

Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais
Mestrado em Ciência dos Materiais

WALNEY BRITOS RAMIRES

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS DE SILÍCIO EM
ESTRUTURA FIXA E COM RASTREADOR**

Campo Grande- MS

2018

Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais
Mestrado em Ciência dos Materiais

WALNEY BRITOS RAMIRES

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS DE SILÍCIO EM
ESTRUTURA FIXA E COM RASTREADOR**

Dissertação apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais pela UFMS. (Área de concentração: Dispositivos).

Campo Grande- MS

2018

Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais
Mestrado em Ciência dos Materiais

WALNEY BRITOS RAMIRES

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS DE SILÍCIO EM
ESTRUTURA FIXA E COM RASTREADOR**

BANCA EXAMINADORA

Campo Grande, 15 de Agosto de 2018.

Orientador Prof. Dr. Flavio Aristone
INFI - UFMS

Prof. Dr. Armando Cirilo de Souza
UFMS

Prof. Dr^a Andrea Teresa Riccio Barbosa
FAENG - UFMS

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador Professor doutor Flávio Aristone, que com sua experiência e conhecimento sempre me proporcionou um caminho seguro na pesquisa. Também sou grato aos professores Doutores Airton Notari e Armando Cirilo de Souza, e aos acadêmicos Gabriel Linhares e Wallace Franco. Agradeço à minha esposa e família. Agradeço à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal do Ensino Superior) e à UFMS pelo incentivo aos meus estudos, que permitiram a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	5
SUMÁRIO	6
LISTA DE FIGURAS	8
LISTA DE TABELAS	10
SIGLA E ACRÔNIMO	11
RESUMO	12
ABSTRACT	13
1. INTRODUÇÃO	14
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1. Distribuição da radiação solar	17
2.2. Comportamento da luz	19
2.3. Associação de células e módulos	26
2.4. Influências na produção de energia	27
2.5. Módulos fotovoltaicos	29
2.6. Sistemas fotovoltaicos	31
3. RASTREADORES	34
3.1. Rastreadores passivos	35
3.2. Rastreadores ativos	35
3.3. Sistemas com sensores para controle do rastreador ativo	40
4. METODOLOGIA	42
4.1. Registrador de tensão e corrente	42
4.2. Rastreador solar vertical azimutal	46
4.3. Estudo comparativo dos sistemas fotovoltaicos	52
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	54
5.1. Radiação solar observada	54
5.2. Medidas obtidas pelo sistema fotovoltaico isolado	56
5.3. Comparação dos módulos para provar que são idênticas	58
5.4. Sistemas de rotação manual, constante e com LDR	62
5.5. Resultados nos dias com maior e menor ganho	64
5.6. Consumo de energia do motor de passo	72
5.7. Aplicação do Rastreador em Mato Grosso do Sul	74

CONCLUSÃO.....	77
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	79
APÊNDICE A - ESQUEMA ELÉTRICO DO REGISTRADOR.....	83
APÊNDICE B - ESQUEMA ELÉTRICO DO RASTREADOR SOLAR.....	84
APÊNDICE C - PROGRAMAÇÃO DO REGISTRADOR.....	85
APÊNDICE D - PROGRAMAÇÃO DO RASTREADOR SOLAR DE UM EIXO.....	89
APÊNDICE E - DESENHO 3 D DO RASTREADOR SOLAR AZIMUTAL.....	93

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Ângulo de azimute.....	16
Figura 2 Irradiação em função da latitude.	17
Figura 3 Distribuição Espectral da Radiação Solar.....	18
Figura 4 Exemplo de adição de impureza em cristal de Silício	21
Figura 5 Estrutura básica de uma célula fotovoltaica de silício dopado	23
Figura 6 Curva característica I-V de um módulo fotovoltaico.....	25
Figura 7 Curva corrente x tensão de módulos fotovoltaicos em série.....	26
Figura 8 Associação de módulos Fotovoltaicos em paralelo.	27
Figura 9 Influência da variação da irradiância solar nas curvas características I-V .	28
Figura 10 Influência da temperatura da célula fotovoltaica na curva I-V.....	29
Figura 11 Componentes de um módulo fotovoltaico com células de silício.	30
Figura 12 Rastreador Solar Polar.....	37
Figura 13 Rastreador Vertical (ângulo azimutal).....	38
Figura 14 Rastreador Solar de Eixo Horizontal.....	39
Figura 15 Rastreador de Dois Eixos.....	40
Figura 16 Dispositivo desenvolvido para registro de dados dos módulos	44
Figura 17 Suporte para os Sensores LDR.....	46
Figura 18. Cálculo do motor de passo.....	48
Figura 19 Estrutura Mecânica do Rastreador Azimutal no SolidWorks 2013	49
Figura 20 Estrutura mecânica do rastreador solar vertical de um eixo.	50
Figura 21 Estrutura fixa e o Rastreador solar azimutal	53
Figura 22 Radiação durante um ano de medidas entre junho/2017 e junho/2018 ...	55
Figura 23 Curvas características típicas de tensão, corrente e potência.	56
Figura 24 Medidas da radiação solar para o dia 08/03/2017	58
Figura 25 Esquema do Sistema Fotovoltaico Isolado	59
Figura 26 Curvas características típicas de tensão, corrente e potência	60
Figura 27 Medidas da Radiação solar para o dia 29/09/2017.....	61
Figura 28 Energia produzida pelo sistema fotovoltaico durante o dia 29/09/2017 ...	62
Figura 29 Potência produzida pelos dois sistemas fotovoltaicos	65
Figura 30 Energia produzido pela placa fotovoltaica no 16/03/2017.....	66
Figura 31 Potência produzida pelos dois SFI no dia 01/07/2018	67

Figura 32 Ganho percentual do rastreador solar no dia 01/07/2018	68
Figura 33 Produção de energia para o dia 01/07/2018	68
Figura 34 Potências produzidas pelos dois SFI	69
Figura 35 Energia produzida pelos dois módulos no dia em alguns dias	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Propriedades do Silício à temperatura de 300 K e baixas concentrações de dopantes.	20
Tabela 2 Dados obtidos pela comparação entre o registrador de tensão e corrente e um multímetro calibrado.....	45
Tabela 3 Tabela dos valores de LDR em campo	47
Tabela 4 Irradiação solar Anual - média mensal em Mato Grosso do Sul	56
Tabela 5 Produção diária de energia dos módulos Fotovoltaicos nas mesmas condições.....	59
Tabela 6 Ganho médio de produção de energia utilizando três tipos de sistema de rastreamento em relação ao sistema fotovoltaico estacionário	63
Tabela 7 Ganho médio das produções diárias dos sistemas fotovoltaicos.....	71
Tabela 8 Simulação da aplicação do Rastreador desenvolvido com 10 módulos	75

SIGLA E ACRÔNIMO

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANEEL: Agência Nacional de Energia Elétrica

CEPEL: Centro de Pesquisa de Energia Elétrica

CNPq: Conselho Nacional de Pesquisa Científica e Tecnológico

CRESESB: Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito

c-Si: Silício cristalino

ENERGISA: Concessionária de Energia Elétrica de MS

EVA: Etil Vinil de Acetato

FV: Fotovoltaico

INMET: Instituto Nacional de Meteorologia

INPE: Instituto Nacional de Pesquisa

LDR: Resistor Dependente de Luminosidade

MS: Mato Grosso do Sul

MIGDI: Microssistema Isolado de Geração e Distribuição de Energia Elétrica

PET: Polietileno tereftalato

SFI: Sistema Fotovoltaico Isolado

SFR: Sistema Fotovoltaico conectado à Rede

SFH: Sistema Fotovoltaico Híbrido

SFV: Sistemas Fotovoltaicos

SIGFI: Sistema Individual de Geração de Energia Elétrica com fontes intermitentes

RESUMO

A energia gerada pelos módulos fotovoltaicos, atualmente, é uma das mais promissoras, principalmente no quesito de energias renováveis. Com o intuito de contribuir para essa expansão da produção de energias renováveis, foi realizado para análise neste trabalho um estudo comparativo entre um rastreador solar azimutal e um sistema fixo estacionário. Foi desenvolvido um protótipo de rastreador solar e um registrador de tensão e corrente, utilizando softwares de desenho mecânico, de programação em Arduino, e de circuito eletrônico. As produções de energia dos módulos foram validadas através de medições nas mesmas condições durante os períodos de amostragem. Módulos idênticos foram comparados, e em mesmas condições apresentaram produção de energia dentro dos valores estabelecidos pelo fabricante, garantindo que os estudos comparativos em campo são confiáveis. Os resultados mostraram um ganho absoluto que chega a 24% na produção de energia elétrica com a inclusão do rastreador, em comparação com a produção de um sistema fotovoltaico com instalação fixa.

Palavras chaves: Energia fotovoltaica, rastreador solar, silício, azimutal, comparativo.

ABSTRACT

The energy generated by photovoltaic modules is currently one of the most promising, especially in the area of renewable energies. In order to contribute to this expansion of the production of renewable energies, a comparative study between an azimuthal solar tracker and a stationary fixed system was carried out in this work. A prototype solar tracker and a current - voltage recorder were developed, using mechanical design software, Arduino programming, and electronic circuitry. The energy production of the modules were validated by measurements under the same conditions during the sampling periods. Identical modules were compared, and in the same conditions presented energy production within the values established by the manufacturer, ensuring that comparative field studies are reliable. The results showed an absolute gain that reaches up to 24% in the production of electric energy with the inclusion of the tracker, in comparison with the production of a photovoltaic system on a fixed installation.

Keywords: Photovoltaic energy, solar tracker system, silicon, azimuth, comparative.

