas, no qual a energia solar fotovoltaica foi uma das modalidades de energia que mais recebeu investimentos. Com isso, teve-se uma redução no preço do Wp, que antes era de US\$ 100 na década de 1950 para menos de US\$ 20 no final da década de 1970 (DIAS, 1999).

A partir da década de 1980 inúmeras aplicações foram sendo desenvolvidas com a utilização de energia solar fotovoltaica. A possibilidade de levar energia para locais afastados, de localização remota, permitiu aos usuários, operar equipamentos que até então só poderiam ser instalados em locais com energia convencional. Assim, a comunidade técnica começou a utilizar a energia solar fotovoltaica em projetos de comunicação, bombeamento de água, eletrificação rural, sinalização marítima e aérea, dentre outros (DIAS, 1999).

Já no início da década de 1990, devido a produção em larga escala dos módulos fotovoltaicos, o preço de 1 Wp alcançava valores da ordem de US\$ 6 (DIAS, 1999). Atualmente, o valor de 1 Wp gira em torno de R\$ 8,58 no Brasil, o que torna ainda mais atrativo investir no desenvolvimento desta forma de geração de energia (AMÉRICA DO SOL, 2017).

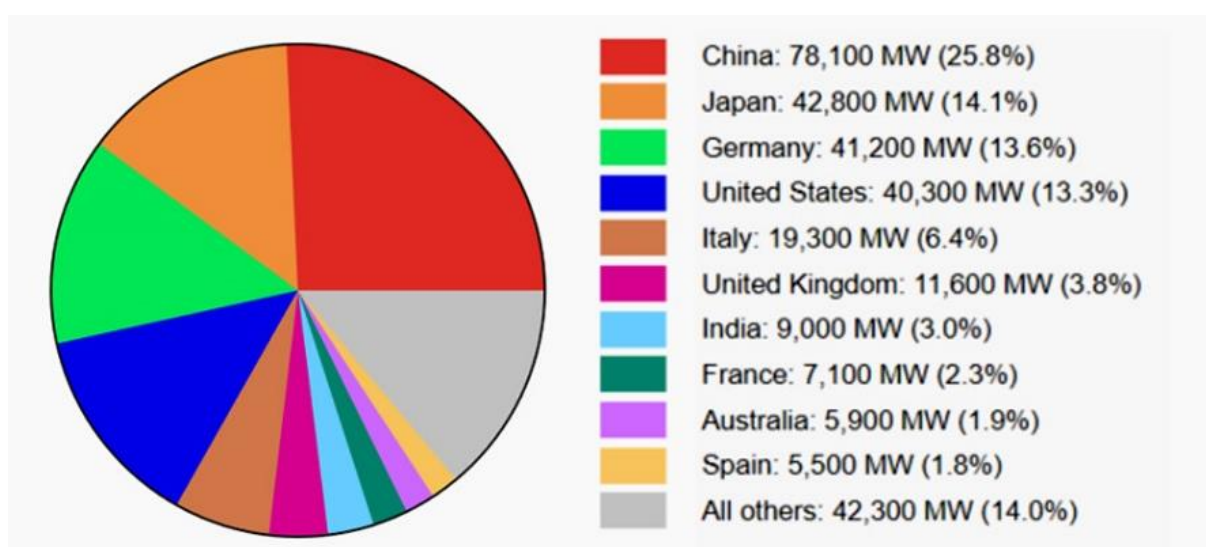


Figura 3 - Top 10 países com energia solar instalada.

Fonte: Figura extraída de (PORTAL SOLAR, 2017).

Dessa forma, alguns países já contam com uma grande participação da energia solar fotovoltaica em suas matrizes energéticas, a Figura 3 mostra os 10 países com maior produção de energia fotovoltaica no mundo (PORTAL SOLAR, 2017).

Na próxima seção é apresentado a contextualização da energia solar fotovoltaica no Brasil.

2.2 Energia Solar Fotovoltaica no Brasil

A energia fotovoltaica é uma importante opção tecnológica na transição para um fornecimento de energia com aumento da participação de fontes renováveis em nível global, pois o recurso solar é abundante e bem distribuído ao longo de nosso planeta (COGEN, 2012). Para que esta seja implantada é necessário que os estudos e os projetos aconteçam de forma coordenada, de maneira que uns ajudem os outros a evoluir.

Na Europa ocorrem projetos de cooperação mútua entre os países, onde os países investem juntos para superar os problemas encontrados (na implantação, na conexão com a rede, nos equipamentos utilizados entre outros), para que um país não passe pelo mesmo problema que outro já tenha superado. Um destes projetos é o *PV Legal* que iniciou em julho de 2009 e realizou seus trabalhos durante 30 meses alcançando seus objetivos que foram: pesquisar os regulamentos existentes, identificar barreiras e sugerir soluções para reduzi-las a fim de desenvolver um sistema fotovoltaico menos complicado e mais eficiente (PV LEGAL, 2009), o projeto abrangeu 13 países e foi substituído por outro projeto (*PV Grid*) que manteve os mesmos objetivos do anterior, para continuar os trabalhos, porém abrangendo 16 países (PV GRID, 2012).

No Brasil, os projetos de implantação também acontecem e mostram que o nosso país tem investido no sentido de aumentar a experiência e a potência instalada em usinas fotovoltaicas, exemplos são: a usina de Tauá no Ceará, que foi a primeira usina fotovoltaica da América latina, e a usina do Mineirão (estádio Governador Magalhães Pinto) que possui 1,42 MW de potência instalada (cerca de 6000 módulos) e conectada à rede da CEMIG (distribuidora de energia local) (COPA 2014, 2013), pode ser visto na Figura 4. No projeto Mineirão solar, que foi realizado por uma parceria entre governo brasileiro, a distribuidora local (CEMIG) e o governo alemão (que ofereceu as linhas de crédito local para financiamento dos custos), toda a energia

gerada pelos 6000 módulos instalados, será depositada diretamente na rede da CEMIG, que devolverá a energia para o estádio nos dias de jogos noturnos, que é quando o estádio realmente demanda energia, o sistema de tarifação é o acordo firmado entre a administradora do estádio e a distribuidora local (CEMIG, 2013).

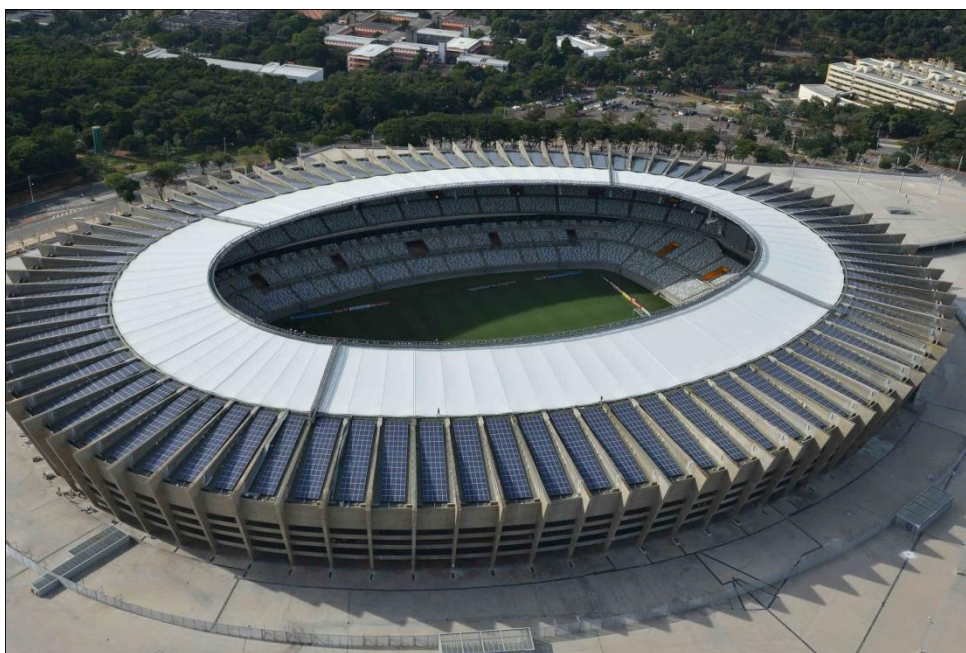


Figura 4 - Usina fotovoltaica instalada no Mineirão.

Fonte: Figura extraída de (COPA 2014, 2013).

Até o programa do governo “Luz para todos”, que teve início em 2003 e já atendeu cerca de 15,9 milhões de moradores rurais, chegou a fornecer sistemas fotovoltaicos autônomos (desconectados da rede) a populações e comunidades que vivem em locais isolados, onde o custo para acesso à rede elétrica seria muito alto (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2017).

No âmbito governamental, deve-se também destacar o Plano Brasil Maior, lançado pelo Governo Federal em agosto de 2011, visando orientar políticas de desenvolvimento industrial que melhorem as condições competitivas do País. Nesse Plano, a dimensão estruturante das diretrizes setoriais contempla a Cadeia de Suprimentos em Energia, na qual se prevê o desenvolvimento de fontes renováveis, abrangendo a energia eólica e solar (EPE, 2012).

No país, até recentemente, a geração solar conectada à rede elétrica de distribuição não possuía o adequado respaldo regulatório. Em vista disso, a ANEEL

efetuou ações e estudou propostas para redução das barreiras de acesso aos sistemas de distribuição por parte dos pequenos geradores. Como resultado, foi publicada a Resolução Normativa nº 482, de 17/04/2012 (ANEEL, 2012), que em 2015 recebeu uma nova versão a Resolução Normativa nº 687, de 24/11/2015 (ANEEL, 2015). Essa resolução estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica. Ela visa a reduzir as barreiras regulatórias existentes para conexão de geração de pequeno porte disponível na rede de distribuição, a partir de fontes de energia incentivadas.

De acordo com as definições do Art. 2º desta Resolução, tem-se:

I – microgeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 75 kW e que utilize cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, ou fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras (ANEEL, 2015).

II – minigeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 3 MW para fontes hídricas ou menor ou igual a 5 MW para cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, ou para as demais fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras (ANEEL, 2015).

III – sistema de compensação de energia elétrica: sistema no qual a energia ativa injetada por unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída é cedida, por meio de empréstimo gratuito, à distribuidora local e posteriormente compensada com o consumo de energia elétrica ativa (ANEEL, 2015).

Desse modo, tem-se a regulamentação da atividade de mini e microgeração de energia elétrica para a Unidade Consumidora no Brasil, onde a quantidade de energia elétrica gerada por fontes alternativas de energia, inclusive a energia solar, poderá ser descontada do consumo de energia elétrica ativa da unidade, na forma de créditos

gerada por meio do sistema de compensação de energia elétrica que expirarão em 36 meses após a data de faturamento.

Simultaneamente, foi publicada pela ANEEL a Resolução Normativa nº 481, de 17/04/2012, pela qual ficou estipulado, para a fonte solar com potência injetada nos sistemas de transmissão ou distribuição menor ou igual a 30 MW, o desconto de 80% (oitenta por cento) para os empreendimentos que entrarem em operação comercial até 31/12/2017, aplicável nos 10 (dez) primeiros anos de operação da usina, nas tarifas de uso dos sistemas elétricos de transmissão e de distribuição – TUST e TUSD, sendo esse desconto reduzido para 50% (cinquenta por cento) após o décimo ano de operação da usina.

Dentro deste contexto, a utilização dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede vem crescendo muito, pois estes auxiliam na redução do pico de demanda, diminuindo a dependência das fontes convencionais de energia. Além disto, dado o caráter complementar da geração hidroelétrica e solar, a geração solar fotovoltaica em grande escala poderia contribuir significativamente para melhor balancear a grande dependência do setor elétrico brasileiro em uma fonte geradora dominante e sazonal como é a geração hidrelétrica. Neste aspecto, a energia solar fotovoltaica revela-se uma fonte promissora, tanto para as áreas distantes e ainda não eletrificadas, como também para os grandes centros urbanos, onde demandas elevam as curvas de carga, apresentando uma excelente sincronicidade com a geração solar (FRANCO, 2013).

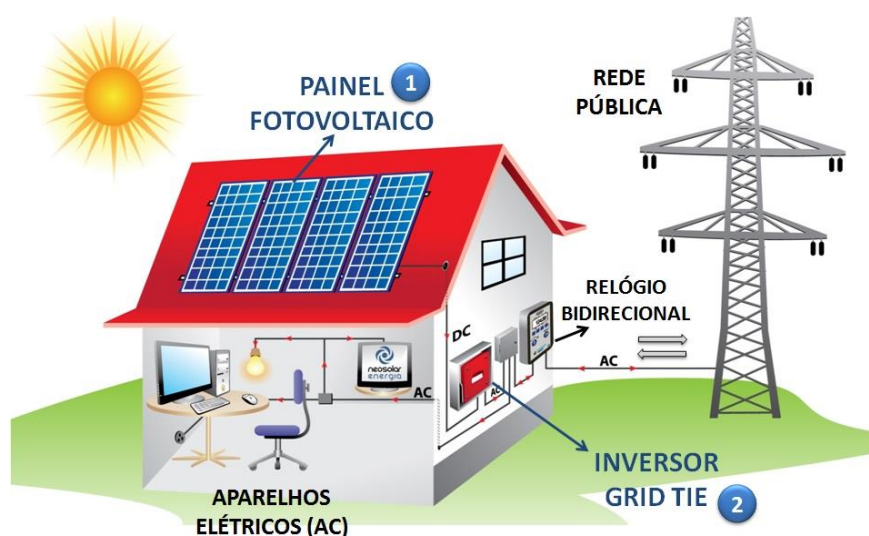


Figura 5 - Esquema de uma usina de microgeração residencial com medidor bidirecional.

Fonte: Figura extraída de (COGEN, 2012).

Dessa forma, no Brasil adotou-se o sistema de tarifação conhecido como *Net Metering*, que representa um medidor eletrônico que registra a energia que a residência consome da rede elétrica pública e a energia que a residência produz e eventualmente exporta para a rede elétrica. O mesmo sofrerá algumas adaptações para funcionar conforme a regulamentação vigente. Tal implantação é necessária para que a microgeração fotovoltaica residencial seja viável (COGEN, 2012) (VILLALVA; GAZOLI, 2012), o esquema de utilização do painel conectado à rede pode ser visto na Figura 5.

Além de todos os benefícios da energia solar fotovoltaica, o Brasil possui uma das maiores reservas de silício do mundo. Isto faz com que o país seja um local privilegiado para desenvolver uma indústria local de produção de células fotovoltaicas gerando empregos e retornos em impostos pagos. Para isso, seria preciso investir em pesquisas para desenvolver um conhecimento de purificação do silício até o chamado “grau solar”, que é superior ao do silício empregado na siderurgia, o que seria interessante para inserção de nosso país no mercado fotovoltaico mundial (COGEN, 2012).

Ainda assim, o Brasil possui pouca potência instalada, cerca de 311 MWp em outubro de 2017 (ANEEL, 2017). Com isso, tem-se um cenário favorável ao desenvolvimento de qualquer sistema de geração de energia elétrica através da energia solar. Na próxima seção são apresentados os conceitos pertinentes a célula fotovoltaica, bem como o seu processo de funcionamento na conversão da energia solar em energia elétrica.

2.3 Célula Fotovoltaica

As células fotovoltaicas são compostas de materiais semicondutores, e para que se entenda o funcionamento destas é fundamental saber o que são e como se comportam os semicondutores. Nas subseções seguintes são expostas algumas características importantes deste material, bem como o funcionamento da célula fotovoltaica.

2.3.1 Materiais Semicondutores

Primeiramente é importante lembrar-se dos três tipos de materiais, os condutores que são materiais que possuem predisposição para conduzir corrente elétrica, os isolantes que possuem predisposição a não conduzir (isolar) a corrente e os semicondutores que são materiais que podem se comportar como ambos (condutores e isolantes), a depender da temperatura. A diferença entre os três tipos de materiais é justificada pela estrutura formada pelos mesmos após a ligação e pelo modelo de bandas conforme mostra a Figura 6.

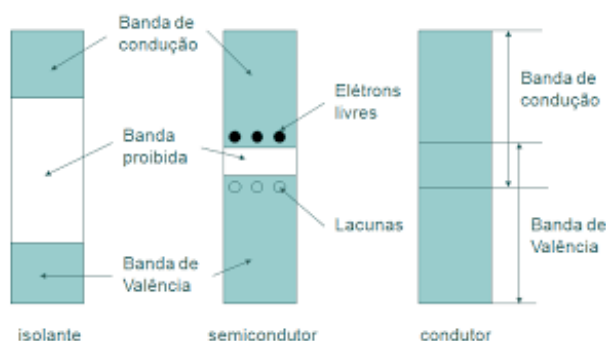


Figura 6 - Modelo de bandas dos três tipos de materiais: condutor, semicondutor e isolante.

Fonte: Figura extraída de (IFSC,2016).

A Figura 6 apresenta um esquema dos diferentes tipos de materiais e pode-se verificar que há um salto de energia (*gap* de energia) entre a banda de valência (banda onde se encontram os elétrons da camada de valência do material) e a banda de condução (banda para a qual os elétrons passam quando têm energia suficiente para se desprenderem da camada de valência) nos semicondutores e nos isolantes, o que faz com que estes tenham mais dificuldade em conduzir eletricidade (principalmente o isolante, pois o *gap* é maior). Como o *gap* dos semicondutores é menor, necessita-se de uma pequena quantidade de energia para que este passe para o estado de condução, ou seja, para que os elétrons que estão na banda de valência consigam superar o *gap* e ir para a banda de condução. E para que a condução, nos semicondutores, seja mais eficiente existe um processo chamado “dopagem” para auxiliar (UNICAMP, 2017).

A camada de valência dos materiais semicondutores possui quatro elétrons, e como este material tende a possuir oito elétrons de valência, quando ocorre a ligação

seus átomos são acomodados simetricamente entre si constituindo uma estrutura cristalina através de ligações covalentes. A Figura 7 mostra o modelo do compartilhamento de elétrons feito por um material semiconductor intrínseco (com alto grau de pureza) (UNESP, 2011).

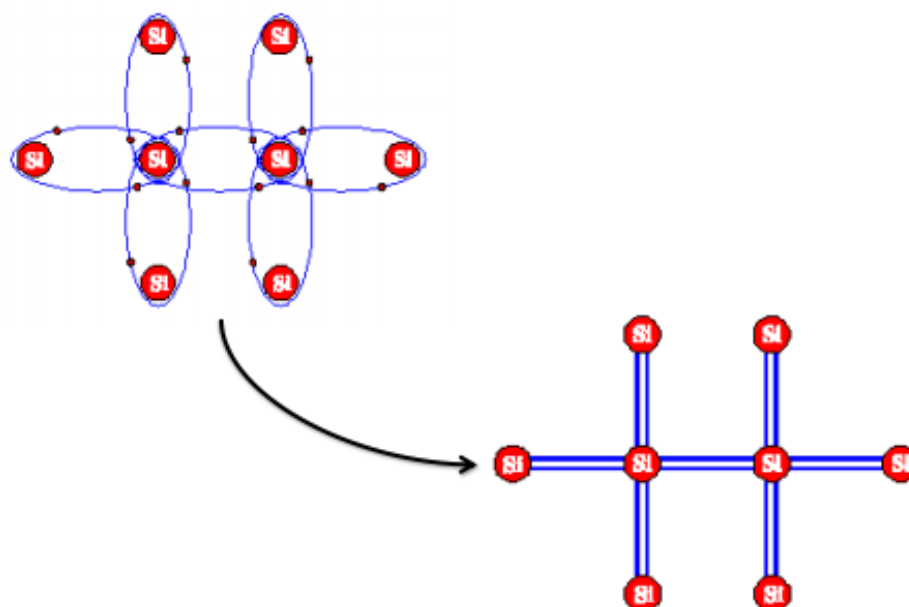


Figura 7 - Ligações covalentes de um semiconductor intrínseco.

Fonte: Figura extraída de (UNESP, 2011).

Devido à tendência de transformar-se em uma estrutura simétrica, um material semiconductor quase não possui elétrons livres. Portanto, para que os materiais semicondutores exibam funcionalidades desejáveis em circuitos elétricos faz-se necessário utilizar o processo de dopagem, que consiste na introdução de elementos adicionais à sua estrutura cristalina, elementos estes chamados de “impurezas”. Estas impurezas são elementos que possuem três ou cinco elétrons de valência e são introduzidas em baixíssimas quantidades (SEED, 2017).