1. INTRODUÇÃO

É notável o crescimento populacional nas últimas décadas, o que implica no aumento da demanda de subsídios essenciais à existência, tais como alimentos, energia elétrica, água potável entre outros diversos produtos. A importância da energia elétrica para humanidade e seu desenvolvimento, mostra-se uma das necessidades mais preocupantes quanto à sua produção, distribuição e consumo. As buscas por alternativas de fontes de energia para suprir esses desafios de atender o aumento do consumo mundial de eletricidade se apóiam em desenvolver meios eficazes e sustentáveis através do uso de recursos tecnológicos e da ciência básica e aplicada.

A energia solar é uma fonte de energia limpa e renovável que, em relação às pesquisas realizadas, já se encontra bem estabelecida e que é continuamente estudada com o objetivo de buscar o uso de materiais mais baratos e eficazes na sua conversão em eletricidade. As células solares fotovoltaicas dão origem aos módulos fotovoltaicos, cujas aplicações ocorrem tanto na área urbana quanto na área rural, tornando seu acesso mais acessível à população em geral.

Atualmente já se encontram as mais variadas formas de painéis fotovoltaicos, dentre algumas estruturas desses dispositivos tem-se os módulos rígidos e os flexíveis, feitos de monocamadas ou de multicamadas, além das mais variadas junções de semicondutores que são usadas para a produção das células fotovoltaicas. A tecnologia impulsiona o desenvolvimento do mercado dos painéis fotovoltaicos, proporcionando uma variedade de produtos que atendem os mais diversos segmentos da sociedade, com um índice de viabilidade crescente. Um dos aprimoramentos que apresenta aproveitamento considerável desses dispositivos é o rastreador solar, cuja função é “seguir o Sol”, de forma a fazer com que a incidência solar seja sempre perpendicular aos painéis solares. Raios solares perpendiculares aos painéis são mais eficientes do que raios solares inclinados.

O objetivo principal desse trabalho é fazer o estudo comparativo da geração de energia elétrica dos módulos fotovoltaicos utilizando dois sistemas de instalação: um com rastreador solar e outro em estrutura fixa. Pretende-se avaliar a potência fornecida por cada sistema ao longo do dia, demonstrando a diferença de energia elétrica gerada entre os dois casos. Para isso, será necessário desenvolver um

protótipo de rastreador solar e também um dispositivo de leitura e registro de dados fornecidos pelos sistemas fotovoltaicos. Os resultados servem para caracterizar a produção de energia na região de Mato Grosso do Sul.

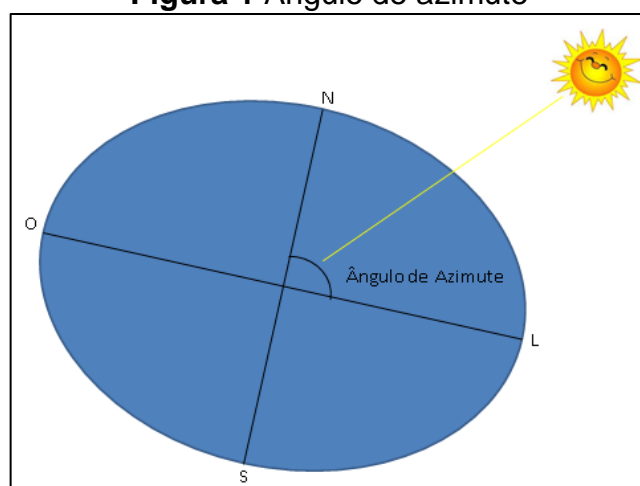
O presente trabalho foi desenvolvido na cidade de Campo Grande, estado de Mato Grosso do Sul, com sua localização nas coordenadas: latitude: $-20^{\circ} 26' 34''$, longitude: $-54^{\circ} 38' 47''$ e altitude: 532 metros, apresentando níveis de irradiação solar global diária de aproximadamente 6.000 Wh/m^2 no plano inclinado como média anual (INPE e LABSOLAR).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O Sol é uma das principais fontes de energia para a vida na Terra e tem inúmeras vantagens, como ser de fácil acesso para todos, estar disponível em quantidades para exploração da massa populacional, ser uma energia limpa e renovável. A energia solar tem um segmento na sua vasta aplicação que é sua conversão em energia elétrica através do efeito fotoelétrico, e como a irradiação global horizontal no país tem a média anual de 5.250 W/m^2 , a viabilidade desses sistemas de produção de energia é vantajosa para o país [1].

A Terra tem seu movimento rotacional diário sob uma inclinação de $23,5^\circ$. Segundo os argumentos da referência, esse ângulo de inclinação é a relação do eixo de rotação da Terra com o plano da eclíptica definido pela sua órbita em relação ao Sol. Quando ocorre a instalação de um painel solar, o declive desse dispositivo geralmente precisa ser igual à latitude do local [2]. O Ângulo de Azimute é formado no plano horizontal da Terra entre a projeção da linha Sol-Terra e a direção Norte - Sul, conforme representado na Figura 1.

Figura 1 Ângulo de azimute

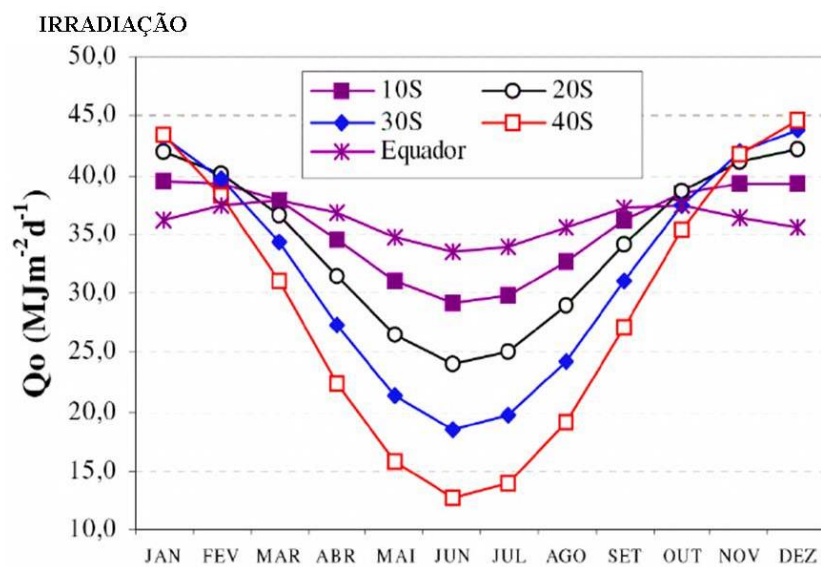


Fonte: Autor

É observada uma inclinação acentuada nos meses de junho para o hemisfério Norte e dezembro para o hemisfério Sul. Conseqüentemente, o declive do painel solar, em condições mais favoráveis, deve ser superior à latitude do local no Inverno e inferior no Verão [3]. Um estudo da Empresa de Pesquisa Energética –EPE,

mostra a relação de irradiação de acordo com a latitude local durante o período de um ano, onde fica demonstrada a grande variação decorrente à medida que a latitude se afasta da Linha do Equador, como exemplificado na Figura 2. Quanto maior é a latitude do local onde se instalam os painéis fotovoltaicos, maior é a variação de irradiação, indicando a possibilidade de aumento de produção energética de instalação dotada de rastreador solar, que visa fazer o acompanhamento de onde ocorre a irradiação com maior incidência [2].

Figura 2 Irradiação em função da latitude.



MESES DO ANO
Fonte: EPE, 2016

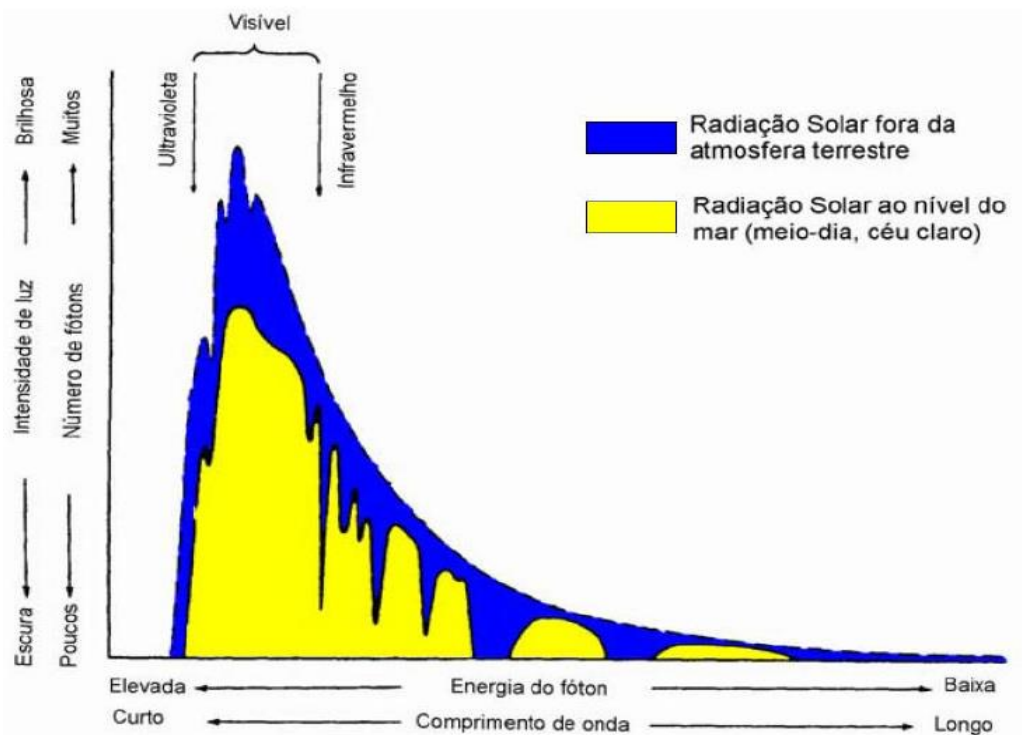
2.1. Distribuição da radiação solar

É importante definir radiação solar e irradiação solar, onde a irradiação solar é a potência por unidade de área recebida na superfície da Terra na forma de ondas eletromagnéticas, no intervalo de frequência do aparelho específico de medida. Ou seja, a irradiação é a energia proveniente do Sol que é observada em um ponto específico, seja no espaço ou na superfície da Terra. A radiação solar faz referência às emissões eletromagnéticas do Sol, das quais 50% aproximadamente formam o espectro do infravermelho, do visível, e do ultravioleta.

O fluxo de radiação solar que atinge a atmosfera terrestre é uma constante conhecida como radiação incidente, que varia ao longo do ano devido à distância estabelecida pelos movimentos rotacional e translacional da Terra em relação ao Sol

[3]. A radiação que chega à superfície da Terra é parte dessa radiação incidente, que na passagem pela atmosfera sofre desvios de energia devido a alguns fenômenos físicos, como a reflexão, a dispersão, a absorção, a variação de latitude, a poluição, entre outros. Na Figura 3 estão representadas as distribuições espectrais da radiação solar fora da atmosfera terrestre e ao nível do mar.

Figura 3 Distribuição Espectral da Radiação Solar



Em sistemas com painéis fotovoltaicos é imprescindível realizar pesquisa sobre a radiação solar local, para obter um maior aproveitamento. Devem-se avaliar os fatores de localização geográfica, de quantidade de radiação diária e de movimentação do Sol durante o ano.

Radiação é toda energia que consegue se propagar sem necessitar de um meio material para isso, sendo equivalente nomear este efeito em seu próprio processo de transferência de energia. A radiação solar global resulta do somatório das radiações direta, difusa e refletida [4].

A radiação direta é formada pelos raios solares que incidem diretamente na superfície da Terra. Já a radiação difusa caracteriza os raios que sofreram variação

no caminho e que não atingem diretamente a superfície terrestre. A radiação refletida é formada pelos raios solares refletidos pelo meio que rodeia a superfície, sendo que cada superfície possui um diferente albedo, razão entre a quantidade de radiação refletida e a quantidade de radiação recebida, variando entre 0 e 1 [5].

2.2. Comportamento da luz

O fenômeno da conversão de energia solar em energia elétrica foi observado pela primeira vez em 1839, pelo físico francês Edmond Becquerel. Ele observou a existência de uma diferença de potencial quando eletrodos constituídos por placas de platina ou de prata, mergulhados em um eletrólito, eram expostos à luz. Esse fenômeno físico foi chamado de Efeito Fotovoltaico [3].

Hertz realizou entre 1886-1887 diversas experiências que confirmaram a teoria de Maxwell sobre a existência de ondas eletromagnéticas, estabelecendo que a luz se comporta como um campo eletromagnético variando no tempo e no espaço. Por outro lado, o efeito fotoelétrico, descoberto pelo próprio Hertz em 1887, só foi esclarecido por Einstein em 1905. Resumidamente o efeito fotoelétrico consiste no fato que elétrons são arrancados de uma placa metálica quando ela é irradiada por luz incidente. Os elétrons emitidos, também chamados de fotoelétrons, saem da placa definida como cátodo e são atraídos para outra placa polarizada que é o anodo, dando origem a uma passagem de corrente [4]. Para esclarecer esse efeito, Einstein concluiu que a luz nesse caso se comporta como partículas, e não como ondas eletromagnéticas [6].

Na natureza existem materiais classificados como semicondutores, que são caracterizados por terem uma banda de valência preenchida de elétrons e uma banda de condução vazia, na temperatura de zero kelvin (0 K), ou seja, têm as mesmas características de um isolante. No entanto, o que os diferencia é o fato que os semicondutores podem se tornar condutores de energia elétrica, ou seja, podem permitir a passagem de corrente em condições específicas, contrariamente aos isolantes, por onde nunca se passa corrente elétrica. Os semicondutores pertencem em sua maioria aos grupos 14 a 16 da tabela periódica. Existem semicondutores na forma de um único elemento como o silício, e também existem outros semicondutores que podem ser compostos binários, ternários e até quaternários. Um exemplo de composto binário tem-seo Arseneto de Gálio (GaAs) e o Nitreto de

Gálio (GaN), conhecidos como semicondutores do tipo III-V. O Disseleneto de Cobre-Índio como CuInSe_2 e InGaAsP são exemplos de semicondutores ternário e quaternário, respectivamente [7].

As células c-Si correspondeu em 2011 a 87,9% do mercado mundial de semicondutores. Esse é o material amplamente utilizado na fabricação de células solares fotovoltaicas comerciais. A matéria-prima utilizada na fabricação de elementos de eletrônica é o silício ultrapuro. O Silício de grau eletrônico (Si-gE) tem pureza de 99,9999999%, também denominada 9N (nove noves), e o Silício grau solar (Si-gS), tem pureza de 99,9999% ou 6N, de menor custo. O silício de grau solar não pode ser usado na indústria de microeletrônica [3].

O Silício é o segundo elemento mais abundante na crosta terrestre, apresentando-se nas seguintes estruturas: mono cristalino, poli cristalino e amorfo. Possui forma octaédrica e apresenta uma coloração azul. É muito difícil encontrá-la em sua estrutura elementar devido sua afinidade com o oxigênio. Os átomos de Silício são tetravalentes por possuírem quatro elétrons na última camada de valência. Algumas informações relevantes sobre o silício são elencadas na Tabela 1.

Tabela 1. Propriedades do Silício à temperatura de 300 K e baixas concentrações de dopantes.

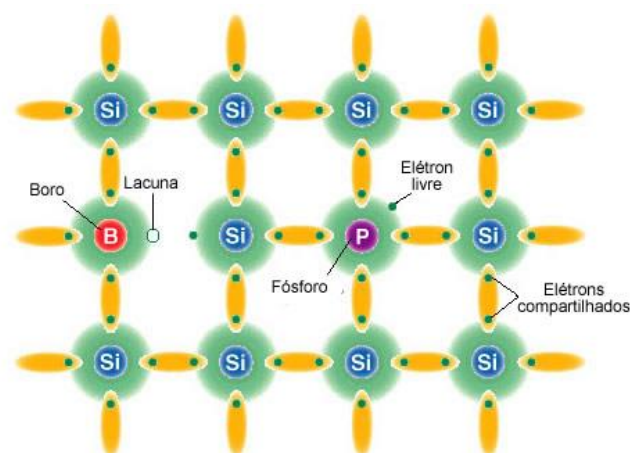
Número atômico (Z)	14
Configuração eletrônica	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$
Valência	4
Estrutura Cristalina	CFC
<i>Bandgap</i> (E_g)	1,12 eV
Distância inter-atômica	5,4 Å
Ponto de Fusão	1.420 °C
Concentração intrínseca	$1,5 \times 10^{10}/\text{cm}^3$
Mobilidade dos elétrons (μ_n)	$1,350 \text{ cm}^2/\text{V.s}$
Mobilidade das lacunas (μ_p)	$480 \text{ cm}^2/\text{V.s}$
Coeficiente de difusão de elétrons (D_n)	$35 \text{ cm}^2/\text{s}$
Coeficiente de difusão de lacunas (D_p)	$12,5 \text{ cm}^2/\text{s}$

Fonte: CEPEL-CRESESB,2014

Para obter a dopagem de um material, podem ser aplicadas diversas técnicas, tais como implantação iônica e difusão térmica. Essa prática consiste na adição de impurezas no material em concentrações específicas, de acordo com a finalidade pretendida. Uma dopagem tipo *n* em um material como o silício, por exemplo, pode ser feita com a adição de fósforo, que é um átomo penta valente. O fósforo é conhecido como impureza doadora de elétrons, ou ainda impureza tipo *n*, onde sua integração na rede cristalina do silício deixará um elétron em excesso fracamente ligado ao átomo de origem, considerado “elétron livre” [3].

Se nessa rede cristalina de silício for introduzido um átomo trivalente como boro, ocorre a falta de um elétron para completar as ligações com os átomos de silício da rede. Essa ausência é denominada lacuna ou buraco, e ocupa um nível de energia no interior da banda proibida de apenas 0,045 eV acima do limite superior da banda de valência. À temperatura ambiente, uma energia muito pequena é capaz de fazê-lo mudar de banda, correspondendo ao movimento da lacuna no sentido inverso, tornando o átomo uma carga fixa positiva. Além do boro, podem ser usados alumínio, gálio, e índio, denominados impurezas aceitadoras de elétrons ou dopantes tipo *p*. Em um semiconductor tipo *p*, o nível de Fermi fica abaixo do ponto médio da banda proibida, próxima à banda de condução. A Figura 4 ilustra a adição de impurezas tanto doadoras com receptoras de elétrons em um cristal de silício.

Figura 4 Exemplo de adição de impureza em cristal de Silício



Fonte: Infoescola (*website*) (Adaptado)

À temperatura ambiente, a energia térmica é suficiente para que uma parte dos elétrons em excesso dos átomos penta valentes adicionados à rede cristalina

de Silício estejam livres, ou seja, sejam promovidos para a banda de condução. O processo é equivalente para as lacunas criadas pelos átomos de Boro na rede cristalina do Si, que também podem se movimentar. Ao se colocar átomos de Boro na metade de uma lâmina de Si inicialmente puro, e na outra metade da lâmina se adicionar átomos de Fósforo, será então formada a junção **pn**. O nível de Fermi para o semiconductor tipo **n** localiza-se acima do ponto médio da banda proibida, próximo à banda de condução, o que diminui a energia necessária para passar os elétrons para banda de condução [3].

Na interface entre os dois tipos de dopagem, o excesso de elétrons que se encontra na região **n** se difunde para a região **p**, dando origem a uma região com cargas elétricas positivas fixas do lado **n**. Os elétrons difundidos encontram as lacunas do lado **p** e fazem com que fique com cargas negativas. As correntes de difusão não continuam indefinidamente, porque o excesso de cargas positivas e negativas na junção das regiões **n** e **p** produzem um campo elétrico que impede o movimento de elétrons e lacunas naquela região. Com o equilíbrio estabelecido, essa zona com cargas positivas e negativas, definida como zona de carga espacial ou zona de depleção, gera um campo elétrico na junção **pn** e uma barreira de potencial. Na zona de depleção não existe portadores, ou seja, $n=0$ e $p=0$. Através da junção **pn** no escuro, sem tensão externa de polarização, existe uma corrente de portadores gerados termicamente que se anula, num estado de equilíbrio dinâmico [8]. A diferença de potencial na junção **pn** nessas condições de equilíbrio em função da temperatura pode ser calculada conforme Equação 1 abaixo [9].