Após a dopagem o semiconductor é denominado “semiconductor extrínseco” (acrescido de impurezas), e este pode ser um material do tipo P (com excesso de lacunas) ou do tipo N (com excesso de elétrons).

Ao se dopar o semiconductor com um elemento que possua três elétrons de valência (Alumínio, Índio, Boro ou Gálio), obtém-se um material do tipo P, este material possui excesso de lacunas, esta lacuna é a falta de um elétron na ligação individual

(covalente) de um átomo do semicondutor com um átomo da impureza, é o buraco (lacuna) deixado pela falta de um elétron. A Figura 8 ilustra as lacunas de um material.

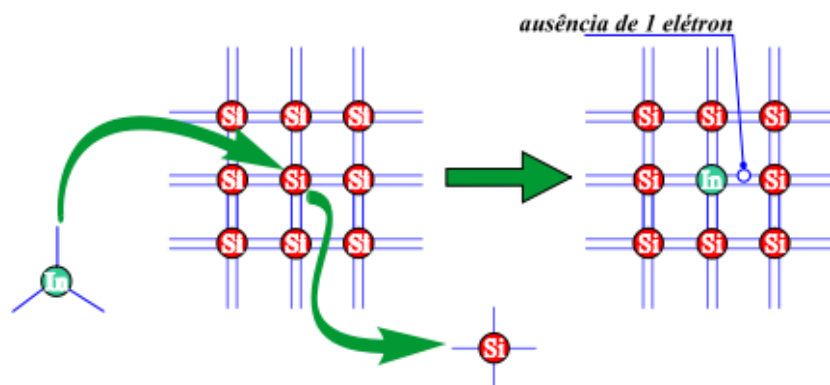


Figura 8 - Lacunas em um semicondutor extrínseco tipo P.

Fonte: Figura extraída de (UNESP, 2011).

Ao se dopar o semicondutor com um elemento que possua cinco elétrons de valência (Antimônio, Fósforo ou Arsênio), obtém-se um material do tipo N, este material possui excesso de elétrons livres, estes elétrons são aqueles que sobram nas ligações individuais (covalentes) dos átomos do semicondutor com os átomos da impureza, pois como o material tende a se estabilizar com oito elétrons de valência, realiza quatro ligações covalentes o que faz com que um elétron fique de fora das ligações. A Figura 9 ilustra os elétrons livres em um material semicondutor.

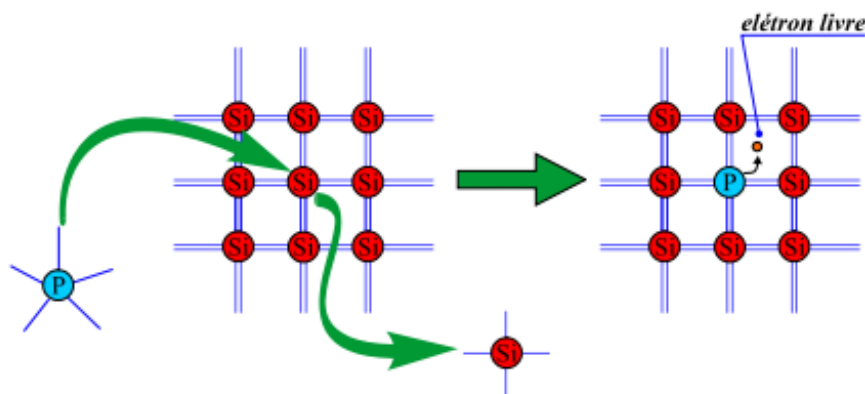


Figura 9 - Elétrons livres em um semicondutor extrínseco tipo N.

Fonte: Figura extraída de (UNESP, 2011).

Com a apresentação dos conceitos básicos dos materiais semicondutores, pode-se apresentar na próxima subseção os conceitos pertinentes ao efeito fotovoltaico proveniente dos materiais semicondutores.

2.3.2 Efeito Fotovoltaico

As células fotovoltaicas utilizam o efeito fotovoltaico proveniente dos materiais semicondutores para gerar energia elétrica, e este é um conceito importante para o entendimento do funcionamento das células fotovoltaicas.

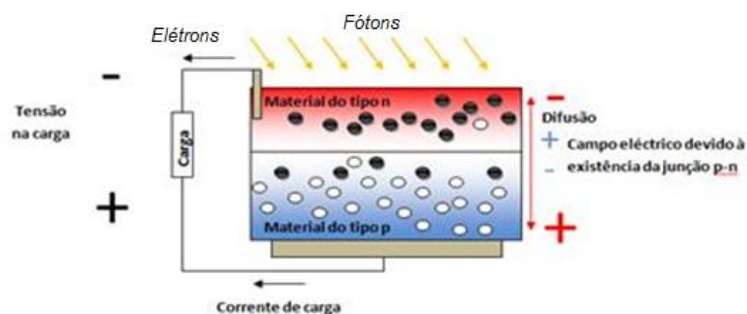


Figura 10 - Ilustração do efeito fotovoltaico.

Fonte: Figura extraída de (FEUP, 2010).

Os principais efeitos observados ao se expor materiais metálicos à radiação são dois: o fotoelétrico e o fotovoltaico. Estes dois efeitos estão relacionados, porém implicam em diferentes aplicações. O efeito fotoelétrico consiste na emissão de elétrons, por um material metálico, ao se incidir radiação em sua superfície (LABORATÓRIO DE FÍSICA MODERNA, 2017). Para que se ocorra o efeito fotovoltaico é necessário que sejam unidos os dois tipos de semicondutor (P e N). Na área da união, chamada de Junção P-N, os elétrons livres do semicondutor tipo N migrarão para o semicondutor tipo P para ocuparem esses espaços, porém essa migração não ocorre indefinidamente, pois forma-se um campo elétrico na área de junção que impede que os elétrons continuem fluindo. Mas ao receberem fótons de luz visível os elétrons são energizados, mas não conseguem fluir da camada N para a camada P. Ligando as duas camadas externamente (por um fio), pode-se aproveitar a corrente elétrica que se forma na passagem dos elétrons de uma camada para outra (UFRJ, 2017). A Figura 10 ilustra a estrutura necessária (descrita anteriormente) para que ocorra o efeito fotovoltaico.

Resumindo, o efeito fotovoltaico é então definido como a corrente gerada por dois semicondutores um do tipo P e outro do tipo N quando em contato e expostos à

radiação. Baseado nos conceitos do efeito fotovoltaico, na próxima subseção tem-se a descrição do funcionamento das células fotovoltaicas.

2.3.3 Funcionamento da Célula Fotovoltaica

Sem produzir ruído ou qualquer tipo de poluição, utilizando energia limpa e inesgotável do Sol, as células fotovoltaicas vêm constituindo painéis fotovoltaicos interligados à rede elétrica pública a fim de contribuir com a economia na geração de energia de formas convencionais, bem como diminuir os impactos ambientais com novas construções. As células fotovoltaicas convertem diretamente a luz do Sol em eletricidade sem originar qualquer tipo de poluente, seja no ar ou na água (NASCIMENTO, 2004).

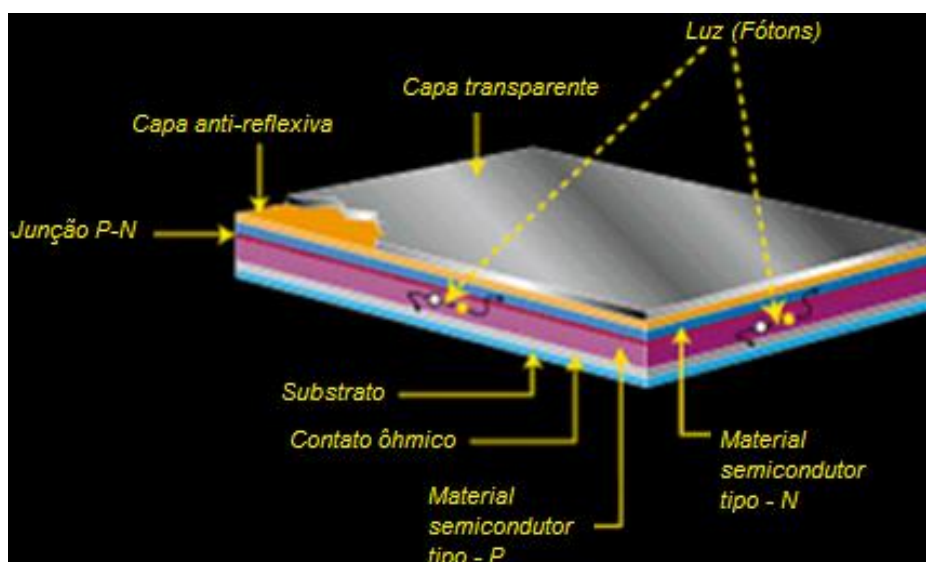


Figura 11 - Esquema estrutural da célula fotovoltaica. Figura adaptada.

Fonte: Figura extraída de (NASCIMENTO, 2004).

As células fotovoltaicas são construídas com pelo menos duas camadas de material semicondutor, sendo que uma camada possui carga positiva e a outra, carga negativa. Quando a luz penetra na célula, alguns fótons da luz são absorvidos pelos átomos do material semicondutor tipo N, deslocando seus elétrons e assim liberando-os da camada negativa originando assim, um fluxo de elétrons que passa pelo circuito externo e retorna à camada positiva. Este fluxo de elétrons é que produz a corrente elétrica. O efeito no qual uma célula fotovoltaica converte a luz do Sol em eletricidade é o efeito fotovoltaico (NASCIMENTO, 2004), na Figura 11 pode-se observar a

estrutura de uma célula fotovoltaica, para aproveitar a corrente descrita pelo efeito fotovoltaico.

Uma célula fotovoltaica não armazena energia elétrica. Apenas mantém um fluxo de elétrons estabelecidos num circuito elétrico enquanto houver incidência de luz sobre ela, este efeito é o efeito fotovoltaico (NASCIMENTO, 2004).

O corpo de uma célula fotovoltaica é seu material absorvedor da radiação, isto é, os materiais semicondutores. Semicondutores só irão absorver fótons com energia igual ou superior a sua diferença de banda ($1 \text{ eV} - \text{elétron-Volt} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$). Quando um fóton é absorvido, um elétron da banda de valência é excitado para a banda de condução, gerando então um par elétron-lacuna (elétron na banda de condução e lacuna na banda de valência). No entanto, na ausência de campo elétrico, o par elétron-lacuna irá recombinar e nenhuma corrente será gerada. O campo elétrico necessário para a separação dos portadores de carga é consequência da junção de um semicondutor do tipo N com um semicondutor do tipo P, a junção P-N, (IFSC 2, 2016).

Atualmente, o semicondutor mais utilizado para a confecção das células fotovoltaicas é o Silício (Si). As células fotovoltaicas podem ser construídas de Silício monocristalino, Silício policristalino ou Silício amorfo, sendo as duas primeiras tecnologias as mais empregadas atualmente. Existem também outros materiais e tecnologias utilizados na construção de células fotovoltaicas (CuInSe_2 – Disseleneto de Cobre-Índio, CdTe – Telureto de Cádmio, GaAs – Arseneto de Gálio, Células fotoeletroquímicas TiO_2 – Dióxido de Titânio, etc.), mas estes são, até o presente momento, utilizados em escala reduzida ou experimental (CRESESB, 2017). Assim, na próxima subseção é possível verificar um panorama entre os tipos de materiais semicondutores mais utilizados na confecção das células fotovoltaicas.

2.3.3.1 Comparação dos Tipos de Materiais Semicondutores das Células Fotovoltaicas

O silício monocristalino é o material mais usado na composição das células fotovoltaicas. A uniformidade da estrutura molecular resultante da utilização de um cristal único é ideal para potencializar o efeito fotovoltaico. O rendimento máximo

atingido em laboratório é de aproximadamente 24%, o qual em utilização prática se reduz para aproximadamente 15%, porém a produção de silício cristalino é mais cara em relação ao demais tipos de silício (CASTRO, 2002).

O silício policristalino, constituído por um número muito elevado de pequenos cristais da espessura de um cabelo humano, dispõe de uma quota de mercado de cerca de 30%. As descontinuidades da estrutura molecular dificultam o movimento de elétrons e encorajam a recombinação com as lacunas, o que reduz a potência de saída (CASTRO, 2002). Por este motivo os rendimentos em laboratório e em utilização prática não excedem os 18% e 12%, respectivamente. Em contrapartida, o processo de fabricação é mais barato do que o do silício cristalino (CASTRO, 2002).

O silício amorfo não tem estrutura cristalina, apresentando defeitos estruturais que, em princípio, impediriam a sua utilização em células fotovoltaicas, uma vez que aqueles defeitos potencializavam a recombinação dos pares de elétrons-lacunas (CASTRO, 2002).

No entanto, se ao silício amorfo for adicionada uma pequena quantidade de hidrogênio, por um processo chamado hidrogenização, os átomos de hidrogênio combinam-se quimicamente de forma a minimizar os efeitos negativos dos defeitos estruturais. O silício amorfo absorve radiação solar de uma maneira muito mais eficiente do que o silício cristalino, pelo que é possível depositar uma fina película de silício amorfo sobre um substrato (metal, vidro, plástico). Este processo de fabricação é ainda mais barato do que o do silício policristalino. Em laboratório é possível obter rendimentos da ordem de 13%, mas as propriedades conversores do material deterioram-se em utilização prática, pelo que os rendimentos descem para cerca de 6% (CASTRO, 2002).

A Tabela 1 mostra a eficiência dos diferentes tipos de tecnologias utilizadas atualmente. Dessa forma, na próxima subseção tem-se a apresentação dos conceitos necessários para confeccionar um módulo fotovoltaico, componente de fundamental importância na obtenção do protótipo de seguidor solar.

Tabela 1- Comparação da eficiência das diversas tecnologias de células fotovoltaicas.

Material da célula fotovoltaica	Eficiência da célula em laboratório (%)	Eficiência da célula comercial (%)	Eficiência dos módulos comerciais (%)
Silício monocristalino	24,7	18	14
Silício policristalino	19,8	15	13
Silício cristalino de filme fino	19,2	9,5	7,5
Silício amorfo	13	10,5	7,5
Silício micromorfo	12	10,7	9,1
Célula solar híbrida	20,1	17,3	15,2
CIS, CIGS	18,8	14	10
Telureto de cádmio	16,4	10	9

Fonte: (FERREIRA, 2016).

2.3.4 Módulo Fotovoltaico

O módulo fotovoltaico é a unidade básica de todo o sistema fotovoltaico. O módulo é composto por células fotovoltaicas conectadas em arranjos produzindo tensão e corrente suficientes para a utilização da energia (CRESESB, 2004). É indispensável o agrupamento em módulos já que uma célula fornece energia elétrica, em uma tensão em torno de 0,4 V no ponto de máxima potência, cuja densidade de corrente é da ordem de 30 mA/cm². Adicionalmente a célula apresenta espessura muito reduzida, necessitando de proteção contra esforços mecânicos e fatores ambientais (CRESESB, 2004).

O número de células conectadas em um módulo e seu arranjo, que pode ser série e/ou paralelo, depende da tensão de utilização e da corrente elétrica desejada. Deve ser dada cuidadosa atenção às células a serem reunidas, devido às características elétricas (CRESESB, 2004). A incompatibilidade destas características leva a módulos “ruins”, porque as células de maior foto-corrente e foto-tensão dissipam seu excesso de potência nas células de desempenho inferior. Em

consequência, a eficiência global do módulo fotovoltaico é reduzida (CRESESB, 2004). A Figura 12 ilustra como é construído um módulo fotovoltaico.

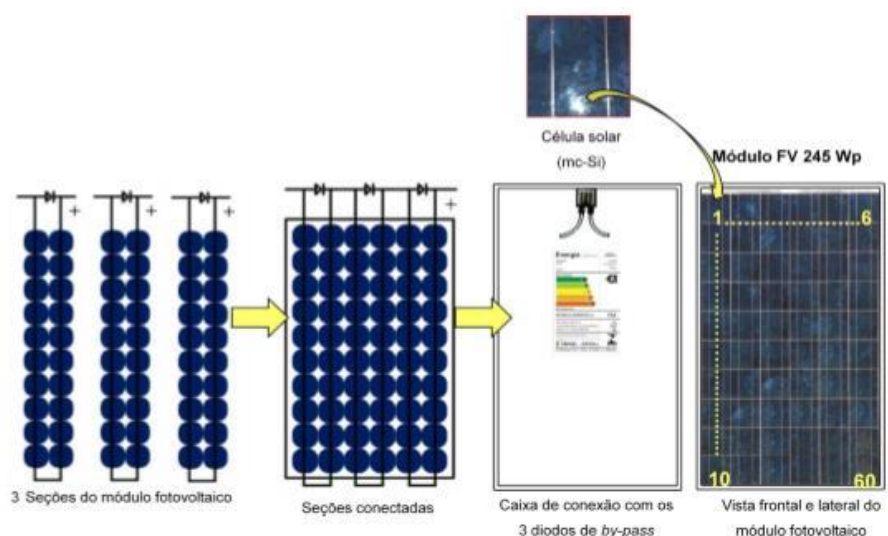


Figura 12 - Representação esquemática da confecção do módulo fotovoltaico utilizando células fotovoltaicas.

Fonte: Figura extraída de (RESEARCHGATE, 2016).

Após a apresentação dos conceitos para a obtenção dos módulos fotovoltaicos, na próxima seção tem-se a descrição de sistemas que utilizam tais módulos para realizar o rastreamento solar.

2.4 Seguidor Solar

Os sistemas conhecidos como seguidor solar (*solar trackers*) desempenham a tarefa de colocar os módulos fotovoltaicos (painéis solares) com a sua superfície sempre na posição perpendicular aos raios de Sol incidentes. Desta maneira, as mudanças na posição do Sol em relação à Terra durante o dia e com respeito às estações do ano, são compensadas com o reposicionamento do módulo, permitindo que, dentro de um intervalo de tempo, mais energia (radiação) seja coletada e transformada em energia elétrica (MARINESCU *et al*, 2006), (BERTOLI, 2012).

Pesquisas na área garantem que com o seguidor solar, a eficiência dos painéis pode atingir valores acima de 50%, no verão, enquanto em outras épocas do ano como o outono, valores maiores que 20% são atingidos, dependendo da tecnologia utilizada (BERTOLI, 2012).

Há muitas formas de rastreamento solar e elas variam, principalmente na forma de implementação. As duas formas gerais existentes são: algoritmos fixos de controle e rastreamento dinâmico. A diferença entre os dois métodos é a maneira com que o caminho do Sol é determinado. Nos algoritmos fixos de controle o caminho do Sol é determinado através de equações relativas às posições do Sol ao longo do dia e da estação do ano em função do tempo, ou seja, o dispositivo seguidor trabalha em função do horário, dia, mês e ano para determinar essa posição, além de levar em conta as coordenadas da localização a qual se encontra.

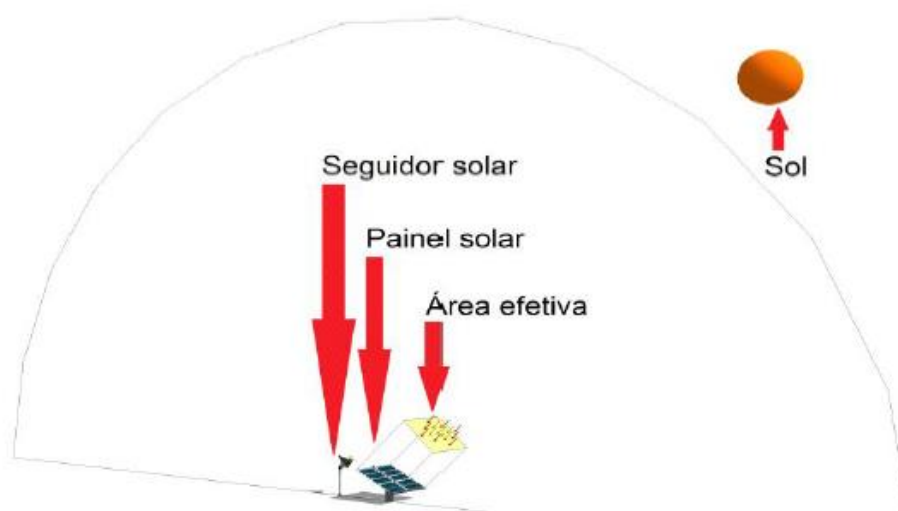


Figura 13 - Representação esquemática de um seguidor solar automatizado em funcionamento.