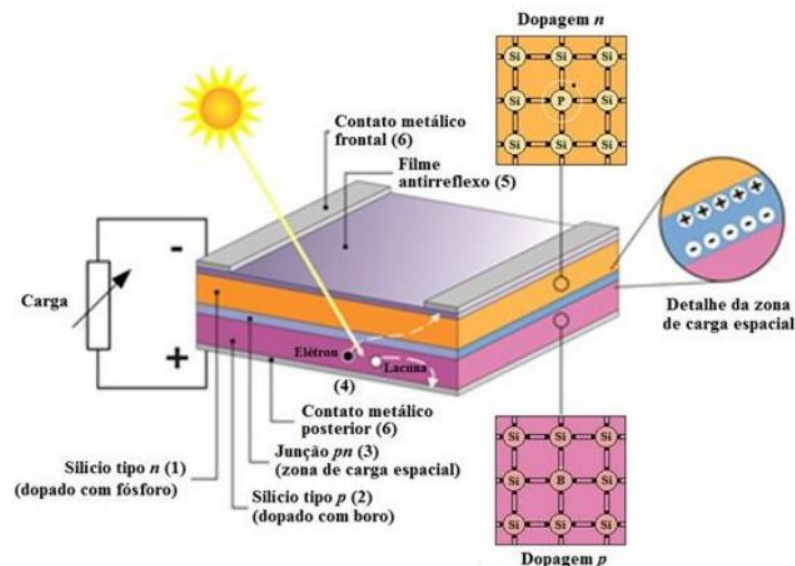
$$V_0(T) \cong \frac{k_B \cdot T}{q} \cdot \ln\left(\frac{N_d N_a}{n_i^2}\right) \quad (1)$$

Onde $V_0(T)$ = Diferença de potencial na junção; k_B =Constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23}$ J/ K); T =Temperatura absoluta (K); q =Carga do elétron ($1,6 \times 10^{-19}$ C); n_i =Concentração de portadores intrínsecos no material; N_d = Concentração de dopante tipo n e N_a = Concentração do dopante tipo p;

A corrente pode ser dividida em duas partes, corrente de deriva (i_D) e corrente de difusão (i_d). A corrente de deriva é devido ao efeito do campo elétrico que move os portadores de cargas minoritários para região onde são majoritários, e a corrente de difusão ocorre com o movimento de cargas devido à diferença de concentração de elétrons e lacunas em ambos os lados da junção **pn** [3].

A célula fotovoltaica faz uso das propriedades do efeito fotovoltaico para gerar eletricidade, ou seja, a energia solar incidente sobre semicondutores previamente dopados provoca o aparecimento de cargas livres no material. Conforme o esquema representado na Figura 5, os componentes de uma estrutura básica da célula fotovoltaica de Silício são: (1) região tipo *n*; (2) região tipo *p*, (3) zona de carga espacial, onde se forma a junção *pn* e o campo elétrico; (4) geração de par elétron-lacuna; (5) filme antirreflexivo; (6) contatos metálicos.

Figura 5 Estrutura básica de uma célula fotovoltaica de silício dopado



Fonte: CRESESB-CEPEL, 2014.

Se uma junção for exposta a radiação suficiente para que haja movimento dos elétrons e lacunas nos materiais, os portadores serão gerados na região da carga espacial e, então, serão separados pelo campo elétrico, ou seja, ocorrerá a separação do par elétron-lacuna gerado. Os elétrons são acelerados para lado *n* e as lacunas para o lado *p*, gerando corrente elétrica através da junção no sentido da região *n* para a região *p*.

O processo de absorção de fótons da junção *pn* e a corrente fotogerada também ocorrem na zona de depleção. Porém, quando os portadores de carga são fotogerados fora da zona de carga espacial, os portadores minoritários devem ter um tempo de vida mínimo para alcançar a junção *pn* e serem coletados, antes que ocorra a recombinação, fazendo com que o transporte de cargas se anule.

A recombinação pode ser direta, onde um elétron volta diretamente da banda de valência à banda de condução. Quando esse efeito ocorre, a energia é emitida na forma de fóton, e também é conhecido como recombinação irradiante [3]. As células de c-Si nessa condição apresenta radiação de baixíssima intensidade, na faixa de 950 nm a 1250 nm (IR). A recombinação indireta, por outro lado, ocorre pelo fato dos elétrons passarem por níveis de energia intermediários no interior da banda proibida, causadas por defeitos na estrutura cristalina. A separação de portadores de carga resultante da junção **pn** dá origem ao efeito fotovoltaico, que é a conversão de energia solar em energia elétrica, associada a uma corrente de cargas e uma tensão nos terminais do dispositivo [10].

Como qualquer díodo semiconductor exposto a radiação realiza a geração de pares elétron-lacuna, nas células fotovoltaicas podem ser entendidas como díodos de grande área, aprimorados para que a eficiência seja a melhor possível. Além do processo de geração de par elétron-lacuna também ocorre processo de recombinação dos portadores de cargas minoritários gerados. A recombinação ocorre tanto na superfície quanto no volume do dispositivo, o que mostra que essas recombinações impedem o ganho de eficiência [9].

A eficiência de conversão de uma célula fotovoltaica apresenta alguns fatores que limitam seus valores, como pode ser visto na lista a seguir:

- Reflexão na superfície frontal;
- Sombra proporcionada pela área da malha metálica na face frontal;
- Absorção nula de fótons de energia menor do que o *gap* ($E_f < E_g$);
- Baixa probabilidade de coleta pela junção **pn**, dos portadores de carga gerados fora da zona de carga espacial;
- Recombinação dos portadores de carga, isto é, o reencontro dos elétrons e lacunas em impurezas e defeitos do material;
- Resistência elétrica no dispositivo e nos contatos do metal-semiconductor, como possíveis fugas da corrente elétrica (resistência paralela).

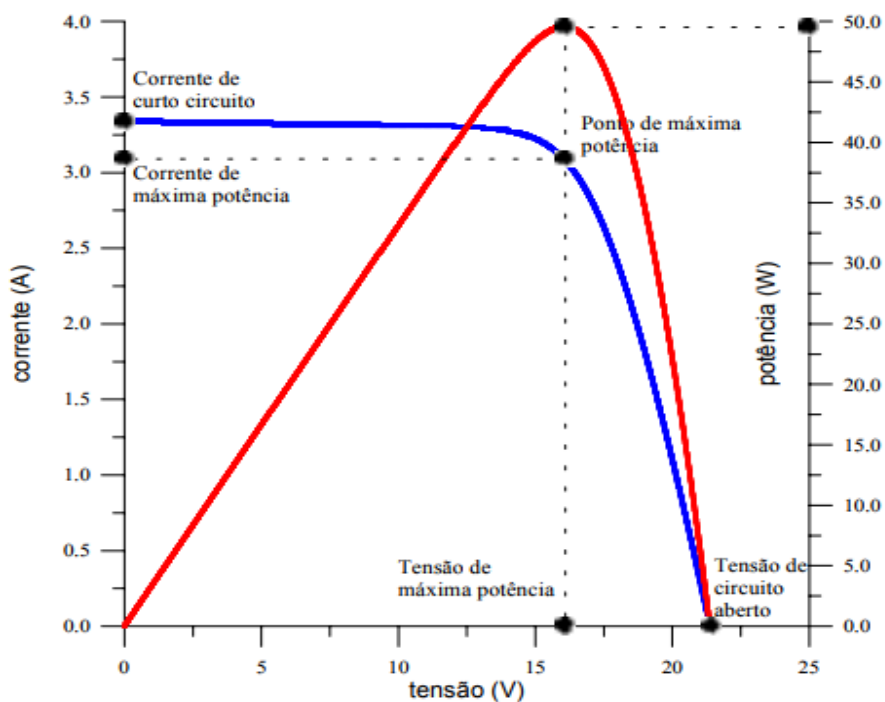
A corrente elétrica em uma célula fotovoltaica pode ser definida como o somatório de corrente de uma junção **pn** no escuro com a corrente gerada pelos fótons absorvidos da radiação solar. A corrente gerada em função da tensão no dispositivo é denominada curva I-V, conhecida como curva característica [2-5]. Na

Figura 6 encontra-se uma curva característica típica para uma célula fotovoltaica extraída da literatura para ser vista como exemplo. A corrente da célula pode ser descrita pela equação 7, derivada da equação de Shockley para o díodo ideal [9].

$$I = I_L - I_0 \left[\exp \left(\frac{qV}{nk_B T} \right) - 1 \right] \quad (2)$$

Onde I_L = corrente fotogerada (A); I_0 = corrente de saturação reversa do díodo (A); n = fator de idealidade do díodo, número adimensional geralmente entre 1 e 2 ; q = carga do elétron; k_B = constante de Boltzman; e T = temperatura absoluta.

Figura 6 Curva característica I-V de um módulo fotovoltaico.



Fonte: HECKTHEUER,2001

Eficiência é o parâmetro que define a efetividade do processo de conversão de energia solar em energia elétrica. Ela representa a relação entre a potência gerada pela célula fotovoltaica e a potência da energia solar incidente, podendo ser definida com a equação 3 [3].

$$\eta = \frac{I_{sc} V_{oc} FF}{A \cdot G} \cdot 100\% \quad (3)$$

Onde η = Eficiência; I_{sc} = corrente fotogerada (A); V_{oc} = corrente fotogerada (A); FF = fator de forma; A = área; e G = Irradiância incidente.

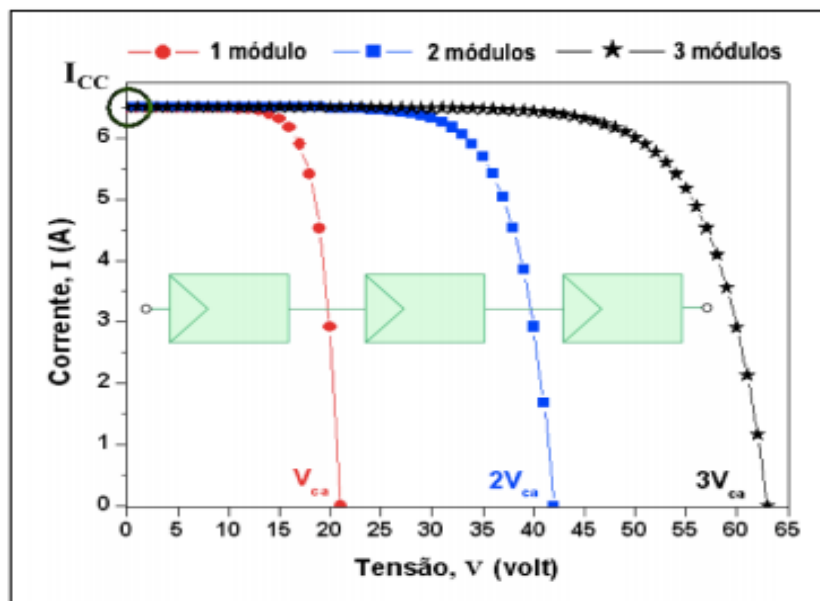
2.3. Associação de células e módulos

A potência elétrica máxima produzida por uma célula de silício cristalino, com área de 0,0243 m², em condições padrões de ensaio é de até 4 W. Esse valor não atende ao consumo geral de muitas aplicações, sendo necessária a associação dessas células e formando-se então os módulos fotovoltaicos. As duas formas de associar as células são em série e em paralelo, de acordo com a necessidade. Os módulos fotovoltaicos são produzidos a partir das associações adotadas para as células fotovoltaicas. Baseando-se nessas associações consegue-se fornecer uma tensão e corrente de acordo com cada aplicação do sistema fotovoltaico [11].

Associações em série

Na conexão das associações em série, o terminal positivo de um módulo fotovoltaico é conectado ao terminal negativo do outro módulo e assim segue-se até os valores estabelecidos no projeto [11]. Para dispositivos com mesma capacidade e submetidos à mesma radiação solar, as tensões são somadas e o valor da corrente elétrica é o mesmo, conforme representado na Figura 7.

Figura7 Curva corrente x tensão de módulos fotovoltaicos em série.



Fonte: repositorium (website)

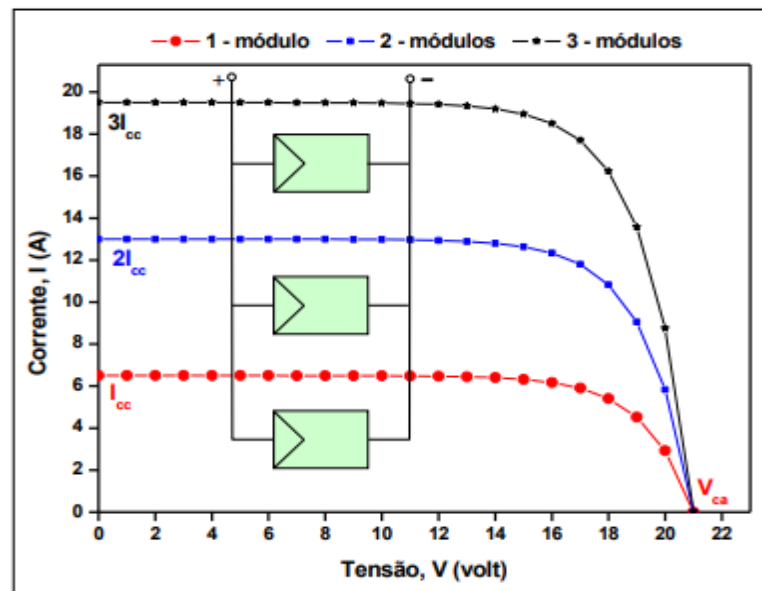
Por meio da curva característica I-V, se os dispositivos possuem e encontram-se sob as mesmas condições de radiação e temperatura, as correntes elétricas

individuais são iguais. No caso de se associarem os dispositivos em série com diferentes correntes de curto circuito, a corrente elétrica da associação será limitada pela menor corrente. Entretanto, a associação de módulos de corrente diferentes não é recomendada na prática, pois pode causar superaquecimento do sistema [2].

Associações em paralelo

É uma associação onde os terminais positivos dos módulos fotovoltaicos são interligados, ou seja, os terminais positivos de um módulo são ligados no terminal positivo do outro, e da mesma forma ocorre para os terminais negativos. A Figura 8 mostra o resultado da soma das correntes elétricas em módulos iguais conectadas em paralelo. As correntes elétricas são somadas e a tensão é a mesma.

Figura 8 Associação de módulos Fotovoltaicos em paralelo.



Fonte: repositorium (website)

2.4. Influências na produção de energia

Os módulos fotovoltaicos variam sua produção de energia devido às principais influências como a radiação, direção, inclinação, sombreamento e temperatura. Identificar e quantificar essas interferências na produção é necessário aos sistemas fotovoltaicos, visando obter o melhor desempenho.

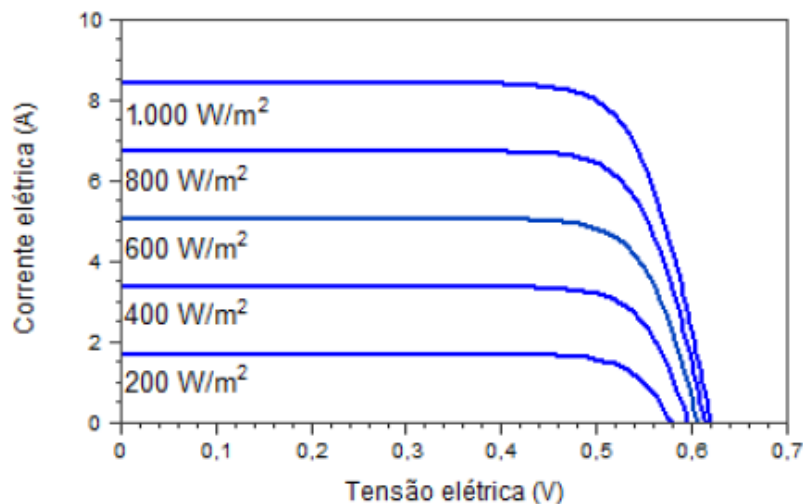
2.4.1. Influência da radiação

O gráfico representado na Figura 9 mostra como a irradiância solar incidente afeta a curva I-V de uma célula fotovoltaica de silício, mantida à temperatura de 25 °C. A corrente elétrica gerada por essa célula fotovoltaica aumenta linearmente com o aumento da irradiância solar incidente, enquanto que a tensão de circuito aberto (V_{OC}) aumenta de forma logarítmica, se mantida a mesma temperatura [2]. A corrente de curto circuito (I_{SC}) de uma célula pode ser relacionada pela irradiância incidente através da equação 4.

$$I_{SC} = I_{SC_{STC}} \times \frac{G}{1000} \quad (4)$$

Onde I_{SC} (A)= Corrente de curto-circuito do módulo; $I_{SC_{STC}}$ (A)= Corrente de curto circuito do módulo em STC; e G (W/m²)= Irradiância incidente sobre o módulo.

Figura 9 Influência da variação da irradiância solar nas curvas características I-V



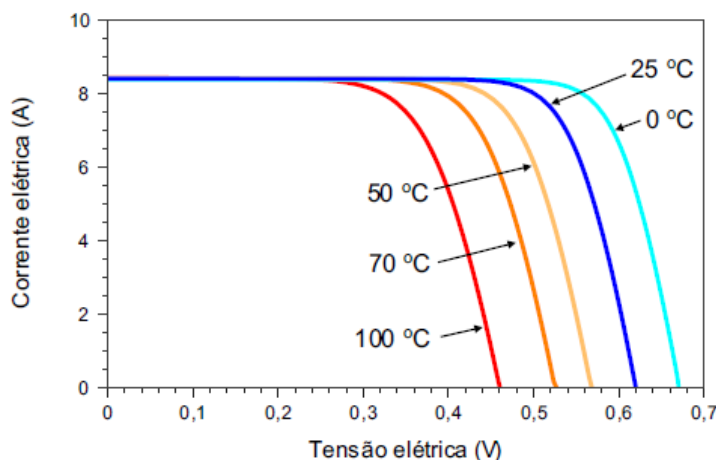
Fonte: CRESESB-CEPEL, 2014

2.4.2. Influência da temperatura

As variações da irradiância solar incidente e da temperatura ambiente afetam a temperatura de operação das células fotovoltaicas que compõem os módulos fotovoltaicos. A Figura 10 mostra as curvas I-V para diversas temperaturas das células fotovoltaicas, com radiação solar de 1.000 W/m². O aumento da irradiância tende a reduzir sua eficiência. Isso se deve ao fato de que a tensão da célula diminui significativamente com o aumento da temperatura, enquanto que sua corrente sofre

uma elevação muito pequena, quase desprezível, devido à taxa de geração de par elétron-lacuna e recombinação [9].

Figura 10 Influência da temperatura da célula fotovoltaica na curva I-V.



Fonte: CRESESB-CEPEL, 2014.

A célula de silício cristalino em condições STC e mudança de 25 °C para 100°C apresenta variações elétricas, valores que chegam -2 V (-30%) em tensão de circuito aberto V_{OC} , e de + 0,2% em corrente de curto circuito I_{SC} [3]. Determinados módulos fotovoltaicos de filmes finos apresentam menor influência da temperatura na potência de pico, embora também sofram redução no seu desempenho [8].