Fonte: Figura extraída de (ALVES *et al.*, 2012).

Os sistemas dinâmicos de posicionamento, por outro lado, procuram a posição do Sol em qualquer momento do dia. O sistema de controle consiste em controle de direção dos motores de passo, ou servos motores que são acionados por uma unidade de controle de forma digital. A Figura 13 apresenta um esquema do funcionamento do seguidor solar.

Existem também diferentes tipos de seguidores solares, são eles: ativos e passivos (MICROGERAÇÃO, 2016). O movimento dos seguidores passivos é feito a partir da transferência de massa de um lado para outro, e seguem o sol apenas em um eixo, enquanto que os seguidores ativos utilizam motores para realizar a movimentação dos painéis, e podem ser de eixo único ou duplo. Nesta monografia, são analisados apenas os seguidores ativos (MICROGERAÇÃO, 2016).

Seguidores de eixo único podem ser posicionados horizontalmente, verticalmente ou inclinados, e sua orientação pode ser norte-sul ou leste-oeste (UFRN, 2014). Alguns desses tipos são o horizontal e o polar, o primeiro é mais indicado para regiões de baixas latitudes, e o segundo para regiões com altas latitudes. Seguidores de um eixo são mais baratos e menos complicados, eles podem ser vistos na Figura 14 (MICROGERAÇÃO, 2016).

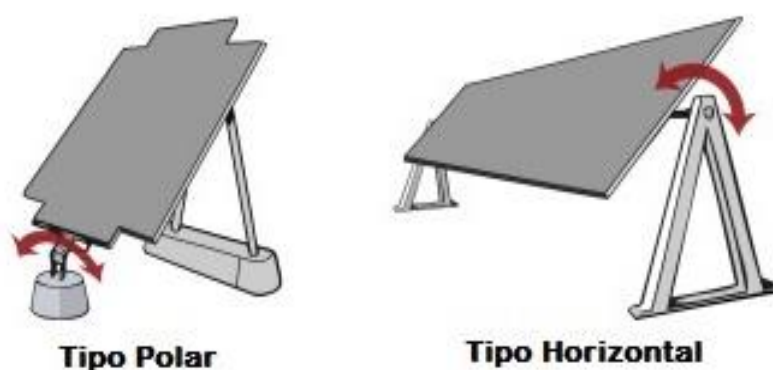


Figura 14 - Seguidor solar de eixo único.

Fonte: Figura extraída de (MICROGERAÇÃO, 2016).

Seguidores solares de eixo duplo são mais complexos e mais caros que os de eixo único, porém permitem que os módulos fotovoltaicos fiquem perpendicularmente aos raios solares. Esse tipo de seguidor pode ser visualizado na Figura 15 (MICROGERAÇÃO, 2016).

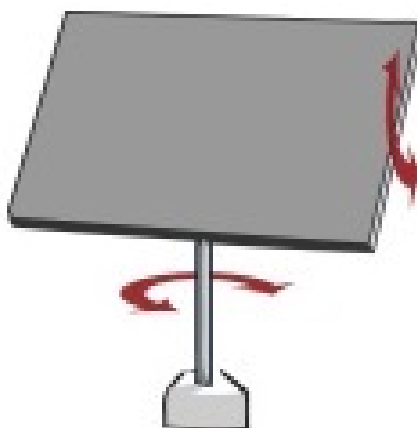


Figura 15 - Seguidor solar de eixo duplo.

Fonte: Figura extraída de (MICROGERAÇÃO, 2016).

Na próxima seção são apresentados conceitos pertinentes a descrição e ao cálculo da trajetória solar, ressaltando assim que tal equacionamento é necessário para implementar o protótipo de seguidor solar proposto nesta monografia.

2.5 Descrição e Cálculo da Trajetória Solar

Nos estudos de energia solar é importante compreender a posição do sol em relação à Terra. Talvez a ferramenta mais eficaz para explicar e compreender a posição do Sol seja a trajetória solar – a trajetória solar em relação a um local na superfície da Terra (HODGE, 2011). Neste trabalho, será apresentado como calcular as trajetórias solares e compreender como são as linhas da trajetória solar.

Considere a relação geométrica Terra-Sol. Conforme ilustrado na Figura 16, a Terra gira em um ângulo de $23,45^\circ$ (HODGE, 2011) em relação ao plano orbital eclíptico. Esse ângulo de rotação é responsável pelas estações ao longo do ano: primavera, verão, outono e inverno. Embora a Terra se mova em torno do Sol, a maneira mais simples de compreender o movimento da Terra é adotar uma visão de Ptolomeu – considerar a Terra estacionária e o Sol em movimento. Na visão de Ptolomeu, a relação do Sol com um ponto na superfície da Terra é descrita pelo ângulo da altitude solar, α , e pelo ângulo azimutal solar, a_s , de acordo com o esquema apresentado na Figura 17. O ângulo da altitude é aquele entre uma linha colinear com o Sol e o plano horizontal. O ângulo azimutal é aquele entre a linha na direção sul e a projeção da linha do local até o Sol no plano horizontal.

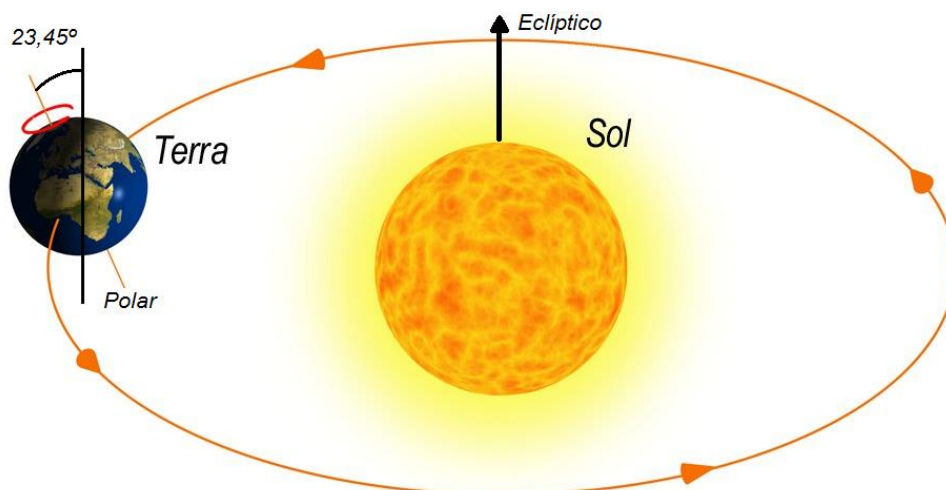


Figura 16 - Representação esquemática do movimento da Terra em torno do Sol.

Fonte: Figura extraída de (MUNDO EDUCAÇÃO, 2017).

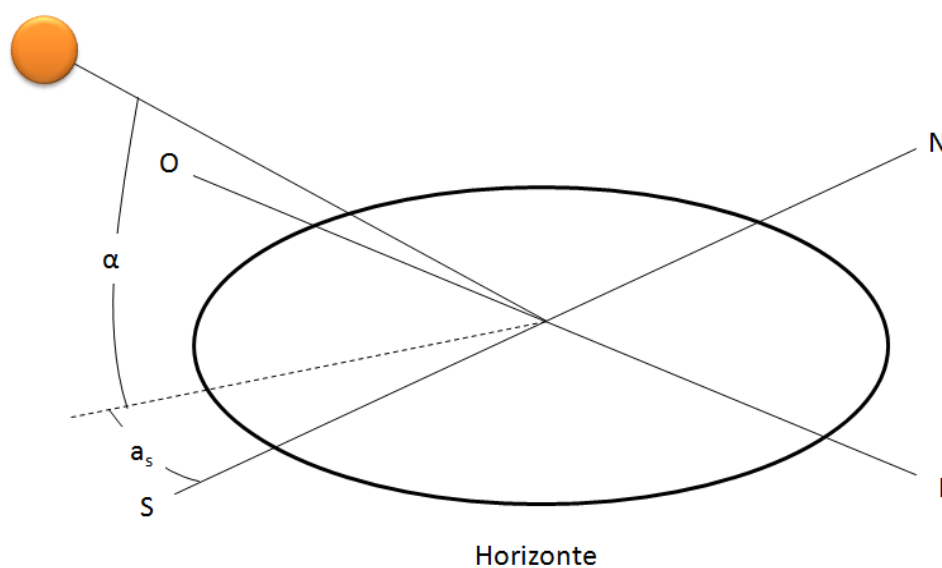


Figura 17 - Definições do ângulo azimutal solar e do ângulo de altitude solar. Figura adaptada.

Fonte: Figura adaptada de (HODGE, 2011).

A trajetória solar para 01 de junho no IFMG Campus: Formiga, -20,453 de latitude sul, esta ilustrada na Figura 18. Além da relação entre os ângulos azimutal e de altitude, a hora solar é exibida na figura. Na cidade de Formiga/MG, 01 de junho tem quase 12 horas de luz do dia, e no meio-dia solar o Sol está com um ângulo de altitude solar de aproximadamente 48° . O movimento do Sol também é simétrico ao

meio-dia solar, com a diferença entre a manhã e à tarde sendo apenas o sinal do ângulo azimutal.

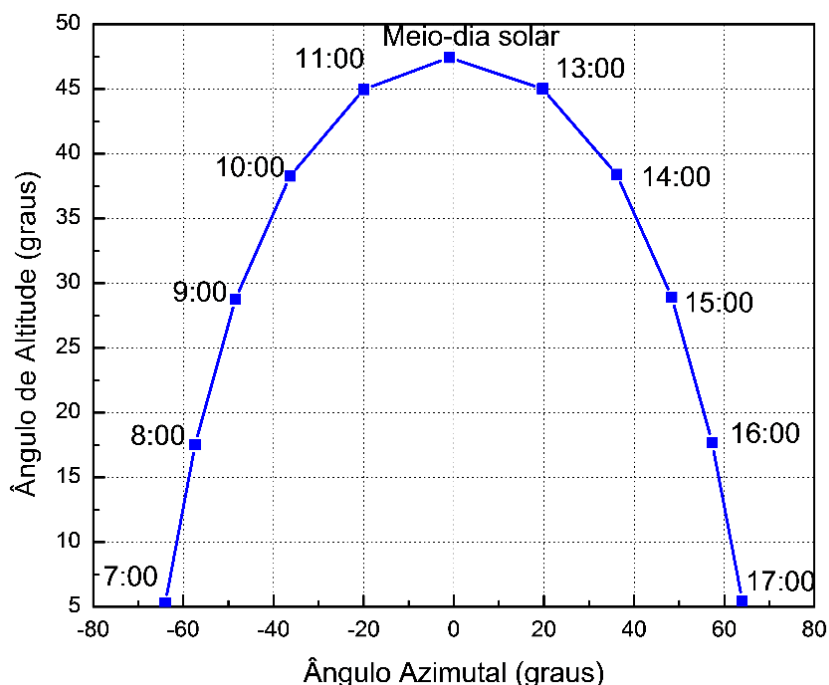


Figura 18 - Linha da trajetória solar em 01 de junho no IFMG Campus: Formiga.

Fonte: Próprio autor.

De acordo com Hodge (HODGE, 2011), os ângulos de altitude e azimutal não são fundamentais, mas são funções da localização (latitude), do tempo (ângulo horário solar) e da declinação solar. A declinação solar, δ_s , varia entre $-23,45^\circ$ e $+23,45^\circ$ e tem o mesmo valor numérico da latitude na qual o Sol está diretamente sobre a cabeça ao meio-dia solar em um determinado dia. A declinação solar pode ser aproximada como,

$$\delta_s = 23,45^\circ \sin \left[\frac{360(284+n)}{365} \right], \quad (1)$$

onde n é o número do dia Juliano. O dia Juliano é o número do dia conforme medido sequencialmente de 1 de janeiro a 31 de dezembro. Rigorosamente é o dia ordinal. A declinação solar em função do dia Juliano é ilustrada na Figura 19.

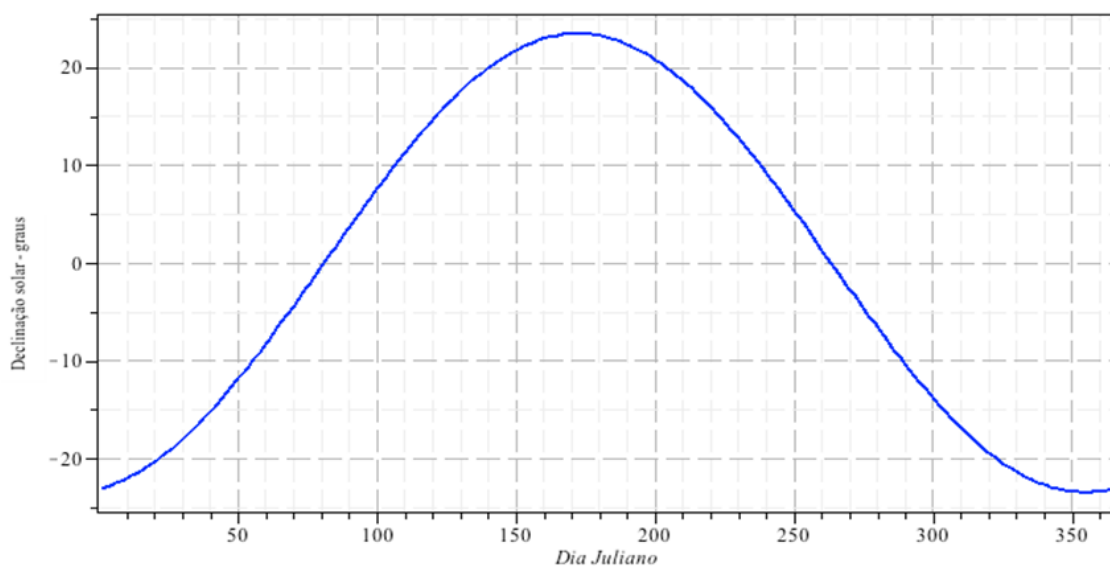


Figura 19 - Ângulo de declinação em função da data Juliana.

Fonte: Próprio autor.

O ângulo horário solar, ω , baseia-se nas 24 horas necessárias para o Sol se mover 360° em torno da Terra, e pode ser encontrado por meio da equação (RIBERA, 2010),

$$\omega = 15(12 - t), \quad (2)$$

onde t é o horário solar. Para calcular a hora solar a partir da hora civil (hora do relógio), utiliza-se a equação (3) (RIBERA, 2010),

$$TSV = HL + CL + CET + CES, \quad (3)$$

onde TSV é o tempo solar verdadeiro dado em horas, HL é a hora local, CL é a correção da longitude, CET é a correção da equação do tempo e CES é a correção estadual.

A hora local é a hora do local para onde o cálculo será feito, a correção da longitude se dá por meio da equação (4) (RIBERA, 2010),

$$\text{correção da longitude} = 4(L_s - L_e), \quad (4)$$

onde L_s é a longitude do meridiano que define a hora dado em graus e L_e é a longitude geográfica do lugar dado em graus.

A constante 4, da equação (4), é um fator para troca de unidades. Visto que a Terra gira com uma velocidade média de 15° por hora, existe uma relação de 4 minutos por grau (RIBERA, 2010).

Um dia solar, é o intervalo de tempo (não necessariamente 24 horas) que o sol demora para completar um ciclo ao redor de um observador fixo sobre a Terra. O dia solar varia ao longo do ano. Essa diferença entre o dia solar e o dia médio (24 horas) recebe o nome de equação do tempo, e tem um valor máximo de 16 minutos. Ela é descrita pela equação (5) (RIBERA, 2010),

$$E_t = 229,18(0,000075 + 0,001868 \cos(g) - 0,032077 \sin(g) - 0,014615 \cos(2g) - 0,04089 \sin(2g)), \quad (5)$$

onde $g = (n - 1)360/365$.

A correção estadual nada mais é do que o horário de verão. Caso ele esteja em uso, o valor da correção é de -1 (RIBERA, 2010).

O ângulo de altitude solar α , está relacionado com os ângulos de declinação (δ_s), de latitude (L), e de horário solar (ω), como (HODGE, 2011),

$$\sin(\alpha) = \sin(L) \sin(\delta_s) + \cos(L) \cos(\delta_s) \cos(\omega). \quad (6)$$

O ângulo azimutal solar a_s , é dado por (HODGE, 2011),

$$\sin(a_s) = \frac{\cos(\delta_s) \sin(\omega)}{\cos(\alpha)}. \quad (7)$$

Para um determinado dia, a geração de uma linha de trajetória solar usando as equações (6) e (7) é simples em uma latitude maior do que a declinação solar. Deve-se ter cuidado com os ângulos azimutais solares acima de $+90^\circ$ à tarde ou abaixo de -90° de manhã. Como o intervalo angular principal da função arco-seno é de $+90^\circ$ a -90° nos ângulos azimutais maiores/menores do que $\pm 90^\circ$, deve-se usar a lógica para garantir que seja obtido um valor maior/menor do que 90° (HODGE, 2011). Assim,

com tal formalismo da descrição da trajetória solar, é possível implementar o equacionamento para que o protótipo de seguidor solar busque a melhor posição para que a Sol esteja o mais perpendicular possível em relação ao módulo fotovoltaico do protótipo.

No próximo capítulo são apresentados os materiais e a metodologia desenvolvida para a confecção do protótipo de seguidor solar de baixo custo.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo apresenta-se a descrição dos elementos utilizados para a confecção do protótipo de seguidor solar de baixo custo.

3.1 Microcontrolador

Para uma melhor eficiência no processamento de dados, na década de 1970 começaram a ser utilizados microprocessadores em computadores (MARTINS, 2005). O microprocessador Intel foi um dos precursores, e, a partir daí, houve uma preocupação em melhorar cada vez mais o sistema de processamento de dados por meio desses componentes. Com base na arquitetura de um microprocessador e seus periféricos, foi criado um componente que comportava todo um sistema em uma única unidade entre equivalente a um microprocessador e seus periféricos. Assim surgiu o microcontrolador (MARTINS, 2005). Com o passar dos anos e com os avanços na tecnologia de fabricação de dispositivos, os microcontroladores tornaram-se uma das melhores relações custo-benefício em se tratando de soluções que demandam processamento, baixo custo de *hardware* e pequena necessidade de espaço físico.

Os microcontroladores estão presentes em quase tudo o que envolve a Eletrônica, diminuindo o tamanho, facilitando a manutenção e gerenciando tarefas internas de equipamentos eletrônicos. Um microcontrolador pode efetuar várias funções, ou seja, resumir circuitos a um único componente (ARDUINO, 2017). Para suprir a necessidade de projetos, existe uma ampla gama de microcontroladores disponíveis no mercado, diferenciando-se pelo número de linhas de entradas e saída e pelos recursos periféricos do dispositivo. Para o desenvolvimento deste protótipo escolhe-se o Arduino devido seu baixo custo em relação a outros microcontroladores disponíveis no mercado, e na próxima subseção são apresentadas as características do microcontrolador escolhido.

3.1.1 Arduino

Arduino é uma plataforma física que consiste em uma placa microcontrolada e um ambiente de desenvolvimento computacional para escrever o código programado

na placa de maneira descomplicada. Há variados formatos de arduinos, ficando a critério do cliente e das necessidades a escolha de cada placa (Ex: Arduino UNO, Arduino MEGA, etc).

A placa ARDUINO UNO possui 14 pinos de *input/output* (entrada e saída), dos quais seis podem ser usados como saídas PWM (*Pulse Width Modulation*), 6 entradas analógicas, um oscilador a cristal de 16MHz, uma porta USB (*Universal Serial Bus*), um conector *jack* para alimentação, um leitor ICSP (*In-circuit serial programming*) e um botão de *reset*. A estrutura física do Arduino UNO pode ser visualizada na Figura 20.

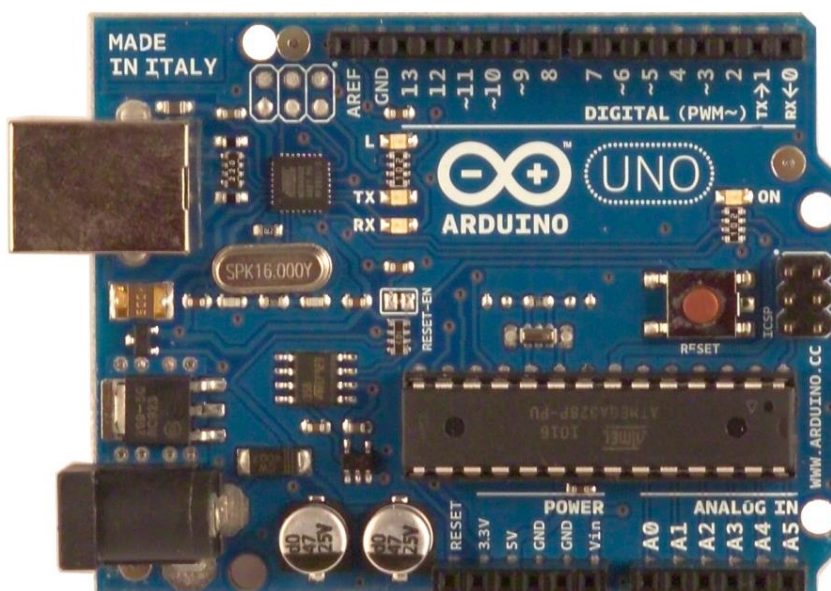


Figura 20 - Plataforma Arduino UNO.

Fonte: Figura extraída de (ARDUINO, 2017).

O Arduino pode ser usado para desenvolver os mais diversos tipos de projetos, recebendo os dados de uma variedade de sensores ou chaves e controlando uma variedade de luzes, motores e outros elementos físicos de saída através dos seus pinos de entrada e saída, sendo que o mesmo realiza o processamento destes dados de acordo com a programação. Os projetos podem ser *standalone* (não necessitam estar conectados a outros softwares para funcionar) ou então se comunicar com *softwares* funcionando em computadores (ARDUINO, 2017).

3.1.1.1 Módulo *Real Time Clock* DS1307

O *real time clock* (RTC), é um módulo que tem 56 bytes de memória não-volátil e é capaz de armazenar e fornecer informações completas de data como dia da semana, dia do mês, mês, ano e além é claro, das funções de horas, minutos e segundos, nos formatos de 12 ou 24 horas. Meses com menos de 31 dias e anos bissextos são ajustados automaticamente (FILIFEFLOP, 2014).

Uma bateria de lítio garante que os dados sejam preservados mesmo sem alimentação externa, e é acionada automaticamente em caso de falta de energia no módulo (FILIFEFLOP, 2014).

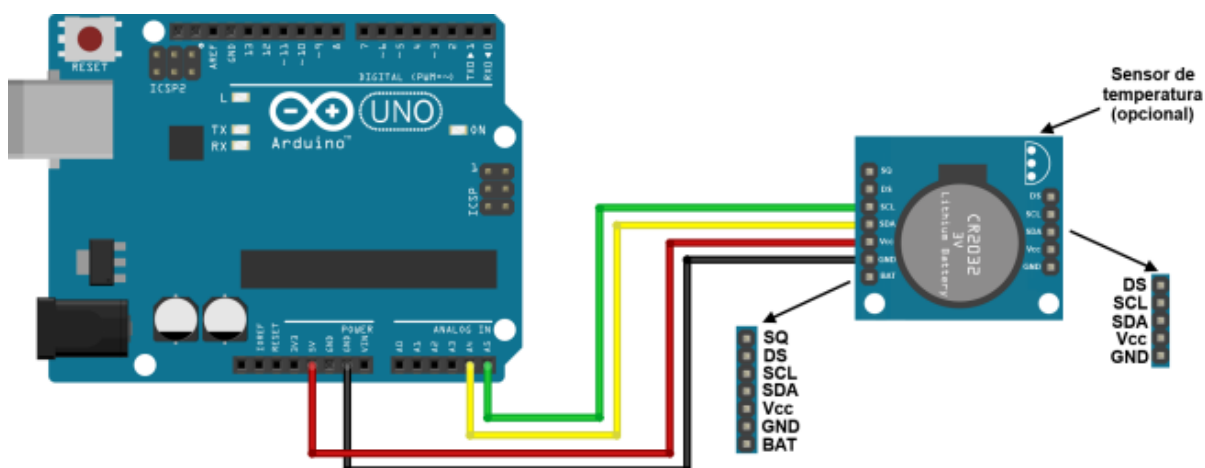


Figura 21 - Ligação do RTC com o Arduino.

Fonte: Figura adaptada de (FILIFEFLOP, 2014).

Devido à necessidade do horário do dia e do dia nas equações solares, fez-se necessária a utilização do RTC. Também através do constante monitoramento do horário, pode-se melhorar a eficiência do protótipo fazendo com que funcione apenas durante o dia, desse modo pode-se economizar energia. A Figura 21 mostra como módulo RTC foi ligado ao Arduino.

3.2 Sensores

Para se rastrear a posição do sol durante o dia necessita se de sensores que captam o sinal da radiação solar. Um sensor de luminosidade conhecido e bastante utilizado é o LDR (*Light Dependent Resistor* – Resistor Dependente da Luz), que é uma resistência que varia de acordo com a incidência de claridade sobre a sua superfície. O mesmo pode ser visualizado na Figura 22.



Figura 22 - Sensor de luminosidade, LDR.

Fonte: Figura extraída de (UNESP, 2010).

O LDR possui superfície de Sulfeto de Cádmio (CdS) que é o material que tem sua resistência elétrica dependente da quantidade de luz incidente. A curva característica desse componente pode ser visualizada na Figura 23, que nos mostra que sua resistência decresce à medida que a intensidade de luz aumenta (UNESP, 2010).

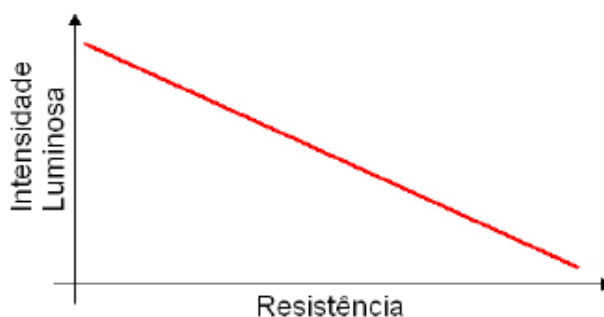


Figura 23 - Relação da intensidade luminosa do LDR em função da resistência.

Fonte: Figura extraída de (UNESP, 2010).

3.3 Servo-Motor

Para seguir a orientação dada pelos sensores e processada pelo controle (Arduino), percebeu-se a necessidade de se utilizar algum dispositivo que fornecesse o movimento ao robô. Dispositivos bastante utilizados na eletrônica para atender tal demanda são os servo-motores, pois são motores que trabalham em corrente contínua e possuem características de controle que facilitam seu uso, porém cada situação deve ser estudada, pois existem outros tipos de motores que possuem vantagens em determinados casos.

Os servo-motores são usados em várias aplicações quando se deseja movimentar algo de forma precisa e controlada. Sua característica mais marcante é a sua capacidade de movimentar seu eixo até uma posição e mantê-lo, mesmo quando sofre uma força em outra direção (UNESP, 2013).

Seu funcionamento é igual ao do motor de corrente contínua, porém este possui um mecanismo para controle de ângulo ou velocidade incluído. O servo-motor pode ser visto na Figura 24.



Figura 24 - Servo-motor.

Fonte: Figura extraída de (UNESP, 2013).

Os servo-motores possuem em sua estrutura interna os seguintes blocos:

- Circuito de Controle – responsável pelo monitoramento do potenciômetro e acionamento do motor visando obter uma posição pré-determinada;
- Potenciômetro – ligado ao eixo de saída do servo, monitora a posição do mesmo;
- Motor – movimenta as engrenagens e o eixo principal do servo;
- Engrenagens – reduzem a rotação do motor, transferem mais torque ao eixo principal de saída e movimentam o potenciômetro junto com o eixo;
- Caixa do Servo – caixa para acondicionar as diversas partes do servo.

Estes estão posicionados internamente na caixa do servo da forma mostrada na Figura 25.

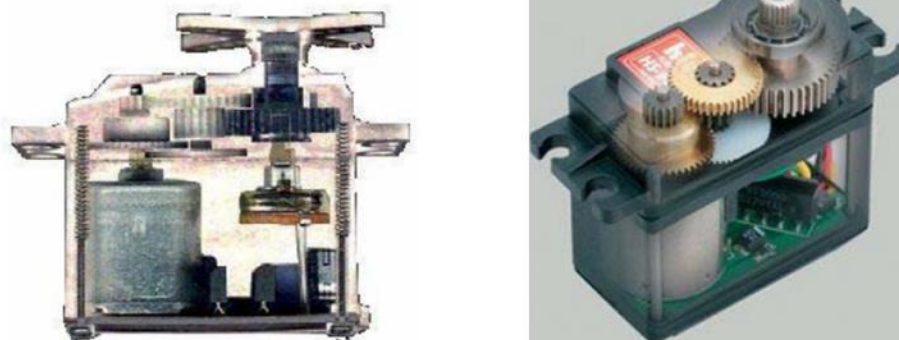


Figura 25 - Estrutura interna dos servo-motores.

Fonte: Figura extraída de (UNESP, 2013).

Por meio desses conceitos apresentados, foi desenvolvido dois seguidores solar de eixo duplo. Um irá utilizar o método de rastreamento dinâmico, enquanto o outro utilizará algoritmos fixos de controle. Esses mesmo seguidores serão utilizados para a implementação dos seguidores de um eixo, tanto horizontal, quanto polar.

3.4 Confeção dos protótipos de seguidor solar

Nesta seção apresenta-se a metodologia desenvolvida para a obtenção dos protótipos de seguidor solar. Primeiramente, é apresentado a implementação do

protótipo de seguidor solar com rastreamento dinâmico e posteriormente, mostra-se a construção do protótipo de seguidor solar por algoritmo fixo de controle.

3.4.1 Desenvolvimento do protótipo de seguidor solar com rastreamento dinâmico

Para a montagem de cada protótipo de seguidor solar, foram utilizados dois servos-motores, onde um era responsável pelo movimento no eixo horizontal e o outro no eixo vertical.

A confecção da estrutura do protótipo de seguidor solar por rastreamento dinâmico, utilizou a área e os equipamentos de uma oficina mecânica localizada em Divinópolis – MG, o espaço foi cedido, de forma gratuita, pela empresa Braddy.



Figura 26 - Peça de acoplamento do painel e sensores ao motor vertical.

Fonte: Próprio autor.

Como a placa adquirida não possuía um suporte para fixação dos sensores, então, foi necessário a construção da parte de fixação. Esta parte foi confeccionada utilizando um tubo quadrado de $\frac{1}{2}$ polegada feito de alumínio, o tubo foi serrado utilizando uma serra manual, para se retirar uma de suas paredes e permitir o encaixe da placa, foram confeccionadas duas peças, sendo uma para cada lado da placa, unindo as duas partes com uma chapa lisa de alumínio. Utilizou-se também uma

furadeira de bancada para se fazer perfurações em sua parte posterior e uma rosqueadeira de bancada para abrir rosca nestes furos. Nestes furos são rosqueados parafusos que mantêm fixos os suportes para os sensores. A Figura 26 mostra a peça de fixação da placa desenvolvida.

Em seguida, iniciou-se a confecção da peça de acoplamento do painel ao motor que se movimenta na vertical. Esta peça foi fabricada utilizando um tubo maciço redondo feito de nylon com diâmetro de 1 polegada. Utilizou-se o torno mecânico para usinagem da peça, sendo que uma extremidade foi deixada com o diâmetro inicial e o resto da peça recebeu um rebaixo até atingir aproximadamente o diâmetro de $\frac{1}{2}$ polegada. Esta extremidade ficou com o diâmetro original para que se realizasse o acoplamento desta peça a peça de fixação do painel, que foi feito utilizando três furos e três parafusos. Na outra extremidade (com diâmetro de $\frac{1}{2}$ polegada) foi feito um furo passante para acoplamento da peça ao motor, o acoplamento foi feito por um furo que se encaixava por pressão e permitia se fixar por parafuso. A Figura 26 nos mostra a peça de fixação da placa produzida, já com a peça de acoplamento da mesma ao motor de movimento vertical e os suportes para os sensores.



Figura 27 - Suportes para LDR's com os furos de passagem.

Fonte: Próprio autor.

Os suportes para os sensores foram também fabricados utilizando o tubo de nylon de 1 polegada, sendo que estes foram serrados e receberam um desbaste interno no torno para que o sensor fosse alocado no fundo, realizou-se também os dois furos com a distância correta para se fixar os LDR's. A Figura 27 apresenta os suportes dos sensores finalizados.

Para cada motor foi desenvolvida uma base, sendo a base do motor horizontal a base de todo o protótipo. Os motores foram fixados às suas respectivas bases através de dois parafusos que pressionam uma chapa contra o motor, fazendo com que o motor fique estavelmente pressionado contra outra chapa fixa (motor horizontal) ou contra sua própria base (motor vertical). Além disso, foi desenvolvida uma peça de acoplamento do motor vertical no motor horizontal, esta peça foi desenvolvida com um tubo maciço de nylon de 1 polegada de diâmetro, sendo usinada no torno. Em uma das extremidades foi feito um furo para que se acoplasse ao motor horizontal com pressão, e na outra extremidade foi feito um furo para fixação da base do motor vertical, e um furo passante para aperto do parafuso do motor horizontal.

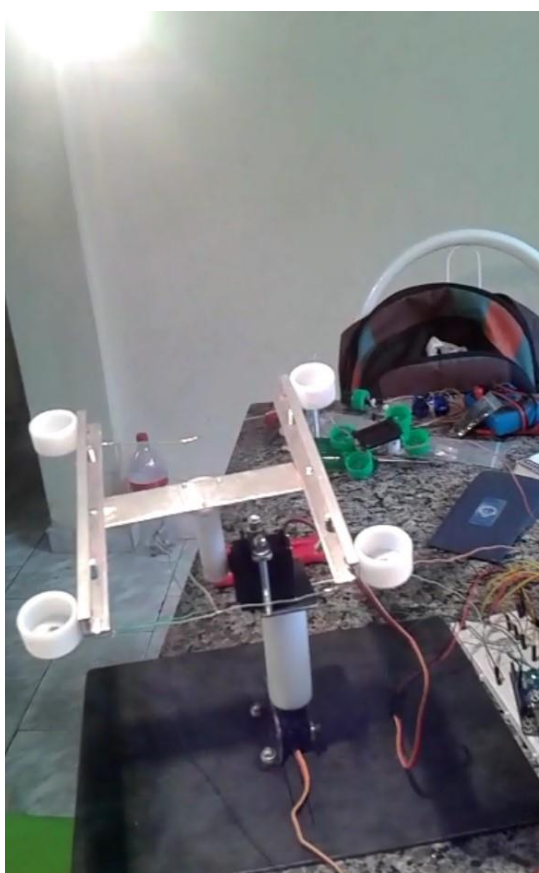


Figura 28 - Estrutura final do protótipo de seguidor solar por rastreamento dinâmico.

Fonte: Próprio Autor.

A base dos motores foi desenvolvida em chapa de aço de 3 mm de espessura, sendo suas dimensões 30 x 20 cm para a base do motor horizontal (base do protótipo) e 6 x 4 cm para a base do motor vertical. Foi utilizada a furadeira de bancada e a rosqueadeira para realização dos furos e roscas, sendo o esmeril utilizado para dar acabamento a todas as peças. A Figura 28 é uma fotografia que ilustra todas as peças citadas, desde as bases ao acoplamento dos motores.

Para o rastreamento por sensores, os LDR's foram posicionados um em cada extremidade da célula fotovoltaica, e fixados no fundo das tampinhas para que ocorra sombra quando a radiação incidir de forma não perpendicular sobre a célula, desse modo haverá alteração no valor da resistência do LDR. Como o LDR é um sensor resistivo, implementou-se um divisor de tensão para se identificar o sinal do mesmo. A Figura 29 nos mostra este divisor de tensão.

No circuito exposto na Figura 29 é possível verificar como os dados de tensão sobre o LDR são extraídos e processados pelo dispositivo de controle. O dispositivo de controle utilizado foi o Arduino (microcontrolador), este detecta os sinais de variação de resistência do LDR, interpretando-os como exposto a claridade ou sombra e envia comandos aos motores para que se orientem no sentido da claridade.

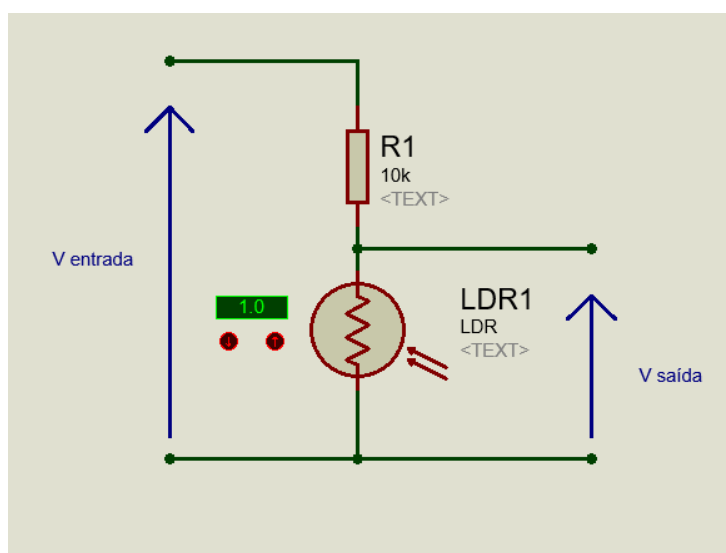


Figura 29 - Circuito divisor de tensão desenvolvido, utilizando um LDR e um resistor de 10 k Ω .

Fonte: Próprio Autor.

3.4.2 Desenvolvimento do protótipo de seguidor solar com algoritmo fixo de controle

A estrutura do protótipo de seguidor solar por algoritmos fixos de controle seguiu a mesma ideia do protótipo anterior, porém foi implementada de uma forma mais simples, sem a necessidade de uma estrutura para fixação de sensores e os motores foram fixados um diretamente ao outro. A Figura 30 ilustra a montagem desse protótipo.



Figura 30 - Estrutura final do protótipo de seguidor solar por algoritmo fixo de controle.

Fonte: Próprio autor.

Desenvolveu-se por fim a alimentação dos protótipos realizada por pilhas e baterias, a fim de evitar que o protótipo tenha de estar ligado à tomada durante seu

período de funcionamento, garantindo que o protótipo possa ser levado a qualquer lugar sem a necessidade de haver uma tomada por perto. Para cada um dos motores utilizou-se quatro pilhas AA de 1,5 V cada, e para o Arduino utilizou-se uma bateria de 9 V.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos entre os protótipos de seguidor solar em relação a uma placa fotovoltaica fixa, a fim de determinar o melhor modelo de seguidor solar para a cidade de Formiga/MG e região.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a realização dos testes em campo, foi colocado um painel fixo com inclinação de aproximadamente 20° e sua face voltada para o norte, e os seguidores solar próximos, o estudo foi realizado nos dias 18, 19 e 20 de outubro de 2017 na cidade de Formiga/MG e as condições climáticas do dia era ensolarado com poucas nuvens. Condições apropriadas para a realização dos testes.

Os dois protótipos de seguidores solar desenvolvidos foram adaptados para realizar as medições como seis tipos diferentes de seguidores solar, sendo eles:

- 2 eixos com rastreamento dinâmico;
- 1 eixo horizontal com rastreamento dinâmico e eixo vertical com ângulo de 20° ;
- 1 eixo vertical com rastreamento dinâmico e eixo horizontal apontando para o norte;
- 2 eixos com algoritmos fixos de controle, onde o ângulo azimutal é responsável pelo movimento horizontal e a altura solar responsável pelo movimento vertical;
- 1 eixo horizontal variando o ângulo azimutal e eixo vertical com ângulo de 20° ;
- 1 eixo vertical variando a altura solar e eixo horizontal apontando para o norte.

Um seguidor ficou responsável pelos três tipos de rastreamento dinâmico, e o outro responsável pelo algoritmo de controle fixo. No momento em que uma medição era realizada, o algoritmo no Arduino era alterado, e assim realizava-se a medição do outro tipo de seguidor.

Foram adquiridas três placas fotovoltaicas iguais, que possuem potência máxima nominal de 2 watts, sendo 7,2 volts de tensão e 250 miliAmpères de corrente. Porém, nos testes de funcionamento, as placas apresentaram resultados divergentes para um mesmo posicionamento. Então, a fim de minimizar erros nos resultados medidos, utilizou-se uma mesma placa solar nas medições. A placa utilizada foi a do painel fixo, ela era posicionada em cima das placas dos seguidores no momento da

medição, mantendo assim a mesma posição da placa fixada nos seguidores. A placa utilizada apresentou, experimentalmente, valores máximos de corrente e potência maiores que os nominais, sendo esses 590 miliAmperes e 4,071 watts, respectivamente.