2.5. Módulos fotovoltaicos

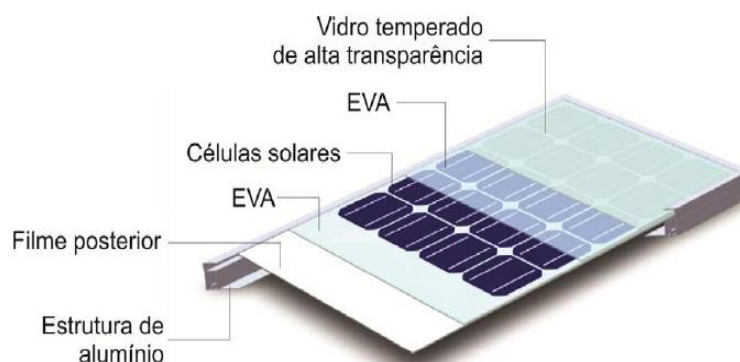
A estrutura dos módulos fotovoltaicos pode ser descrita, basicamente, da seguinte maneira: trata-se de conjuntos de células fotovoltaicas interligadas entre si para realizar conversão de energia solar em energia elétrica. O conjunto de células forma um módulo e as ligações de vários módulos formam uma matriz de painéis fotovoltaicos [2].

As células fotovoltaicas são associadas eletricamente e encapsuladas para formar o módulo fotovoltaico, que pode ser constituído por um conjunto tipicamente variando de 36 a 216 células fotovoltaicas, associadas em série e/ou paralelo. Associação esta que depende dos parâmetros elétricos (tensão, corrente e potência) mais adequados à aplicação a que o módulo se destina. As células são

encapsuladas a fim de protegê-las das intempéries e proporcionar resistência mecânica ao módulo fotovoltaico.

O encapsulamento é constituído de uma compactação de vidro temperado de alta transparência, seguido de Acetato Etil Vinila (EVA) estabilizado para a radiação ultravioleta, células fotovoltaicas, EVA estabilizado e por fim um filme inferior isolante. O filme isolante é uma combinação de polímeros, tais como fluoreto de polivinila (PVF ou Tedlar[®]), e tereftalato de polietileno (PET), dentre outros [10]. Para montagem do painel, os materiais são posicionados em uma moldura de alumínio, onde é instalada uma caixa de conexão elétrica na parte inferior para configurar os esquemas elétricos. A Figura 11 mostra um esquema dos componentes de um módulo fotovoltaico com células de c-Si [3].

Figura 11 Componentes de um módulo fotovoltaico com células de silício.



Fonte: CRESESB-CEPEL,2014

Os módulos FV de c-Si geralmente tem garantia contra defeitos de fabricação de 3 a 5 anos, e garantia do rendimento mínimo durante 25 anos. Assim, em caso de defeitos ou desempenho insuficiente, cobertos pelo tempo de garantia, os módulos FV devem ser substituídos pelo fabricante.

A degradação da potência de módulos FV de c-Si instalado em campo varia entre 0,5% e 1% por ano, e há garantia de uma potência de pico mínima (W_P) de 90% da potência nominal para o período de 10 a 12 dos primeiros anos de operação, e de 80% para o período de 20 a 25 anos, segundo dados comerciais levantados para módulos FV comerciais [11].

2.6 Sistemas fotovoltaicos

Os Sistemas Fotovoltaicos (SFV) podem ser caracterizados por dois tipos de configuração, que podem ser: isolado ou conectado à rede. O que define qual sistema utilizar é um estudo de viabilidade de cada caso, de acordo com a necessidade e disponibilidade de recursos, pois as restrições variam muito em cada projeto. Os Sistemas Fotovoltaicos Isolados (SFI) utilizam diferentes tipos de armazenamentos da energia produzida, que pode ser através de baterias, de energia potencial gravitacional em bombeamento d'água, de compressores de ar comprimido, e outros [3].

Quando se utilizam baterias, o excesso de energia produzida pode ser utilizado posteriormente, o que apresenta vantagem quanto ao fornecimento de energia, mesmo em dias nublados e no período noturno. O consumo é limitado pela capacidade do banco de baterias instalado para atender a demanda de energia elétrica. Geralmente os aparelhos nesse sistema isolado devem funcionar com corrente contínua, porém, devido ao maior custo de equipamentos que funcionam dessa forma, opta-se pela instalação dos aparelhos convencionais que funcionam com corrente alternada. Nesse caso, para atender esse requisito da demanda, há a possibilidade de se instalar inversores de frequência, que fazem a conversão da corrente contínua vinda da bateria em corrente alternada.

O sistema fotovoltaico pode ser puro ou híbrido. No Sistema Fotovoltaico Híbrido (SFH) utiliza-se outras fontes de geração de energia para complementar a produção de energia elétrica, como por exemplo, geradores a diesel, e aerogeradores, entre outras. O SFH tem necessidade de instalações mais complexas, tendo desvantagens como manutenção em locais remotos.

No Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede (SFCR), a potência produzida pelos geradores fotovoltaicos alimenta diretamente a rede elétrica, utilizando-se também um inversor que proporcione todos os requisitos de qualidade e segurança para que não comprometa a transmissão de energia elétrica fornecida pela concessionária. Existe uma resolução disposta pela Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL (Resolução nº 482 de 2012), que dispõe as condições gerais para o acesso e mini geração distribuída à rede de energia elétrica.

Sistema fotovoltaico isolado

O sistema fotovoltaico isolado pode ser individual, onde a geração atende uma única unidade consumidora, ou pode ser em redes cuja geração é compartilhada entre um grupo de unidades consumidoras localizadas próximas umas das outras. A ANEEL, através da resolução Nº 493/2012, estabelece as condições para utilização do Microssistema Isolado de Geração e Distribuição de Energia Elétrica (MIGDI) e também do Sistema Individual de Geração de Energia Elétrica com fontes intermitentes (SIGFI) [11].

Os sistemas individuais atendem à demanda elétrica de acordo com a irradiação de energia solar, sendo utilizada, como regra geral, acumuladores que permitem a utilização da energia estocada durante os períodos em que não ocorre o efeito fotoelétrico. Também se faz uso de controladores de carga, para evitar cargas e descargas excessivas no acumulador. A ANEEL não permite que as distribuidoras utilizem sistemas puramente de corrente contínua para atendimento de energia elétrica. Porém existem instalações próprias de sistemas mistos, onde há as duas formas de fornecimento de energia elétrica, CC e CA.

Sistema fotovoltaico conectado à rede

Esse tipo de sistema disponibiliza a potência gerada pelos painéis fotovoltaicos à demanda de consumo e à rede elétrica, dispensando o uso de sistemas de armazenamento comuns ao SFI. Os SFV classificados como micro e mini geração distribuídas à rede de energia elétrica e ao sistema de compensação de energia elétrica são definidas a seguir [11].

- A micro geração distribuída é a central geradora com potência menor ou igual a 100 kW, que utiliza fontes de geração com base em energia hidráulica, solar, eólica biomassa ou cogeração qualificada em conformidade com a ANEEL, conectadas à rede através das unidades consumidoras;
- Mini geração distribuída: central geradora com potência superior a 100 kW e menor que 1 MW, que utiliza as mesmas condições de micro geração. O sistema de compensação de energia elétrica é o mesmo para qualquer um dos sistemas citados anteriormente, que consiste em fornecer energia ativa por meio de empréstimo gratuito à distribuidora local, que posteriormente é compensada através do consumo de qualquer unidade consumidora que

esteja na titularidade de quem forneceu essa energia ativa à distribuidora. Os sistemas de medição da energia, segundo a ANEEL, podem ser de dois tipos: medição bidirecional de registros independentes e medições instantâneas.

3. RASTREADORES

Dentre os diversos estudos e recursos tecnológicos que buscam aumentar a eficiência dos sistemas fotovoltaicos, se encontram os rastreadores solares, que podem ser classificados de forma geral em ativos e passivos. Existem algumas subdivisões estabelecidas pela comunidade científica, onde se considera o número de eixos rotativos, o tipo de estrutura, o tipo de controle e a estratégia de rastreamento aplicado [12]. Apresentando um trabalho na mesma direção, Mousazadeh (2009), afirmam que, além das características estruturais, os rastreadores podem ser classificados também quanto ao tipo de controle que pode ser passivo ou ativo [13]. Algumas características comuns de um sistema de rastreamento solar são:

- Estrutura com uma ou duas colunas;
- Movimento em um ou dois eixos;
- Dispositivos de detecção de luz;
- Alimentação de energia autônoma ou auxiliar;
- Seguidor de luz ou de trajetória pré-programada;

O rastreador solar ou seguidor do Sol, é um dispositivo que tem a finalidade de garantir que os painéis fotovoltaicos fiquem na posição onde haja maior índice de radiação solar incidente, que na literatura é quando os raios solares estão perpendicularmente ao painel solar.

O primeiro rastreador dotado de estrutura mecânica foi desenvolvido por Finster no ano de 1962 [13]. Posteriormente, várias propostas envolvendo alto grau de complexidades inseriram-se nos estudos de rastreadores solares, proporcionando um ganho significativo, demonstrando patamares ainda maiores para contribuição do desempenho da produção dos painéis solares.

Diversos autores classificam rastreadores de uma maneira semelhante, apresentando uma forma convencional de caracterização desses sistemas [2,4]. A estrutura projetada deve atender aos requisitos de manter-se estável durante as adversidades do ambiente em que se encontra instalado, como as forças do vento predominante na região, a temperatura de operação, e as intempéries. Esses parâmetros são essências para o dimensionamento do rastreador, além do controle

da resistência mecânica dos materiais estruturais que devem ser dimensionados na fase inicial do projeto do rastreador [14].