Dessa forma, foram comparadas as tensões e correntes geradas pelas placas durante todo dia, a fim de se observar qual painel apresentaria um maior aproveitamento de sua potência de geração. As medições foram realizadas de 1 em 1 hora das 08:00 horas até as 18:00 horas, resultando em 10 horas de dados coletados. O local das medições, $20^{\circ}28'7''S$ e $45^{\circ}25'34,1''O$, bem como a disposição dos elementos e painéis durante a mesma podem ser observados na Figura 31.



Figura 31 - Testes de campo dos seguidores solar.

Fonte: Próprio Autor.

Os dados obtidos nas medições foram dispostos em tabelas, e a partir destes dados foram calculadas as variáveis as quais seriam pertinentes comparar. Além disso, com os dados obtidos confeccionou-se gráficos que nos permitem uma análise mais crítica das variáveis que podem ou não afetar a eficiência, não só das placas como também do seguidor.

4.1 Painel fixo

As Tabelas 2, 3 e 4 apresentam as medições realizadas nos dias 18, 19 e 20 de outubro de 2017, respectivamente.

Tabela 2 - Dados painel fixo em 18/10/2017.

Hora	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)
8:00	6,86	0,17	1,1662
9:00	6,87	0,25	1,7175
10:00	6,82	0,38	2,5916
11:00	7,02	0,45	3,159
12:00	6,91	0,5	3,455
13:00	6,95	0,5	3,475
14:00	6,78	0,51	3,4578
15:00	7,04	0,43	3,0272
16:00	6,77	0,27	1,8279
17:00	6,78	0,16	1,0848
18:00	6,31	0,04	0,2524

Fonte: Próprio autor.

Tabela 3 - Dados painel fixo em 19/10/2017.

Hora	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)
8:00	6,93	0,14	0,9702
9:00	7,07	0,26	1,8382
10:00	7,06	0,36	2,5416
11:00	7,04	0,43	3,0272
12:00	7,02	0,48	3,3696
13:00	7,09	0,49	3,4741
14:00	7,07	0,45	3,1815
15:00	6,89	0,38	2,6182
16:00	6,59	0,26	1,7134
17:00	6,73	0,15	1,0095
18:00	6,3	0,05	0,315

Fonte: Próprio autor.

Tabela 4 - Dados painel fixo em 20/10/2017.

Hora	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)
8:00	6,87	0,12	0,8244
9:00	6,94	0,24	1,6656
10:00	7,08	0,36	2,5488
11:00	7,04	0,42	2,9568
12:00	6,92	0,47	3,2524
13:00	6,42	0,11	0,7062
14:00	6,74	0,48	3,2352
15:00	6,45	0,11	0,7095
16:00	6,77	0,3	2,031
17:00	6,76	0,21	1,4196
18:00	6,42	0,06	0,3852

Fonte: Próprio autor.

Os cálculos das potências foram feitos utilizando a seguinte equação,

$$P = V.I, \quad (8)$$

onde V é a tensão (Volts) e I é a corrente (Ampère) gerada pela placa fotovoltaica. De posse dos dados e utilizando o *software* Minitab 18, foram calculadas a média, variância e desvio padrão da potência gerada nos três dias,

- 1º dia: Média = 2,29W
Desvio Padrão = 1,14W
Variância = 1,29 W²
- 2º dia: Média = 2,19W
Desvio Padrão = 1,09W
Variância = 1,18 W²
- 3º dia: Média = 1,79W
Desvio Padrão = 1,08W
Variância = 1,16 W²

A variância foi utilizada para que fosse encontrado o desvio padrão, que por sua vez é uma medida de dispersão em torno da média. Quanto menor for o seu valor, mais homogêneo são os resultados.

No terceiro dia de medição, nos horários de 13 horas e 15 horas, o sol estava encoberto por nuvens, o que ocasionou em uma queda da potência gerada e conseqüentemente piores valores de média, desvio padrão e variância. Estes resultados foram utilizados como referência para analisar o rendimento dos seguidores solar.

4.2 Seguidor solar de dois eixos com algoritmo fixo de controle

Este seguidor apresentou bons resultados em campo, sempre mantendo a placa fotovoltaica voltada para o sol, as Tabelas 5, 6 e 7 apresentam as medições realizadas nos dias 18, 19 e 20 de outubro de 2017, respectivamente.

Tabela 5 - Dados seguidor solar 2 eixos algoritmo fixo em 18/10/2017.

Hora	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)
8:00	7,24	0,39	2,8236
9:00	7,01	0,45	3,1545
10:00	6,91	0,5	3,455
11:00	6,99	0,5	3,495
12:00	6,8	0,51	3,468
13:00	6,66	0,46	3,0636
14:00	6,9	0,59	4,071
15:00	6,83	0,57	3,8931
16:00	7,1	0,51	3,621
17:00	7,07	0,43	3,0401
18:00	7,05	0,26	1,833

Fonte: Próprio autor.

Tabela 6 - Dados seguidor solar 2 eixos algoritmo fixo em 19/10/2017.

Hora	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)
8:00	7,2	0,4	2,88
9:00	7,16	0,45	3,222
10:00	6,98	0,49	3,4202
11:00	6,85	0,5	3,425
12:00	6,56	0,48	3,1488
13:00	6,7	0,51	3,417

14:00	6,69	0,52	3,4788
15:00	6,74	0,51	3,4374
16:00	6,79	0,5	3,395
17:00	7,02	0,41	2,8782
18:00	6,95	0,22	1,529

Fonte: Próprio autor.

Tabela 7 - Dados seguidor solar 2 eixos algoritmo fixo em 20/10/2017.

Hora	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)
8:00	7,15	0,35	2,5025
9:00	7,05	0,42	2,961
10:00	6,97	0,54	3,7638
11:00	6,72	0,49	3,2928
12:00	6,85	0,52	3,562
13:00	6,47	0,11	0,7117
14:00	6,65	0,52	3,458
15:00	6,59	0,13	0,8567
16:00	6,88	0,47	3,2336
17:00	6,81	0,4	2,724
18:00	6,91	0,27	1,8657

Fonte: Próprio autor.

Os cálculos das potências foram feitos utilizando a equação (8). De posse dos dados e utilizando o software Minitab 18, foram calculadas a média, variância e desvio padrão da potência gerada nos três dias,

- 1º dia: Média = 3,26W
Desvio Padrão = 0,604W
Variância = 0,365 W²
- 2º dia: Média = 3,11W
Desvio Padrão = 0,569W
Variância = 0,323 W²
- 3º dia: Média = 2,63W
Desvio Padrão = 1,06W
Variância = 1,12 W²

No terceiro dia de medição, nos horários de 13 horas e 15 horas, o sol estava encoberto por nuvens, o que ocasionou em uma queda da potência gerada e consequentemente piores valores de média, desvio padrão e variância.

Em comparação com a placa fotovoltaica fixa, esse seguidor obteve um rendimento médio superior de 42,36% para o primeiro dia, de 42,01% para o segundo dia e de 46,93% para o terceiro dia. Seus desvios padrões também foram substancialmente menores, exceto para o terceiro dia, onde nuvens ocasionaram um maior desvio padrão.

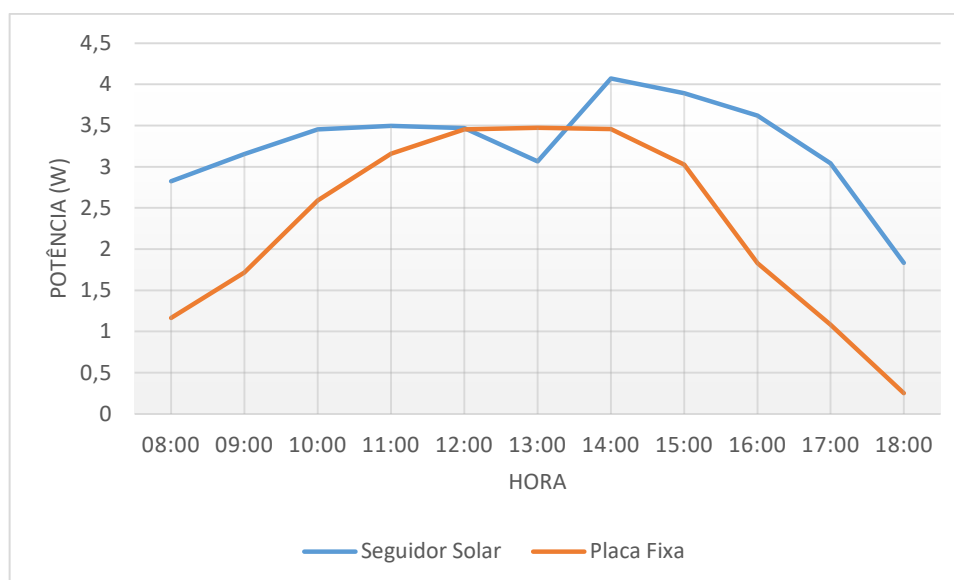


Figura 32 – Gráfico da potência gerada pelo seguidor Solar 2 com eixos e algoritmo fixo em comparação com a placa fotovoltaica fixa ao longo do dia 18/10/2017.

Fonte: Próprio Autor.

As Figuras 32, 33 e 34 são representações gráficas da potência produzida pelo seguidor em comparação com a placa fixa, elas nos dão uma melhor visão dos resultados apresentados nas Tabelas 5, 6 e 7.

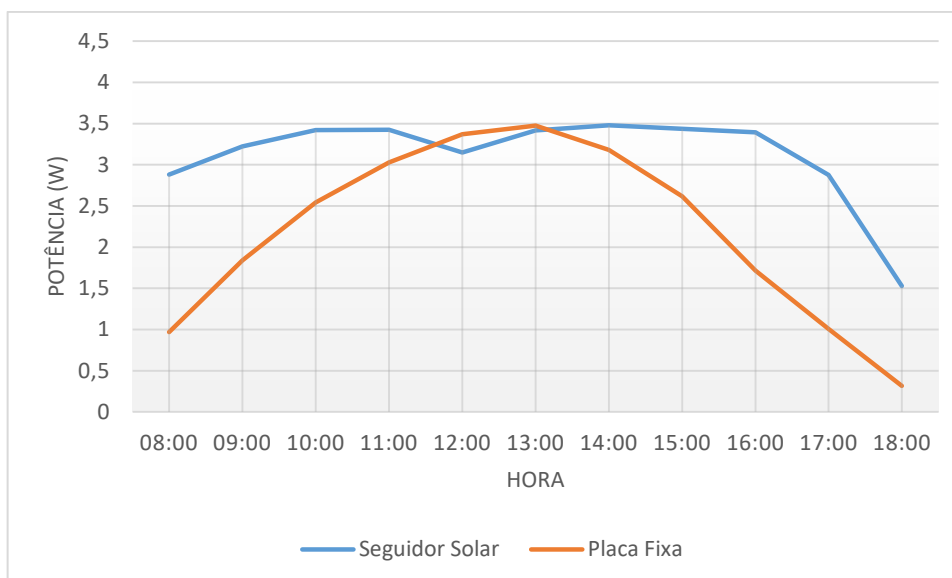


Figura 33 - Gráfico da potência gerada pelo seguidor Solar 2 com eixos e algoritmo fixo em comparação com a placa fotovoltaica fixa ao longo do dia 19/10/2017.

Fonte: Próprio Autor.

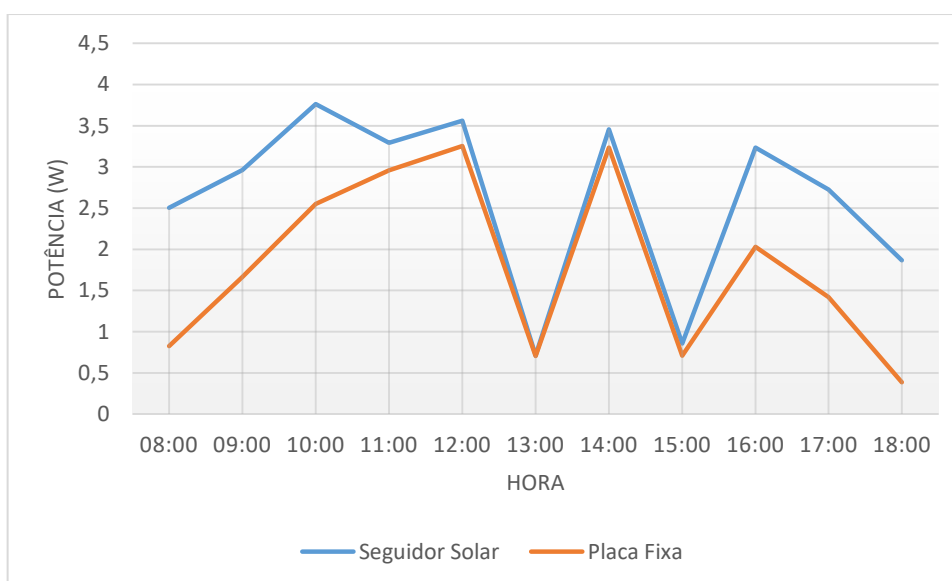


Figura 34 - Gráfico da potência gerada pelo seguidor Solar 2 com eixos e algoritmo fixo em comparação com a placa fotovoltaica fixa ao longo do dia 20/10/2017.

Fonte: Próprio Autor.

Por meio da análise das Figuras 32, 33 e 34, percebeu-se que o seguidor solar apresenta uma produção de energia muito mais estável que a da placa fixa, destacando-se principalmente na parte do início da manhã e no final da tarde, onde a

produção da placa fixa cai consideravelmente, enquanto a do seguidor ainda se mantém alta (em torno de 2 W).

4.3 Seguidor solar de dois eixos com rastreamento dinâmico

Este seguidor apresentou bons resultados em campo, porém verificou-se a necessidade de alteração nos suportes dos sensores LDR. Tais suportes têm de ter sua abertura reduzida, de modo que não faça sombra sobre os sensores somente quando estiverem perpendiculares em relação aos raios solares. As Tabelas 8, 9 e 10 apresentam as medições realizadas nos dias 18, 19 e 20 de outubro de 2017, respectivamente.

Tabela 8 - Dados seguidor solar 2 eixos rastreamento dinâmico em 18/10/2017.

Hora	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)
8:00	7,24	0,4	2,896
9:00	7,09	0,45	3,1905
10:00	6,87	0,47	3,2289
11:00	7,05	0,48	3,384
12:00	6,64	0,43	2,8552
13:00	6,86	0,52	3,5672
14:00	6,75	0,57	3,8475
15:00	6,91	0,57	3,9387
16:00	6,94	0,5	3,47
17:00	7	0,39	2,73
18:00	7,09	0,31	2,1979

Fonte: Próprio autor.

Tabela 9 - Dados seguidor solar 2 eixos rastreamento dinâmico em 19/10/2017.

Hora	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)
8:00	7,26	0,39	2,8314
9:00	7,16	0,47	3,3652
10:00	7,06	0,46	3,2476
11:00	6,88	0,48	3,3024
12:00	6,93	0,51	3,5343
13:00	6,91	0,51	3,5241

14:00	6,87	0,47	3,2289
15:00	6,89	0,48	3,3072
16:00	6,86	0,49	3,3614
17:00	7,06	0,41	2,8946
18:00	6,97	0,26	1,8122

Fonte: Próprio autor.

Tabela 10 - Dados seguidor solar 2 eixos rastreamento dinâmico em 20/10/2017.

Hora	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)
8:00	7,17	0,37	2,6529
9:00	7,12	0,45	3,204
10:00	7,03	0,52	3,6556
11:00	6,82	0,47	3,2054
12:00	6,66	0,51	3,3966
13:00	6,45	0,11	0,7095
14:00	6,71	0,5	3,355
15:00	6,51	0,13	0,8463
16:00	6,87	0,44	3,0228
17:00	6,9	0,4	2,76
18:00	7	0,28	1,96

Fonte: Próprio autor.

Os cálculos das potências foram feitos utilizando a equação (8). De posse dos dados e utilizando o software Minitab 18, foram calculadas a média, variância e desvio padrão da potência gerada nos três dias,

- 1º dia: Média = 3,21W
Desvio Padrão = 0,514W
Variância = 0,264 W²
- 2º dia: Média = 3,12W
Desvio Padrão = 0,489W
Variância = 0,239 W²
- 3º dia: Média = 2,61W
Desvio Padrão = 1,02W
Variância = 1,03 W²

No terceiro dia de medição, nos horários de 13 horas e 15 horas, o sol estava encoberto por nuvens, o que ocasionou em uma queda da potência gerada e consequentemente piores valores de média, desvio padrão e variância.

Em comparação com a placa fotovoltaica fixa, esse seguidor obteve um rendimento médio superior de 40,17% para o primeiro dia, de 42,46% para o segundo dia e de 45,81% para o terceiro dia. Seus desvios padrões também foram substancialmente menores, exceto para o terceiro dia, onde nuvens ocasionaram um maior desvio padrão.

As Figuras 35, 36 e 37 são representações gráficas da potência produzida pelo seguidor em comparação com a placa fixa, elas nos dão uma melhor visão dos resultados apresentados nas Tabelas 8, 9 e 10.

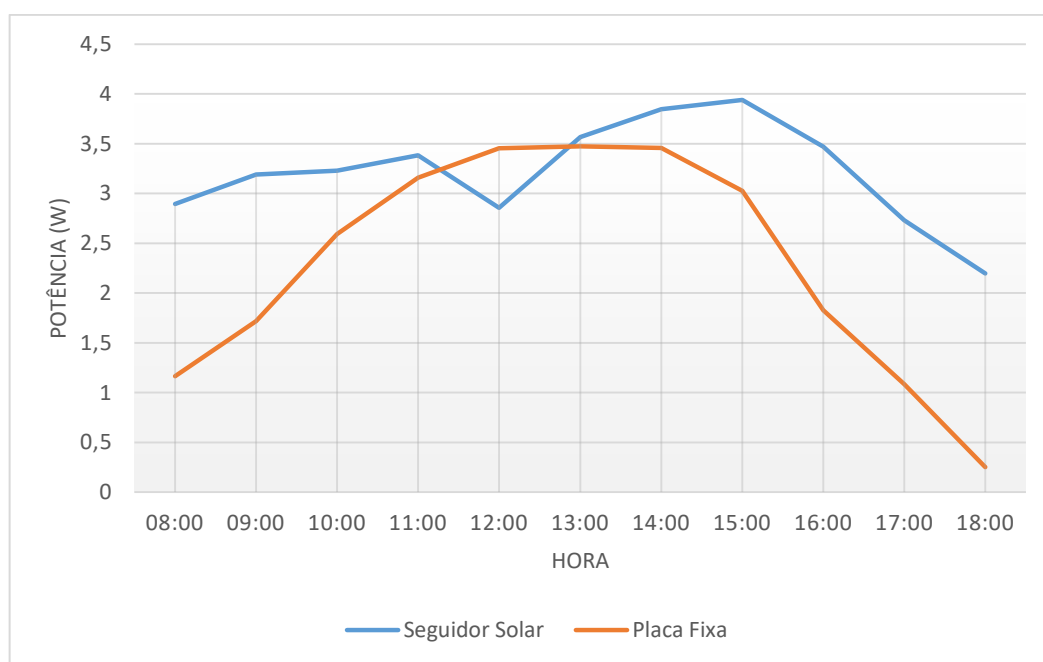


Figura 35 – Gráfico da potência gerada pelo seguidor solar 2 eixos e rastreamento dinâmico em comparação com a placa fotovoltaica fixa ao longo do dia 18/10/2017.

Fonte: Próprio autor.