3.1. Rastreadores passivos

Os rastreadores passivos podem ser assim classificados quando não dotarem de um sistema com fonte externa de energia para o seguimento do Sol. O trabalho de Poulek (1994) apresenta um rastreador solar passivo de um eixo, dotado de um motor de calor, o que é muito bom no ponto de vista energético, porém esse conceito apresenta desvantagens como baixo rendimento em temperaturas abaixo do limite de funcionamento dos materiais atuadores [15].

Outro tipo de seguidor passivo é o baseado na expansão térmica de um líquido do tipo Fréon, onde ocorre um aumento de volume quando o mesmo é exposto a um aumento de temperatura. O gás expande e se desloca em tubo reservatório, provocando o movimento dos painéis solares de uma forma definida para o acompanhamento do Sol, funcionando também como controlador do dispositivo [2]. A desvantagem deste tipo de seguidor é que ele possui baixa precisão, e possui uma restrição do seu uso em locais que apresentem grandes variações térmicas. Em contrapartida sua vantagem está em ser simples e não precisar de motores para movimento.

3.2. Rastreadores ativos

São seguidores que podem utilizar diferentes métodos, estruturas ou algoritmos cronológicos para rastrear o Sol, utilizando um motor que responde a parâmetros estabelecidos em um componente eletrônico para se movimentar de acordo com a maior incidência solar sobre o módulo fotovoltaico. A subdivisão dos rastreadores ativos pode ser feita da seguinte forma: seguidor polar de eixo único, seguidor de eixo horizontal, seguidor de eixo vertical ou ângulo azimute, e seguidor de dois eixos.

Utilizam-se motores de passo, motores de corrente contínua ou motores de indução, sendo bastante amplas as alternativas de motores para uso nos seguidores. No trabalho apresentado por Abdallah e Nijmeh (2004), foi desenvolvido um rastreador solar do tipo azimutal, onde o controle do rastreador é em malha

aberta, através de um Controlador Lógico Programável - CLP. O sistema deles apresentou eficiência de 41,34%, quando comparado com um sistema fixo nas mesmas condições [16].

Abouzeid (2001) propôs um rastreador solar do tipo polar de um eixo, baseado em uma matriz lógica programável, onde seu controle foi feito por malha fechada, utilizando motor de passo e duas células fotovoltaicas para obter valores de tensão de referência, que são lidos pelo dispositivo. Quando esses valores atendem às condições das variáveis estabelecidas para gerar o movimento, os atuadores são acionados [17]. O rastreador polar de eixo único é um seguidor que tem um eixo Norte –Sul, de rotação que varia em eixo de ângulo fixo em relação à superfície, ajustado de acordo com a latitude do local, garantindo que o painel solar buscará o máximo de tempo estar perpendicular ao Sol, principalmente durante os equinócios da primavera e de outono. Esse tipo de rastreador possui a vantagem de ser relativamente simples e de aumentar a eficiência do sistema em 1,7 vezes em relação ao sistema estacionário [18].

Na mesma direção, Kalogirou (1996) apresentou um rastreador solar de um eixo, com um motor de corrente contínua ligada a uma caixa de redução, onde o movimento é orientado por controladores analógicos, através de circuitos integrados. Já a posição do Sol é identificada por três sensores Light Dependent Resistor-LDR's. Um sensor faz a leitura dos raios solares perpendiculares ao módulo fotovoltaico, sendo que suas variações durante o dia é que acionam o motor. Já o segundo sensor detecta a presença de sombra e o terceiro detecta se é dia ou noite [14].

Roth, Georgiev e Boudinov (2004) propuseram um rastreador de dois eixos em que seu sistema de tração utiliza dois motores de corrente contínua, e seu controle é de malha fechada. Nessa estrutura utilizava-se potenciômetros como sensores de posição, um pireliômetro para medir a radiação direta e sensores de luminosidade, para identificar se é dia ou noite [19]. Seus resultados mostraram um ganho de 29% na eficiência [6].

Alguns autores demonstraram que os rastreadores de um eixo apresentam uma eficiência menor que a de dois eixos, porém com menor complexidade. O ganho obtido pelos rastreadores de dois eixos em relação ao rastreador de um eixo é de até 40% [13]. Segundo a literatura pesquisada, mostram que dependendo do

local e de outros fatores como custo de construção e mão de obra especializada, nem sempre é mais vantajoso colocar rastreadores de dois eixos [14]. A radiação solar mensal apresentada nas localidades próximas à linha do equador (latitudes próximas de 0°) variam bem pouco, o que viabiliza, por exemplo, o uso de rastreadores de um eixo.

Rastreador solar polar

Nesses rastreadores, a estrutura de fixação dos módulos fotovoltaicos é posicionada sobre um eixo inclinado Norte - Sul, com ângulo de inclinação fixo que depende da latitude do local de instalação, Figura 12. A forma de controle do rastreamento no trabalho de Abouzeid é baseado através de sensores que variam de acordo com a iluminação do local, porém, podem ser aplicadas outras formas de controle [20].

A estrutura mecânica possui uma forma simples de instalação, sendo necessário um dimensionamento da estrutura metálica, visando garantir um suporte seguro. Esse tipo de rastreador produz maior quantidade de sombra que o rastreador horizontal e azimutal. O movimento do rastreamento desse tipo de rastreador é do Leste - Oeste.

Figura 12 Rastreador Solar Polar.



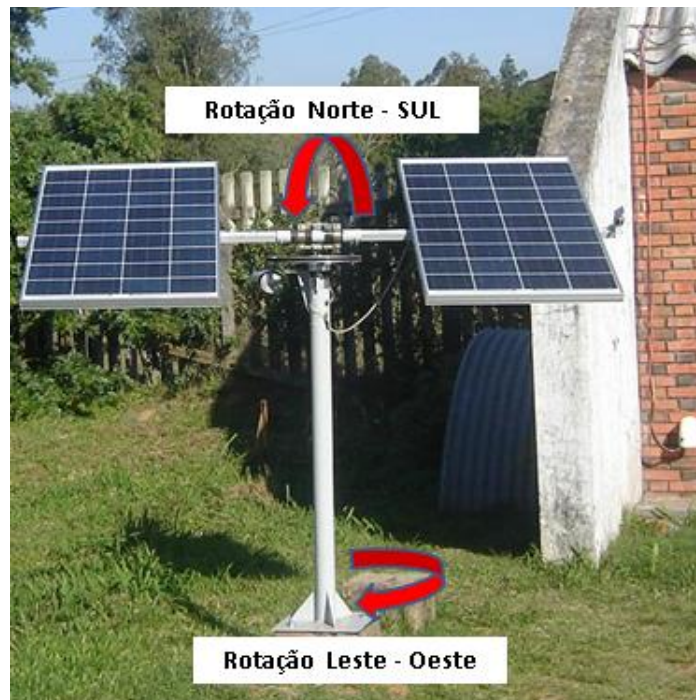
Fonte: mecasolar (website) (Adaptado)

Rastreador Vertical

Esses rastreadores possuem um eixo vertical que suporta a estrutura de fixação dos módulos e possui um sistema de giro, que permite a rotação no sentido Leste-Oeste, e também rotação do eixo no sentido Norte-Sul. A escolha da quantidade de eixos rotativos que serão controlados está relacionado ao estudo de viabilidade de cada região. A principal diferença de aplicações entre rastreadores de um eixo e de dois eixos está na latitude do local.

Quanto mais próximo da linha do equador, menor a variação da radiação ao longo do ano [3]. O ângulo de captação em rastreadores de um eixo pode ser ajustado manualmente, Figura13. Este tipo de rastreador produz menos sombra do que o rastreador polar. O rastreador de um eixo azimutal apresenta vantagens em ser mais simples no que tange a estrutura e gasto de energia para movimentos e estabilidade do sistema.

Figura 13 Rastreador Vertical (ângulo azimutal).



Fonte: Seguidorsolar (website) (Adaptado)

Rastreador solar de eixo horizontal

Os rastreadores solares de eixo horizontal operam no sentido Leste-Oeste, com ângulo de inclinação de zero grau em relação ao solo. O ângulo de inclinação é

fixo, muito utilizado em sistemas que têm muitos módulos e apenas um motor para a movimentação da estrutura. A complexidade mecânica nesse tipo de estrutura é consideravelmente grande, porém é um sistema vantajoso em grandes parques e usinas fotovoltaicas, Figura14.

Esse tipo de seguidor possui um eixo horizontal que serve como pivô para os painéis, o que permite um seguimento sazonal do Sol. É possível afirmar que um seguidor vertical vai colher menos 7% da radiação que um seguidor de dois eixos e mais 4% do que um seguidor polar [2]. Além das estruturas dos rastreadores citados anteriormente, existem outros em desenvolvimento, pois se trata de um campo de pesquisas bastante explorado atualmente.

Figura 14Rastreador Solar de Eixo Horizontal.



Fonte: mecasolar (website) (adaptado).

Alguns rastreadores específicos serão brevemente comentados, como por exemplo, o seguidor giratório, que consiste em uma plataforma rotativa presa a uma base fixa, e capaz de fazer o seguimento de Leste a Oeste. Na parte superior de sua plataforma vai estar os painéis fotovoltaicos, que por sua vez vão estar assentados em fileiras sobre um eixo horizontal, que faz o seguimento manual na direção N-S.

Esse tipo de seguidor é normalmente utilizado para coordenar o seguimento de um grande número de painéis, sendo muito robusto e de construção relativamente simples. A desvantagem do rastreador giratório de dois eixos é o fato de ser necessária a manutenção constante das suas partes móveis. Rastreadores

desse tipo têm estrutura metálica com uma série de apoios fixos ao solo, onde se sustenta a fixação da base da roda [2].

Rastreador solar de dois eixos

Esse seguidor tem um poste vertical que permite o movimento segundo o eixo Leste-Oeste, e outro eixo na transversal que realiza o movimento Norte-Sul, Figura15. A estrutura permite diversas aplicações de motores e mecanismos de transmissão de potência para realizar os movimentos dos eixos rotacionais, e seu sistema de controle pode ser de controle aberto ou fechado.