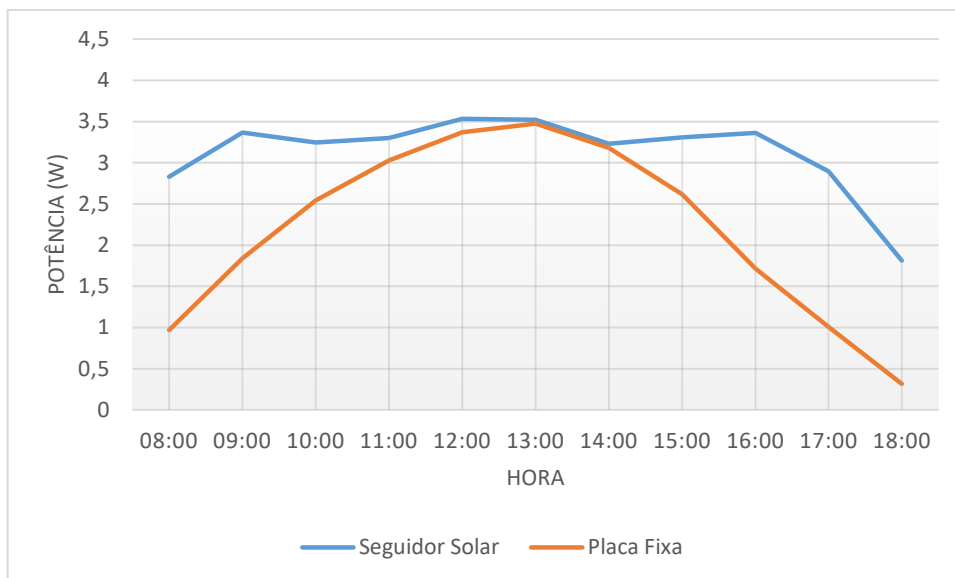


Figura 36 – Gráfico da potência gerada pelo seguidor solar 2 eixos e rastreamento dinâmico em comparação com a placa fotovoltaica fixa ao longo do dia 19/10/2017.

Fonte: Próprio autor.

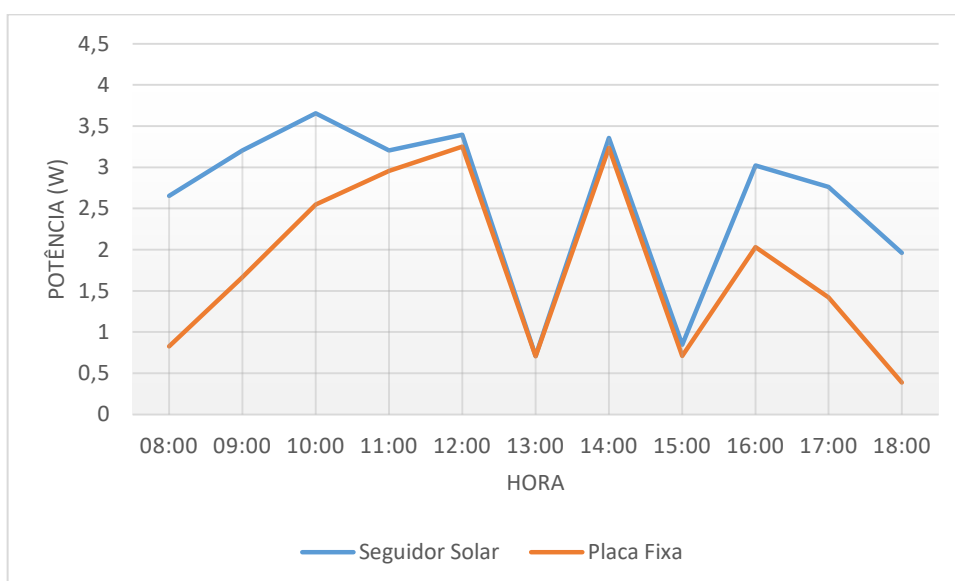


Figura 37 – Gráfico da potência gerada pelo seguidor solar 2 eixos e rastreamento dinâmico em comparação com a placa fotovoltaica fixa ao longo do dia 20/10/2017.

Fonte: Próprio autor.

Por meio da análise das Figuras 35, 36 e 37, percebeu-se que o seguidor solar apresenta uma produção de energia muito mais estável que a da placa fixa, destacando-se principalmente na parte do início da manhã e no final da tarde, onde a

produção da placa fixa cai consideravelmente (em torno de 0,5 W), enquanto a do seguidor ainda se mantém alta (em torno de 2 W).

4.4 Seguidor solar de um eixo horizontal com algoritmo fixo

Este seguidor apresentou bons resultados quando a altura solar tinha valores mais baixos, que é no início da manhã e no final da tarde. Isso ocorreu, pois, o eixo responsável pela altura solar foi fixado com a latitude do local de medição, que é de aproximadamente 20°. As Tabelas 11, 12 e 13 apresentam as medições realizadas nos dias 18, 19 e 20 de outubro de 2017, respectivamente.

Tabela 11 - Dados seguidor solar 1 eixo horizontal algoritmo fixo em 18/10/2017.

Hora	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)
8:00	7,34	0,41	3,0094
9:00	7,06	0,42	2,9652
10:00	6,95	0,44	3,058
11:00	6,75	0,35	2,3625
12:00	6,51	0,27	1,7577
13:00	6,43	0,31	1,9933
14:00	6,83	0,41	2,8003
15:00	6,76	0,52	3,5152
16:00	7,13	0,51	3,6363
17:00	7,04	0,42	2,9568
18:00	6,97	0,17	1,1849

Fonte: Próprio autor.

Tabela 12 - Dados seguidor solar 1 eixo horizontal algoritmo fixo em 19/10/2017.

Hora	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)
8:00	7,2	0,42	3,024
9:00	7,14	0,44	3,1416
10:00	6,9	0,43	2,967
11:00	6,74	0,37	2,4938
12:00	6,4	0,28	1,792
13:00	6,46	0,27	1,7442
14:00	6,52	0,37	2,4124
15:00	6,64	0,45	2,988

16:00	6,78	0,48	3,2544
17:00	7,02	0,41	2,8782
18:00	6,88	0,24	1,6512

Fonte: Próprio autor.

Tabela 13 - Dados seguidor solar 1 eixo horizontal algoritmo fixo em 20/10/2017.

Hora	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)
8:00	7,13	0,36	2,5668
9:00	7,03	0,42	2,9526
10:00	6,91	0,47	3,2477
11:00	6,7	0,36	2,412
12:00	6,65	0,26	1,729
13:00	6,32	0,07	0,4424
14:00	6,5	0,38	2,47
15:00	6,53	0,11	0,7183
16:00	6,9	0,47	3,243
17:00	6,8	0,4	2,72
18:00	6,89	0,24	1,6536

Fonte: Próprio autor.

Os cálculos das potências foram feitos utilizando a equação (8). De posse dos dados e utilizando o software Minitab 18, foram calculadas a média, variância e desvio padrão da potência gerada nos três dias,

- 1º dia: Média = 2,66 W
Desvio Padrão = 0,754 W
Variância = 0,569 W²
- 2º dia: Média = 2,58 W
Desvio Padrão = 0,599 W
Variância = 0,359 W²
- 3º dia: Média = 2,20 W
Desvio Padrão = 0,953 W
Variância = 0,908 W²

No terceiro dia de medição, nos horários de 13 horas e 15 horas, o sol estava encoberto por nuvens, o que ocasionou em uma queda da potência gerada e consequentemente piores valores de média, desvio padrão e variância.

Em comparação com a placa fotovoltaica fixa, esse seguidor obteve um rendimento médio superior de 16,16% para o primeiro dia, de 17,81% para o segundo dia e de 22,91% para o terceiro dia. Seus desvios padrões também foram menores, porém no terceiro dia teve um aumento, devido ao fato de nuvens ocasionarem uma maior variação nas medições.

As Figuras 38, 39 e 40 são representações gráficas da potência produzida pelo seguidor em comparação com a placa fixa, elas nos dão uma melhor visão dos resultados apresentados nas Tabelas 11, 12 e 13.

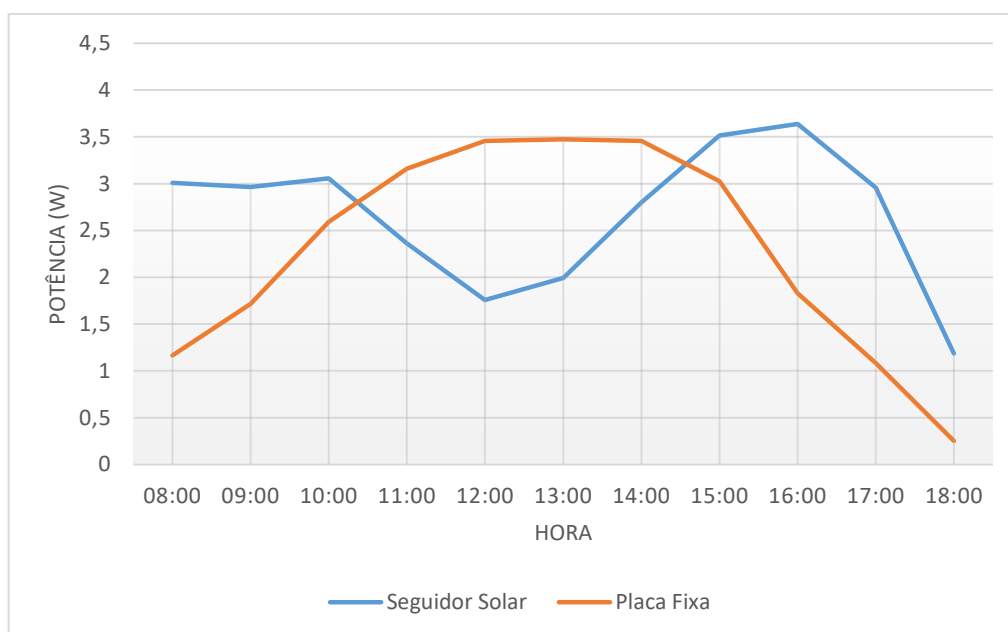


Figura 38 – Gráfico da potência gerada pelo seguidor solar 1 eixo horizontal e algoritmo fixo em comparação com a placa fotovoltaica fixa ao longo do dia 18/10/2017.

Fonte: Próprio autor.

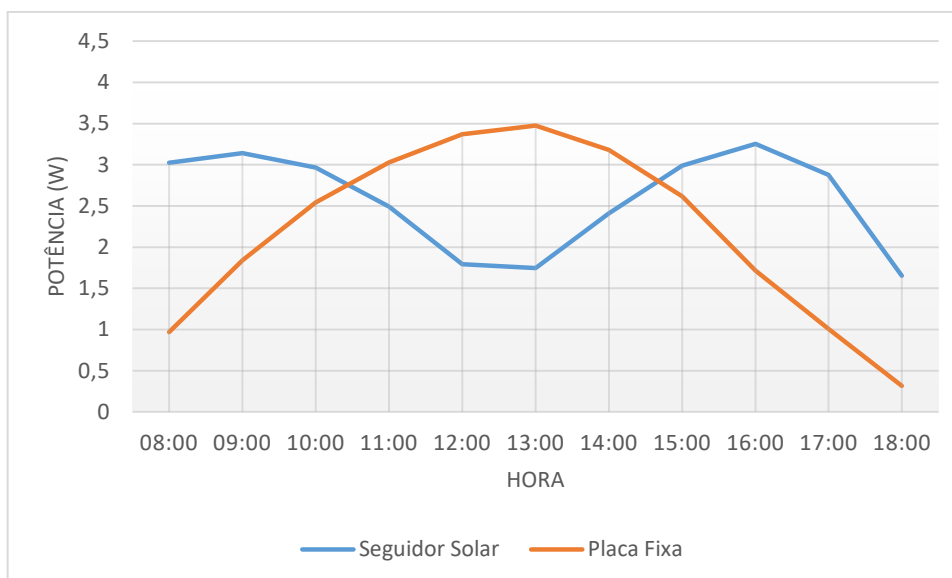


Figura 39 – Gráfico da potência gerada pelo seguidor solar 1 eixo horizontal e algoritmo fixo em comparação com a placa fotovoltaica fixa ao longo do dia 19/10/2017.

Fonte: Próprio autor.

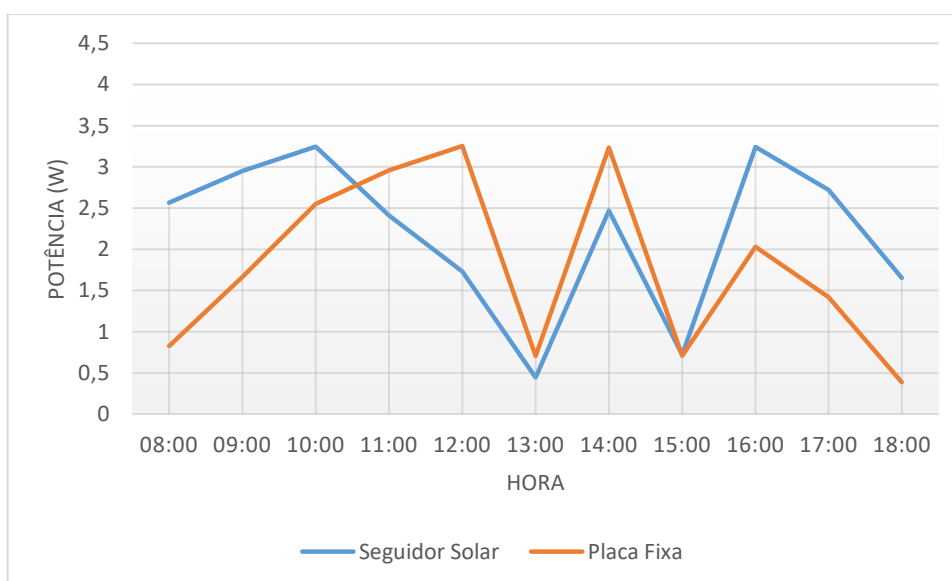


Figura 40 – Gráfico da potência gerada pelo seguidor solar 1 eixo horizontal e algoritmo fixo em comparação com a placa fotovoltaica fixa ao longo do dia 20/10/2017.

Fonte: Próprio autor.

Por meio da análise das Figuras 38, 39 e 40, percebeu-se que, no período de 8 às 10 horas, e depois das 15 horas, o seguidor solar apresenta uma produção de energia maior e mais estável que a da placa fixa. Porém no período em que a placa

fixa atinge seu ápice de produção, o seguidor tem uma queda, devido ao fato do ângulo da altura solar estar muito maior que o ângulo do seguidor.

Por meio desses resultados, faz-se necessário o estudo de novos ângulos a serem usados na altura solar, que não seja o da latitude do local, a fim de melhorar o desempenho do seguidor. Uma outra estratégia que pode ser estudada é, a partir das 10 até as 15 horas, fazer com que o painel fique apontado para o norte, similarmente a placa fixa, que é o período de maior produção dela.

4.5 Seguidor solar de um eixo horizontal com rastreamento dinâmico

Esse seguidor apresentou bons resultados quando a altura solar tinha valores mais baixos, que é no início da manhã e no final da tarde. Isso ocorreu, pois, o eixo responsável pela altura solar foi fixado com a latitude do local de medição, que é de aproximadamente 20°. As Tabelas 14, 15 e 16 apresentam as medições realizadas nos dias 18, 19 e 20 de outubro de 2017, respectivamente.

Tabela 14 - Dados seguidor solar 1 eixo horizontal rastreamento dinâmico em 18/10/2017.

Hora	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)
8:00	7,18	0,42	3,0156
9:00	7,1	0,45	3,195
10:00	6,92	0,43	2,9756
11:00	6,97	0,38	2,6486
12:00	6,39	0,21	1,3419
13:00	6,58	0,3	1,974
14:00	6,74	0,44	2,9656
15:00	6,8	0,5	3,4
16:00	6,9	0,48	3,312
17:00	6,98	0,46	3,2108
18:00	7,06	0,33	2,3298

Fonte: Próprio autor.

Tabela 15 - Dados seguidor solar 1 eixo horizontal rastreamento dinâmico em 19/10/2017.

Hora	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)
8:00	7,2	0,41	2,952

9:00	7,09	0,44	3,1196
10:00	7,06	0,43	3,0358
11:00	6,73	0,36	2,4228
12:00	6,74	0,25	1,685
13:00	6,48	0,27	1,7496
14:00	6,76	0,38	2,5688
15:00	6,77	0,44	2,9788
16:00	6,78	0,48	3,2544
17:00	7,5	0,41	3,075
18:00	6,95	0,26	1,807

Fonte: Próprio autor.

Tabela 16 - Dados seguidor solar 1 eixo horizontal rastreamento dinâmico em 20/10/2017.

Hora	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)
8:00	7,2	0,38	2,736
9:00	7,09	0,44	3,1196
10:00	6,98	0,46	3,2108
11:00	6,63	0,36	2,3868
12:00	6,45	0,23	1,4835
13:00	6,38	0,06	0,3828
14:00	6,55	0,38	2,489
15:00	6,48	0,10	0,648
16:00	6,87	0,33	2,2671
17:00	6,91	0,44	3,0404
18:00	6,97	0,29	2,0213

Fonte: Próprio autor.

Os cálculos das potências foram feitos utilizando a equação (8). De posse dos dados e utilizando o software Minitab 18, foram calculadas a média, variância e desvio padrão da potência gerada nos três dias,

- 1º dia: Média = 2,76 W
Desvio Padrão = 0,639 W
Variância = 0,409 W²
- 2º dia: Média = 2,60 W
Desvio Padrão = 0,600 W
Variância = 0,360 W²

- 3º dia: Média = 2,16 W
Desvio Padrão = 0,960 W
Variância = 0,922 W²

No terceiro dia de medição, nos horários de 13 horas e 15 horas, o sol estava encoberto por nuvens, o que ocasionou em uma queda da potência gerada e consequentemente piores valores de média, desvio padrão e variância.

Em comparação com a placa fotovoltaica fixa, esse seguidor obteve um rendimento médio superior de 20,52% para o primeiro dia, de 18,72% para o segundo dia e de 20,67% para o terceiro dia. Seus desvios padrões também foram menores e mantiveram próximos de um dia para o outro, exceto para o terceiro dia, onde nuvens ocasionaram um maior desvio padrão.

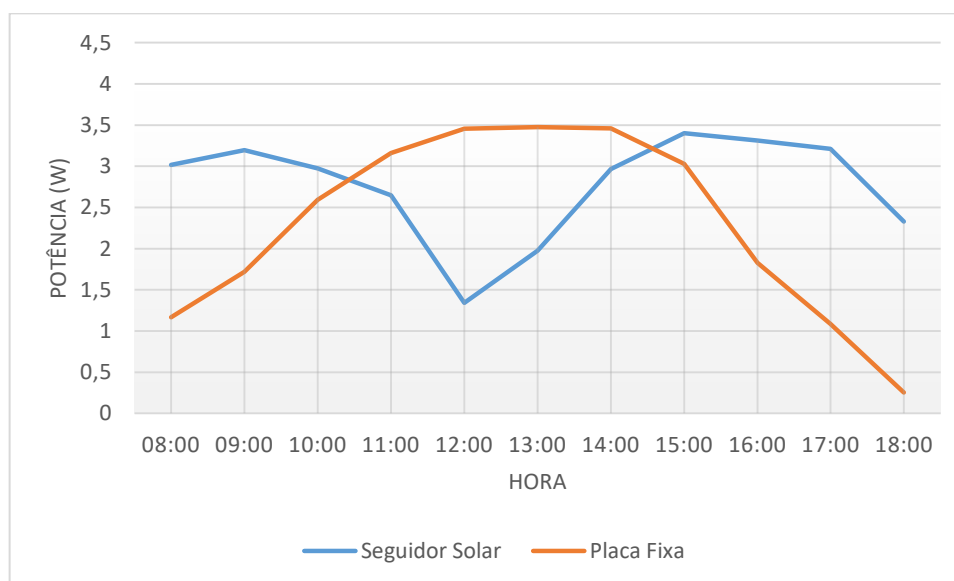


Figura 41 – Gráfico da potência gerada pelo seguidor solar 1 eixo horizontal e rastreamento dinâmico em comparação com a placa fotovoltaica fixa ao longo do dia 18/10/2017.

Fonte: Próprio autor.

As Figuras 41, 42 e 43 são representações gráficas da potência produzida pelo seguidor em comparação com a placa fixa, elas nos dão uma melhor visão dos resultados apresentados nas Tabelas 14, 15 e 16.

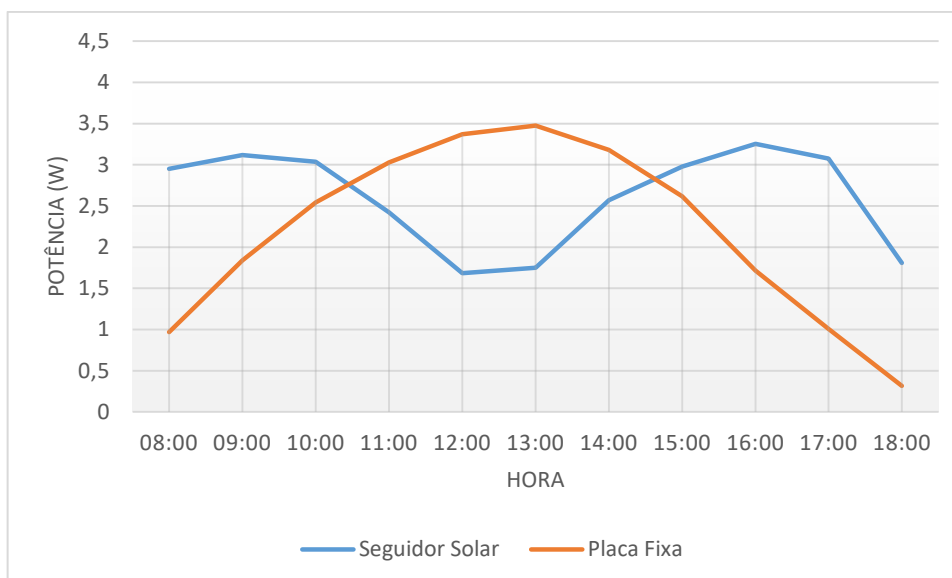


Figura 42 – Gráfico da potência gerada pelo seguidor solar 1 eixo horizontal e rastreamento dinâmico em comparação com a placa fotovoltaica fixa ao longo do dia 19/10/2017.

Fonte: Próprio autor.

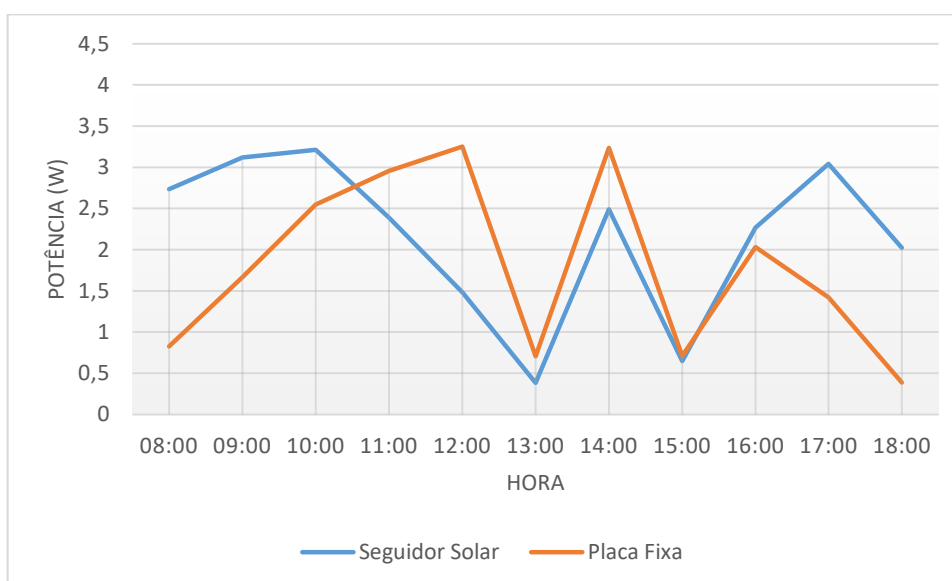


Figura 43 – Gráfico da potência gerada pelo seguidor solar 1 eixo horizontal e rastreamento dinâmico em comparação com a placa fotovoltaica fixa ao longo do dia 20/10/2017.

Fonte: Próprio autor.

Por meio da análise das Figuras 41, 42 e 43, percebeu-se que, no período de 8 às 10 horas, e depois das 15 horas, o seguidor solar apresenta uma produção de energia maior e mais estável que a da placa fixa. Porém no período em que a placa

fixa atinge seu ápice de produção, o seguidor tem uma queda, devido ao fato do ângulo da altura solar estar muito maior que o ângulo do seguidor.

Por meio desses resultados, faz-se necessário o estudo de novos ângulos a serem usados na altura solar, que não seja o da latitude do local, a fim de melhorar o desempenho do seguidor.

4.6 Seguidor solar de um eixo vertical com algoritmo fixo

Este seguidor apresentou bons resultados somente quando a altura solar tinha valores altos, acima de 60° , que é no fim da manhã e no início da tarde. Nos outros horários a potência produzida foi baixa, sendo inferior a potência gerada pela placa fixa. As Tabelas 17, 18 e 19 apresentam as medições realizadas nos dias 18, 19 e 20 de outubro de 2017, respectivamente.

Tabela 17 - Dados seguidor solar 1 eixo vertical algoritmo fixo em 18/10/2017.

Hora	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)
8:00	6,75	0,07	0,4725
9:00	6,78	0,17	1,1526
10:00	6,85	0,3	2,055
11:00	6,89	0,43	2,9627
12:00	6,76	0,5	3,38
13:00	6,75	0,46	3,105
14:00	6,91	0,53	3,6623
15:00	6,65	0,37	2,4605
16:00	6,68	0,17	1,1356
17:00	6,08	0,04	0,2432
18:00	6,15	0,03	0,1845

Fonte: Próprio autor.

Tabela 18 - Dados seguidor solar 1 eixo vertical algoritmo fixo em 19/10/2017.

Hora	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)
8:00	6,49	0,05	0,3245
9:00	6,68	0,15	1,002
10:00	6,77	0,3	2,031

11:00	6,77	0,42	2,8434
12:00	6,62	0,5	3,31
13:00	6,67	0,5	3,335
14:00	6,57	0,45	2,9565
15:00	6,5	0,33	2,145
16:00	6,31	0,14	0,8834
17:00	6,38	0,07	0,4466
18:00	5,94	0,02	0,1188

Fonte: Próprio autor.

Tabela 19 - Dados seguidor solar 1 eixo vertical algoritmo fixo em 20/10/2017.

Hora	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)
8:00	6,64	0,09	0,5976
9:00	6,74	0,18	1,2132
10:00	6,78	0,37	2,5086
11:00	6,66	0,43	2,8638
12:00	6,79	0,5	3,395
13:00	6,53	0,12	0,7836
14:00	6,57	0,46	3,0222
15:00	6,45	0,1	0,645
16:00	6,38	0,14	0,8932
17:00	6,06	0,06	0,3636
18:00	6,16	0,03	0,1848

Fonte: Próprio autor.

Os cálculos das potências foram feitos utilizando a equação (8). De posse dos dados e utilizando o software Minitab 18, foram calculadas a média, variância e desvio padrão da potência gerada nos três dias,

- 1º dia: Média = 1,89 W
Desvio Padrão = 1,31 W
Variância = 1,71 W²
- 2º dia: Média = 1,76 W
Desvio Padrão = 1,25 W
Variância = 1,55 W²
- 3º dia: Média = 1,50 W
Desvio Padrão = 1,20 W

$$\text{Variância} = 1,43 \text{ W}^2$$

No terceiro dia de medição, nos horários de 13 horas e 15 horas, o sol estava encoberto por nuvens, o que ocasionou em uma queda da potência gerada e consequentemente piores valores de média, desvio padrão e variância.

Em comparação com a placa fotovoltaica fixa, esse seguidor obteve um rendimento médio inferior de 17,47% para o primeiro dia, de 19,63% para o segundo dia e de 16,20% para o terceiro dia. Além de um rendimento inferior a placa fixa, seus desvios padrões também foram maiores.

As Figuras 44, 45 e 46 são representações gráficas da potência produzida pelo seguidor em comparação com a placa fixa, elas nos dão uma melhor visão dos resultados apresentados nas Tabelas 17, 18 e 19.

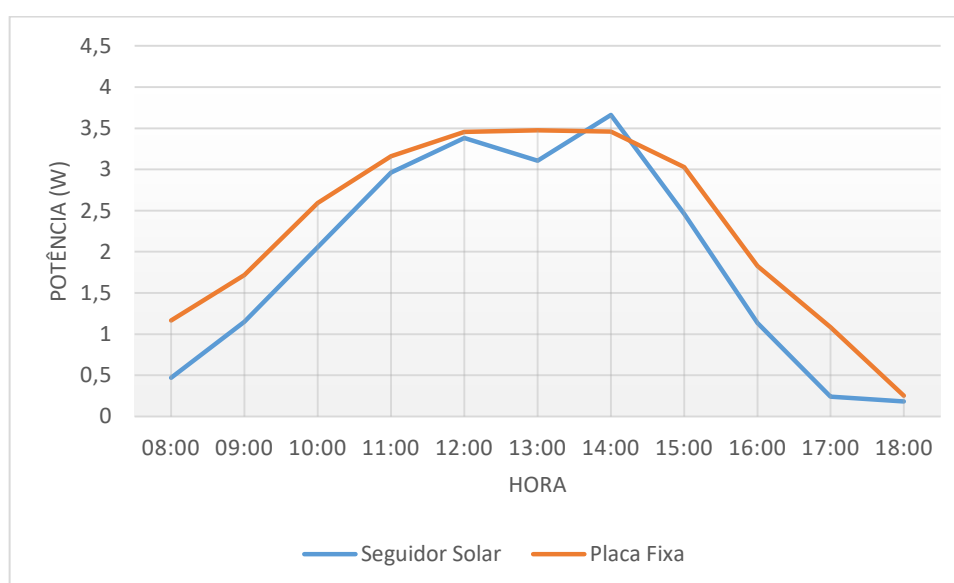


Figura 44 – Gráfico da potência gerada pelo seguidor solar 1 eixo horizontal e algoritmo fixo em comparação com a placa fotovoltaica fixa ao longo do dia 18/10/2017.

Fonte: Próprio autor.

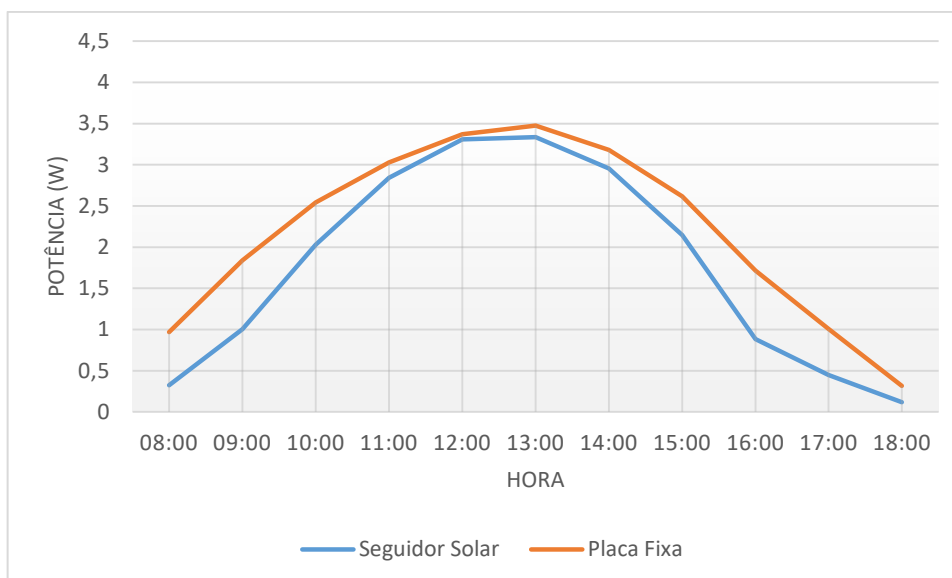


Figura 45 – Gráfico da potência gerada pelo seguidor solar 1 eixo horizontal e algoritmo fixo em comparação com a placa fotovoltaica fixa ao longo do dia 19/10/2017.

Fonte: Próprio autor.

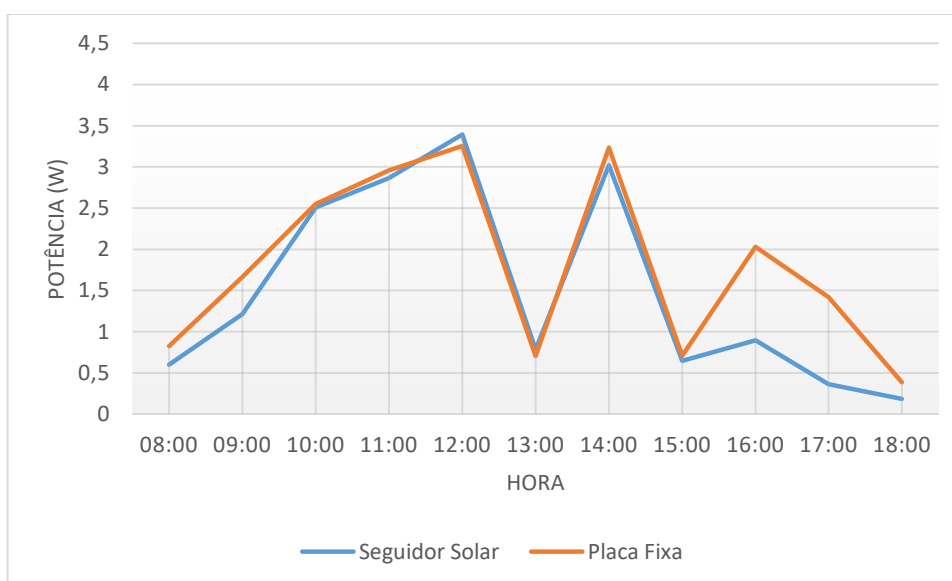


Figura 46 – Gráfico da potência gerada pelo seguidor solar 1 eixo horizontal e algoritmo fixo em comparação com a placa fotovoltaica fixa ao longo do dia 20/10/2017.

Fonte: Próprio autor.

Por meio da análise das Figuras 44, 45 e 46, percebe-se que o ponto máximo de produção das duas placas ocorre no mesmo horário, que é no fim da manhã e no início da tarde. Porém, antes desse horário a produção do seguidor solar é menor que

a placa fixa, o que resulta em uma produção média menor, e inviabiliza a utilização desse tipo de seguidor.

4.7 Seguidor solar de um eixo vertical com rastreamento dinâmico

Este seguidor apresentou bons resultados somente quando a altura solar tinha valores altos, acima de 60°, que é no fim da manhã e no início da tarde. Nos outros horários a potência produzida foi baixa, sendo inferior a potência gerada pela placa fixa. As Tabelas 20, 21 e 22 apresentam as medições realizadas nos dias 18, 19 e 20 de outubro de 2017, respectivamente.

Tabela 20 - Dados seguidor solar 1 eixo vertical e rastreamento dinâmico em 18/10/2017.

Hora	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)
8:00	6,97	0,03	0,2091
9:00	6	0,03	0,18
10:00	5,86	0,03	2,9627
11:00	6,91	0,49	3,3859
12:00	6,88	0,51	3,5088
13:00	6,63	0,43	2,8509
14:00	6,72	0,51	3,4272
15:00	6,73	0,38	2,5574
16:00	6,53	0,2	1,306
17:00	6,51	0,11	0,7161
18:00	6,32	0,04	0,2528

Fonte: Próprio autor.

Tabela 21 - Dados seguidor solar 1 eixo vertical e rastreamento dinâmico em 19/10/2017.

Hora	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)
8:00	6,22	0,02	0,1244
9:00	6,06	0,02	0,1212
10:00	6,93	0,42	2,9106
11:00	6,89	0,48	3,3072
12:00	6,9	0,51	3,519
13:00	6,68	0,48	3,2064
14:00	6,73	0,43	2,8939

15:00	6,64	0,35	2,324
16:00	6,52	0,24	1,5648
17:00	6,24	0,07	0,4368
18:00	5,78	0,02	0,1156

Fonte: Próprio autor.

Tabela 22 Dados seguidor solar 1 eixo vertical e rastreamento dinâmico em 20/10/2017.

Hora	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)
8:00	6,32	0,03	0,1896
9:00	6,22	0,03	0,1866
10:00	6,97	0,46	3,2062
11:00	6,72	0,48	3,2256
12:00	6,74	0,51	3,4374
13:00	6,43	0,11	0,7073
14:00	6,57	0,45	2,9565
15:00	6,52	0,11	0,7172
16:00	6,57	0,25	1,6425
17:00	6,45	0,14	0,903
18:00	6,29	0,05	0,3145

Fonte: Próprio autor.

Os cálculos das potências foram feitos utilizando a equação (8). De posse dos dados e utilizando o software Minitab 18, foram calculadas a média, variância e desvio padrão da potência gerada nos três dias,

- 1º dia: Média = 1,94 W
Desvio Padrão = 1,41 W
Variância = 1,99 W²
- 2º dia: Média = 1,87 W
Desvio Padrão = 1,42 W
Variância = 2,02 W²
- 3º dia: Média = 1,59 W
Desvio Padrão = 1,35 W
Variância = 1,81 W²

No terceiro dia de medição, nos horários de 13 horas e 15 horas, o sol estava encoberto por nuvens, o que ocasionou em uma queda da potência gerada e consequentemente piores valores de média, desvio padrão e variância.

Em comparação com a placa fotovoltaica fixa, esse seguidor obteve um rendimento médio inferior de 15,28% para o primeiro dia, de 14,61% para o segundo dia e de 11,17% para o terceiro dia. Além de um rendimento inferior a placa fixa, seus desvios padrões também foram maiores.

As Figuras 47, 48 e 49 são representações gráficas da potência produzida pelo seguidor em comparação com a placa fixa, elas nos dão uma melhor visão dos resultados apresentados nas Tabelas 20, 21 e 22.

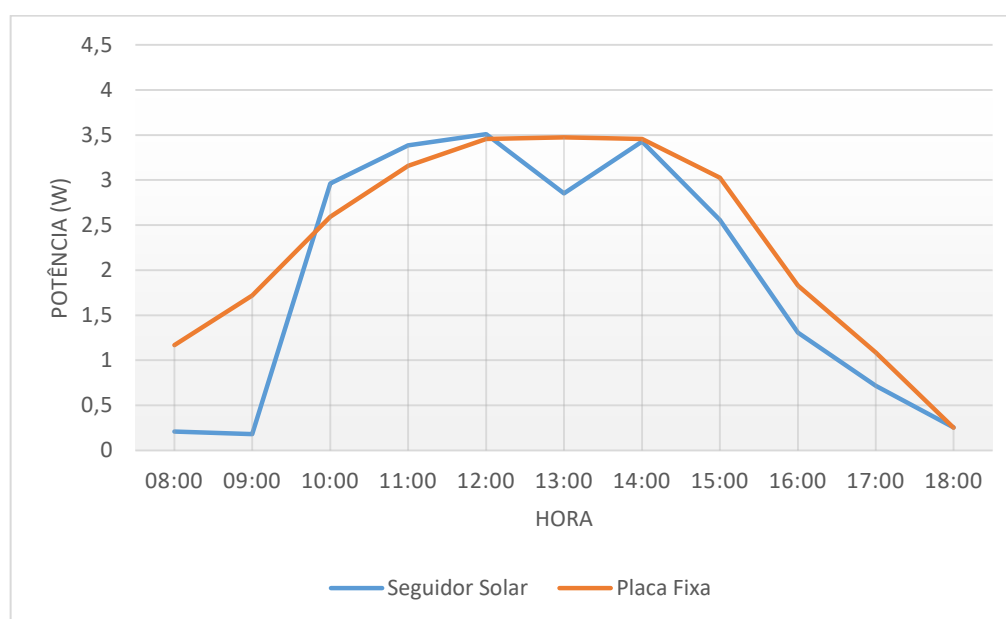


Figura 47 – Gráfico da potência gerada pelo seguidor solar 1 eixo vertical e rastreamento dinâmico em comparação com a placa fotovoltaica fixa ao longo do dia 18/10/2017.

Fonte: Próprio autor.

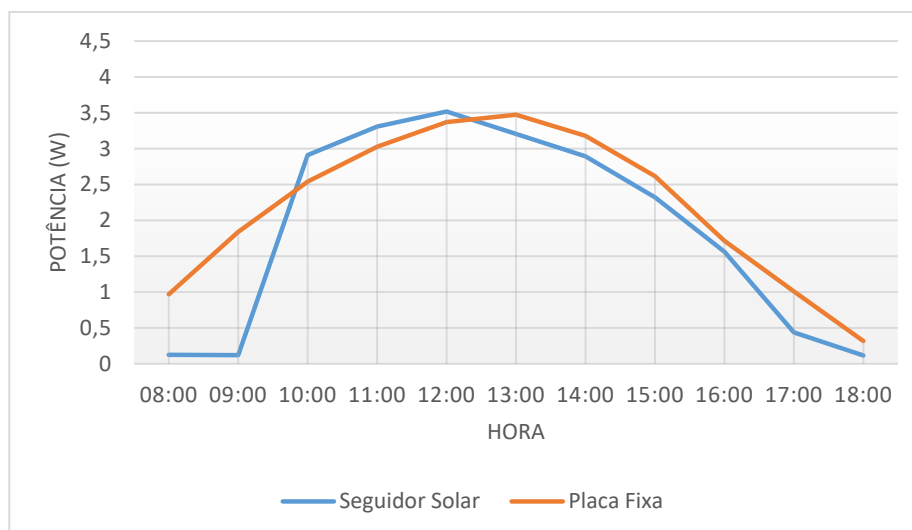


Figura 48 – Gráfico da potência gerada pelo seguidor solar 1 eixo vertical e rastreamento dinâmico em comparação com a placa fotovoltaica fixa ao longo do dia 19/10/2017.

Fonte: Próprio autor.

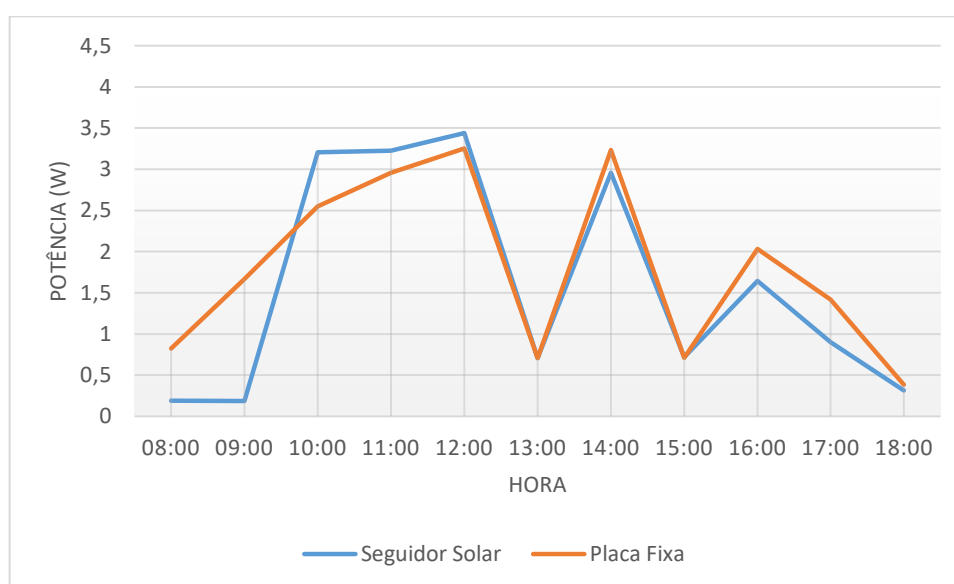


Figura 49 – Gráfico da potência gerada pelo seguidor solar 1 eixo vertical e rastreamento dinâmico em comparação com a placa fotovoltaica fixa ao longo do dia 20/10/2017.

Fonte: Próprio autor.

Por meio da análise das Figuras 47, 48 e 49, percebeu-se que o ponto máximo de produção das duas placas ocorre no mesmo horário, que é no fim da manhã e no início da tarde. Porém, antes desse horário a produção do seguidor solar é menor que a placa fixa, o que resulta em uma produção média menor, e inviabiliza a utilização desse tipo de seguidor.

Nos horários de 8 e 9 horas dos três dias, os sensores não tinham muita incidência direta do sol sobre eles, devido a isso, eles identificavam os raios refletidos pela superfície em que estava fixado, como o ponto com maior iluminação, ocasionando em uma baixa potência produzida.

Tabela 23 - Rendimentos dos diferentes tipos de seguidores em relação a placa fixa.

Protótipo de seguidor solar	Rendimento (%) do protótipo em relação ao painel fixo em 18/10/2017	Rendimento (%) do protótipo em relação ao painel fixo em 19/10/2017	Rendimento (%) do protótipo em relação ao painel fixo em 20/10/2017
2 eixos com algoritmo fixo de controle	42,36	42,01	46,93
2 eixos com rastreamento dinâmico	40,17	42,46	45,81
1 eixo horizontal variando o ângulo azimutal e eixo vertical com ângulo de 20°	16,16	17,81	22,91
1 eixo horizontal com rastreamento dinâmico e eixo vertical com ângulo de 20°	20,52	18,72	20,67
1 eixo vertical variando a altura solar e eixo horizontal apontando para o norte	-17,47	-19,63	-16,20
1 eixo vertical com rastreamento dinâmico e eixo horizontal apontando para o norte	-15,28	-14,61	-11,17

Fonte: Próprio autor.

Como forma de resumir os resultados obtidos na Tabela 23 apresenta-se um panorama do rendimento dos seguidores em relação ao painel fotovoltaico fixo.

Baseado nos valores apresentados pode-se concluir que os seguidores de dois eixos e de um eixo horizontal com rastreamento dinâmico apresentam o melhor rendimento em relação ao painel fotovoltaico fixo. Já os seguidores com um eixo vertical apresentam um desempenho inferior ao painel fotovoltaico fixo. Na próxima seção são apresentados os custos estimados para a construção dos protótipos de seguidores solar desenvolvidos neste trabalho de conclusão de curso.

4.8 Levantamento de custo de construção dos protótipos

O levantamento dos custos foi realizado levando em consideração os gastos com peças, componentes e partes constituintes dos protótipos, e as Tabelas 24 e 25 apresentam uma estimativa destes gastos.

Tabela 24 - Orçamento e descritivo dos gastos estimados com o protótipo de rastreamento dinâmico.

Quantidade/Peça	Valor (R\$)
Chapa de aço 3 mm	15,00
Nylon 1 Pol (barra 40 cm)	30,00
02 Servo-motores MG-995	48,98
Alumínio (Tubo quadrado ½ Pol e chapa)	5,50
Painel solar 6 V	29,90
Cabos e fios de conexões	5,30
Arduino UNO	27,00
04 Sensores LDR	5,60
Pilhas e baterias	12,90
TOTAL	R\$ 180,18

Fonte: Próprio autor.

Tabela 25 - Orçamento e descritivo dos gastos com o protótipo de algoritmo fixo.

Quantidade/Peça	Valor (R\$)
02 Servo-motores MG-995	48,98
Painel solar 6 V	29,90
Cabos e fios de conexões	5,30
Arduino MEGA	41,00
Pilhas e baterias	12,90
Real Time Clock	14,90
TOTAL	152,98

Fonte: Próprio autor.

Por fim, pode-se verificar que o objetivo de construir um protótipo de seguidor solar de baixo custo foi alcançado satisfatoriamente. Verificando os valores expostos nas Tabelas 24 e 25 pode-se visualizar que o seguidor solar desenvolvido neste trabalho apresentou um baixo custo em relação a outros dispositivos geradores de energia elétrica a partir de fontes alternativa (PERLOTTI *et al.*, 2012), ressaltando ainda que na confecção da estrutura dos protótipos utilizou-se materiais reciclados, bem como a escolha dos componentes baseou-se nos seus respectivos valores.

5 CONCLUSÕES

Os seguidores solares são dispositivos eletromecânicos importantes no aumento do rendimento do sistema solar fotovoltaico nos dias de hoje. Assim, o presente trabalho de conclusão de curso apresentou a implementação de dois protótipos de seguidores solares operando em seis tipos de configurações distintas, para assim realizar um estudo mais amplo de rendimento dos seguidores em relação ao painel fotovoltaico fixo.

De posse dos resultados obtidos, pode-se verificar que as configurações de seguidores de dois eixos e os de um eixo horizontal apresentaram ótimos resultados em relação a placa fotovoltaica fixa, sendo que o primeiro obteve rendimento superior a 40% para os dois modos de rastreamento solar, e o segundo apresentou um rendimento superior a 16%, também para os dois modos de rastreamento solar.

Apesar do rendimento superior do seguidor de dois eixos, o seguidor de eixo horizontal não deve ser descartado, principalmente o que utiliza equações fixas. Pois o seu horário de menor rendimento, que é de 11 às 14 horas, é também o horário de maior rendimento da placa fixa, e esse seguidor pode ser alterado para trabalhar, nessa faixa de horário, como uma placa fixa.

O seguidor solar de um eixo vertical serviu para mostrar que não são todos os tipos de seguidores que apresentam rendimento melhor que a placa fixa. Desse modo, para a cidade de Formiga/MG e região, essa configuração não é viável.

Este trabalho nos permitiu observar que ainda há muito a se estudar a respeito da otimização dos sistemas solares e que a hora de desenvolver estes estudos é agora, enquanto estes ainda são objetos de estudo e não uma tecnologia dominada.

O projeto, além de trazer muito conhecimento sobre a área, ampliou os horizontes e permitiu observar que ainda há muito a se estudar a respeito da otimização dos sistemas solares, de modo a aumentar a geração de energia por fontes sustentáveis e limpas, contribuindo assim com a sustentabilidade no planeta.

6 TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros, cita-se as seguintes possibilidades:

- Estudos para melhoria da eficiência dos seguidores solares que tiveram resultados positivos, principalmente o seguidor de 1 eixo horizontal;
- Preparação da estrutura mecânica a fim de garantir que o protótipo possa ser aplicado em campo durante longos períodos, sem que sejam danificados os componentes: fontes de alimentações e/ou controladores, uma vez que o sistema ficará exposto a sol e chuva;
- Implementar a coleta de dados automática, permitindo uma maior amostragem de dados, uma vez que para se realizar medições manuais é exigido muito tempo;
- Desenvolver um seguidor solar conectado à rede.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **BIG – Banco de Informações de Geração**. Disponível em:

<<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>.

Acesso em: 14 de outubro de 2017.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **ENERGIA SOLAR**.

Disponível em: <[http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-energia_solar\(3\).pdf](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-energia_solar(3).pdf)>. Acesso em: 10 de outubro de 2017.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Resolução Normativa Nº 482, 17 de Abril de 2012**. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acesso em: 10 de outubro de 2017.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 687, DE 24 DE NOVEMBRO DE 2015**. Disponível em:

<<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>>. Acesso em: 22 de outubro de 2017.

ALVES, A; CAGNON J. **O desenvolvimento e avaliação de desempenho de um sistema de posicionamento automático para painéis fotovoltaicos**. Botucatu (SP). Revista Energia na Agricultura, vol. 25, n. 2, p.1-19, 2010.

AMÉRICA DO SOL. **Benefícios e Custos da Energia Solar**. Disponível em:

<<http://americadosol.org/beneficios-e-custos-da-energia-solar/>>. Acesso em: 14 de outubro de 2017.

ARDUINO. **Introduction**. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>>. Acesso em: 15 de outubro de 2017.

BERTOLI, G. **Sistemas fotovoltaicos de geração de energia: comparação de desempenho entre um sistema com rastreamento solar e um sistema estático**. Trabalho de Conclusão Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia. Universidade Estadual Paulista, Bauru (SP), 2012.

CASTRO, N.; MARTINI, S.; BRANDÃO, R.; DANTAS, G., TIMPONI, R. **A importância das fontes alternativas e renováveis na evolução da matriz elétrica brasileira**. In: V Seminário de Geração e Desenvolvimento Sustentável. Fundación Mapfre, 2009.

CASTRO, R. M. **INTRODUÇÃO À ENERGIA FOTOVOLTAICA**. Disponível em:

<http://www.troquedeenergia.com/Produtos/LogosDocumentos/Introducao_a_Energia_Fotovoltaica.pdf>. Acesso em: 15 de outubro de 2017.

CEMIG. **CEMIG E GOVERNO ESTADUAL INAUGURAM USINA SOLAR NO MINEIRÃO**. Disponível em: <<http://www.cemig.com.br/sites/Imprensa/pt-br/Paginas/Usina-Solar-do-Mineirao.aspx>>. Acesso em: 14 de outubro de 2017.

COGEN (Associação da Indústria de Cogeração de Energia). **Inserção da Energia Solar no Brasil**. São Paulo; 2012. 79 p.

COPA 2014. **Projeto Mineirão solar**. Disponível em: <<http://www.copa2014.gov.br/pt-br/noticia/inaugurada-usina-solar-fotovoltaica-do-mineirao>>. Acesso em: 14 de outubro de 2017.

CRESESB. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2004.pdf>. Acesso em: 15 de outubro de 2017.

CRESESB. **O Contexto das Energias Renováveis no Brasil**. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Direng.pdf>>. Acesso em: 15 de outubro de 2017.

DIAS, M. **Energia fotovoltaica para linhas de transmissão**. In: XV SNPTEE Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. Foz do Iguaçu (PR), 1999.

EPE (Empresa de Pesquisa Energética). **Análise da Inserção da Geração Solar na Matriz Energética Brasileira**. Rio de Janeiro; 2012. 64 p.

EPE. **Balanco Energético Nacional 2017**. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/S%C3%ADntese%20do%20Relat%C3%B3rio%20Final_2017_Web.pdf>. Acesso em: 10 de outubro de 2017.

Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. **MEIO SÉCULO DE HISTÓRIA FOTOVOLTAICA**. Disponível em: <<http://solar.fc.ul.pt/gazeta2006.pdf>>. Acesso em: 22 de outubro de 2017.

FERREIRA, R. M. **ESTUDO DE VIABILIDADE ECONÔMICA PARA IMPLANTAÇÃO DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA EM ESCOLA MUNICIPAL DE ABAETÉ/MG**. Disponível em: <<https://www.formiga.ifmg.edu.br/documents/2017/PublicacoesTCCsBiblioteca/EE/Estudo-de-Viabilidade-Economica-Para-Implantao-de-Gerao-Fotovoltaica-em-Escola-Municipal-de-Abaet-MG---Rasa-Micaelle-Ferreira.pdf>>. Acesso em: 22 de outubro de 2017.

FEUP. **Tecnologia fotovoltaica**. Disponível em: <http://paginas.fe.up.pt/~ee03096/index_ficheiros/Page830.htm>. Acesso em: 15 de outubro de 2017.

FILIFELOP. **RELÓGIO COM O MÓDULO RTC DS1307**. Disponível em: <<http://blog.filipeflop.com/modulos/relogio-rtc-ds1307-arduino.html>>. Acesso em: 15 de outubro de 2017.

FRANCO, A. P. **Sistemas Fotovoltaicos: Contextualização e Perspectivas para sua massificação no Brasil**. Trabalho de conclusão de curso (Pós-Graduação em Formas alternativas de energia) – Universidade Federal de Lavras, Minas Gerais; 2013. 103 p.

HINRICHS, R.; KLEINBACH, M.; REIS, L. **Energia e Meio Ambiente**. São Paulo (SP): Cengage Learning, 2010.

HODGE, B. K. **Sistemas e aplicações de energia alternativa**. Rio de Janeiro (RJ): LTC, 2011.

IFSC. **AULA 1 – Eletrônica Geral 1 – Técnico**. Disponível em: <https://wiki.ifsc.edu.br/mediawiki/index.php/AULA_1_-_Eletr%C3%B4nica_Geral_1_-_T%C3%A9cnico>. Acesso em: 15 de outubro de 2017.

IFSC. **AULA 2 – Eletrônica Geral 1 – Técnico**. Disponível em: <https://wiki.ifsc.edu.br/mediawiki/index.php/AULA_2_-_Eletr%C3%B4nica_Geral_1_-_T%C3%A9cnico>. Acesso em: 15 de outubro de 2017.

KRYBUS, M.; PASCALICCHIO, A. **Viabilidade econômica de implantação de energia solar em pequenas comunidades isoladas**. In: VII Jornada de Iniciação Científica da Universidade Presbiteriana Mackenzie, 2011, São Paulo (SP).

LABORATÓRIO DE FÍSICA MODERNA. **Efeito fotoelétrico**. Disponível em: <<http://sites.ifi.unicamp.br/lfmoderna/conteudos/efeito-fotoeletrico/>>. Acesso em: 15 de outubro de 2017.

MARINESCU, D.; MARINESCU, C. **Control Optimizing Algorithm for Soft Sun-Trackers**. In: IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics, 2006. Volume 1, pp. 54-57. 2006.

MARTINS, N. A. **Sistemas Microcontrolados**. São Paulo (SP): Novatec, 2005. MICROGERAÇÃO. **SEGUIDOR SOLAR – PARTE 2: CLASSIFICAÇÃO E TIPOS**. Disponível em: <<https://microgeracaofv.wordpress.com/2016/10/17/seguidor-solar-parte-2-tipos/>>. Acesso em: 17 de outubro de 2017.

Ministério de Minas e Energia. **Programa Luz para Todos**. Disponível em: <https://www.mme.gov.br/luzparatodos/Asp/o_programa.asp>. Acesso em: 22 de outubro de 2017.

MUNDO EDUCAÇÃO. **Movimento de translação**. Disponível em: <<http://mundoeducacao.bol.uol.com.br/geografia/movimento-translacao.htm>>. Acesso em: 15 de outubro de 2017.

NASCIMENTO, C. A. **PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DA CÉLULA FOTOVOLTAICA**. Disponível em: <http://www.solenerg.com.br/files/monografia_cassio.pdf>. Acesso em: 15 de outubro de 2017.

PENSAMENTO VERDE. **Tudo sobre a crise energética brasileira e mundial**. Disponível em: <<http://www.pensamentoverde.com.br/meio-ambiente/tudo-sobre-crise-energetica-brasileira-e-mundial/>>. Acesso em: 23 de outubro de 2017.

PERLOTTI, E.; et al., **Proposta para inserção da energia solar fotovoltaica na matriz elétrica brasileira**. 2012. 176 f. (Relatório Técnico) - Estudo do Grupo Setorial de Sistemas Fotovoltaicos da Abinee, LCA Consultores, PSR Soluções e Consultoria em Energia.

PORTAL SOLAR. **TOP 7 PAÍSES QUE MAIS USAM ENERGIA SOLAR**. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/blog-solar/energia-solar/top-7-paises-que-mais-usam-energia-solar.html>>. Acesso em: 22 de outubro de 2017.

PV GRID. **PV GRID MAKE IT SMART**. Disponível em: <<http://www.pvgrid.eu/home.html>>. Acesso em: 14 de outubro de 2017.

PV LEGAL. **PV LEGAL Project website**. Disponível em: <<http://www.pvlegal.eu/>>. Acesso em: 14 de outubro de 2017.

RESEARCHGATE. **Posicionamento eficiente de módulos fotovoltaicos em plantas solares no ambiente urbano**. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/305651683_Posicionamento_eficiente_de_modulos_fotovoltaicos_em_plantas_solares_no_ambiente_urbano>. Acesso em: 22 de outubro de 2017.

RIBERA, J. C. **Manual de energia solar térmica diseño y cálculo de instalaciones**. Editorial Universitat Politècnica de València, 2010.

SEED. **Doping – Tipos de Doping – Dopagem Química de Materiais – Como Ocorre a Dopagem em Semicondutores**. Disponível em: <<http://www.quimica.seed.pr.gov.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=17>>. Acesso em: 15 de outubro de 2017.

UFRJ. **Efeito fotovoltaico**. Disponível em: <<http://www.solar.coppe.ufrj.br/efeito/index.htm>>. Acesso em: 15 de outubro de 2017.

UFRN. **Desenvolvimento de um Rastreador Solar do Tipo Polar com Ajuste do Ângulo de Inclinação**. Disponível em: <<https://repositorio.ufrn.br/jspui/bitstream/123456789/15490/1/JoseRVL DISSERT.pdf>>. Acesso em: 22 de outubro de 2017.

UNESP. **Semicondutores**. Disponível em: <<http://www2.feg.unesp.br/Home/PaginasPessoais/ProfMarceloWendling/1---semicondutores.pdf>>. Acesso em: 15 de outubro de 2017.

UNESP. **Sensores**. Disponível em: <<http://www2.feg.unesp.br/Home/PaginasPessoais/ProfMarceloWendling/4---sensores-v2.0.pdf>>. Acesso em: 15 de outubro de 2017.

UNESP. **Servo Motor**. Disponível em: <<http://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/aula-4---servo-motor-13-03-2013-final.pdf>>. Acesso em: 15 de outubro de 2017.

UNICAMP. **ESTUDO DA BANDA DE GAP EM COMPONENTES ELETRÔNICOS SEMICONDUTORES**. Disponível em:

<http://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530_F590_F690_F809_F895/F809/F809_sem1_2003/993963Luis_Tessler_f809_RF09_0.pdf>. Acesso em: 15 de outubro de 2017.

VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R. **Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações**. 1ª ed. Editora Érica, São Paulo, 2012.