Esse tipo de rastreador apresentou um ganho de 30% em relação a módulos instalados em estrutura fixa com inclinação igual à da latitude local (40°), mostrando-se viável sua instalação na região em que foi realizado o trabalho desse autor [13].

Figura 15 Rastreador de Dois Eixos.



Fonte: Ramiro, 1995.

3.3 Sistemas com sensores para controle do rastreador ativo

Existem muitas formas de fazer o controle de um rastreador solar, que pode ser de malha aberta ou de malha fechada, utilizando sensores e/ou algoritmos de

determinação da posição do Sol [2,12,13]. Os seguidores que utilizam sensores podem utilizar dispositivos fotossensíveis para determinar a posição do Sol. O seguimento feito com fotossensores é controlado por malha fechada, e utiliza ao menos um sensor por cada eixo. A precisão de todos os componentes está atrelada às propriedades dos materiais envolvidos e à arquitetura de seus posicionamentos.

O seguimento com visão artificial utiliza uma câmera de filmagem para determinar a incidência dos raios do Sol. Através de uma posição no centro da câmera e um algoritmo, busca-se manter o Sol sempre nesse ponto. Esse sistema apresenta vantagens de resolução e precisão, mas faz uso de extensos algoritmos de detecção e identificação, e que são exclusivos. A sua visão periférica é ampliada e pode ser facilmente aplicada. Algumas desvantagens são: a exposição da lente da câmera, que se danifica rapidamente em condições de operação, e sua complexidade de alto grau quando comparada com sensores fotossensíveis [2].

Os seguimentos sem sensores são feitos em malha aberta utilizando algoritmos que vão calcular as coordenadas solares e podem ser divididos em dois grupos: um grupo utiliza a declinação solar ou a equação do tempo, precisando da data, hora e ano do momento para calcular a localização do Sol, um segundo grupo apresenta alta complexidade, pois precisa de grande capacidade de processamento para calcular dados da posição precisa do Sol. No segundo grupo considera-se um número maior de variáveis, e também dados complementares ao sistema, além da radiação solar. O seguimento misto é a união dos dois grupos citados [2].

Fazer o seguimento do Sol com sensores de luminosidade (LDR) é uma estratégia de controle, sendo utilizados comumente em malhas fechadas, para ativar os atuadores dos rastreadores [14]. Esses sensores podem ser colocados de forma específica para que melhor percebam o movimento do sol. Eles podem ser feitos com uma superfície dotada de uma placa de polietileno que divide os dois sensores de luminosidade, com superfícies inclinadas, ou ainda com uso de colimadores. Seu baixo custo e eficientes resultados justificam o grande número de aplicações desses dispositivos no mercado.

4. METODOLOGIA

Este trabalho foi desenvolvido para comparar a geração de energia elétrica que é produzida por painéis solares fotovoltaicos de silício monocristalino em duas situações distintas. Foram instalados dois sistemas fotovoltaicos idênticos, sendo um em estrutura fixa e o outro com rastreador solar, ambos nas mesmas condições de operação e com medidas simultâneas. O trabalho foi dividido em duas etapas.

Na primeira etapa foi desenvolvido um dispositivo em uma estrutura fixa para fazer a leitura e para registrar os dados elétricos produzidos pelos painéis fotovoltaicos, que foi chamado de Registrador. Esse dispositivo foi aferido com um multímetro calibrado. O Registrador desenvolvido utiliza plataforma para programação, utilizando recursos disponibilizados pelo fabricante Arduino. Porém, como o Arduino é uma plataforma *open-source*, os códigos apresentados neste trabalho são específicos para o desenvolvimento do rastreador planejado.

Na segunda etapa foi construído o protótipo do rastreador, que contempla: a estrutura mecânica, a programação e o desenvolvimento do dispositivo rastreador solar. Para atender os requisitos de rastreamento solar foram realizadas revisão da literatura e análise dos parâmetros dos dados solares na região, visto que o sistema de rastreamento é baseado na leitura desses dados.

Revisando a literatura foram identificados diversos tipos e eficiência de rastreadores. Os rastreadores de um eixo são os que apresentam custo benefício mais vantajoso em pequenas produções de energia fotovoltaica. Com isso optou-se pelo rastreador solar de um eixo, visto que apresenta baixa complexidade mecânica e a produção de energia é próxima ao do rastreador de dois eixos.

4.1. Registrador de tensão e corrente

A lógica de programação atendeu aos requisitos de valores das entradas digitais e analógicas do Arduino, juntamente com os dados elétricos indicados pelo fabricante do módulo Fotovoltaico. Os dados elétricos dos módulos fotovoltaicos utilizados são tensão de circuito aberto: 19 volts, Corrente de curto circuito: 8 ampere e potência nominal de 75 watts.

Para leitura da tensão dos sistemas fotovoltaicos foi necessário reduzir a tensão fornecida pelos painéis na entrada do Arduino, pois sua faixa de tensão

permitida é de 0 (zero) até 5 (cinco) volts. Com a aplicação do divisor de tensão atende-se esse requisito, disponibilizando-se até 5volts ao registrador de tensão e corrente. Esse valor de tensão lido pelo registrador é multiplicado pela relação proporcional da tensão de entrada e tensão de saída, que nesse trabalho é de 1:4. A equação 6 apresenta os cálculos do divisor de tensão aplicado ao dispositivo [21].

$$V_{out} = \frac{3,3\Omega}{3,13\Omega+10\Omega} * 20 V = 4.96 \text{ volts} \quad (6)$$

A partir dessas informações e fazendo uso da configuração do Arduíno, obtém-se os parâmetros para cálculo do divisor de tensão, que opera na faixa de até 5 V. Para medição de corrente através do dispositivo foram utilizados dois módulos de corrente ACS712, que opera com corrente de até 30 A. A leitura através do módulo de sensor de corrente é pelo efeito Hall, onde a variação de corrente é reconhecida pela variação de tensão lida pelo Arduíno. O cálculo dos parâmetros para aplicabilidade do sensor de corrente é apresentado na equação 7 [22].

$$CS = \left[\frac{\left(\left(\frac{(M)(5000 \text{ mV})}{1024 \text{ bits}} \right) - 2500\text{mV} \right)}{66 \frac{\text{mV}}{\text{A}}} \right] \quad (7)$$

Onde: CS= Corrente contínua, e M= Média das Amostras lidas pelo ACS 712 (bits).

Depois de considerados os parâmetros para tensão e corrente, foram inseridos o módulo de cartão SD e o módulo de relógio DS1307 e aplicadas suas configurações no esquema elétrico para criar o registrador de tensão. O circuito elétrico foi desenvolvido no programa de circuitos elétricos da Autodesk 2018. Posteriormente, ele foi enviado ao laboratório de eletrônica para ser impresso em uma Placa de Circuito Impresso – PCI, e para serem instalados os componentes do Registrador. A lógica de programação utilizada encontra-se no Apêndice deste trabalho.

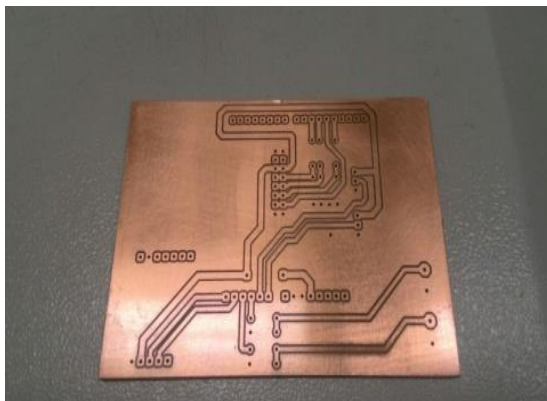
O micro controlador usado neste trabalho é o Arduíno UNO R3, que tem a função de processar as informações, os parâmetros e de fornecer uma resposta de acordo com a lógica pré-estabelecida na programação. Sua programação é realizada em uma plataforma de código aberto, sendo sua conexão com o *hardware* feita através de um cabo USB conectado ao computador. O registrador e sua placa de circuito impresso podem ser observados na Figura 16.

Para a construção do Registrador foram utilizados os seguintes materiais:

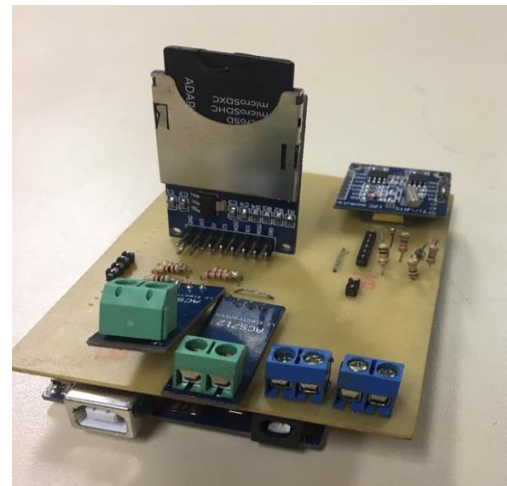
- Placa de Arduíno UNO;

- 02 divisores de tensão;
- 02 módulos de sensor de corrente ACS 712;
- Módulo de relógio DS 1307;
- Módulo de Cartão Sd;
- Placa de Circuitos Impresso PCB;

Figura 16 Dispositivo desenvolvido para registro de dados dos módulos



a) PCB do Registrador



b) Registrador de Tensão e de Corrente

Fonte: Autor

Os dados elétricos obtidos pelo Registrador são arquivados no cartão de memória micro SD de fácil acesso em campo, em um formato de arquivo (ASCII), que pode ser aberto em um editor de texto simples e disponível em todos os microcomputadores. A sua operação é de 24 horas por dia, com um tempo de leitura de 30 segundos, proporcionando uma maior precisão dos dados observados. Para garantir que as leituras das medidas elétricas fossem padronizadas, utilizou-se um multímetro para calibrar o registrador.

O circuito de teste utilizado é composto por um equipamento de potência variável, uma fonte de tensão variável e um multímetro calibrado. A seguir são descritos as especificações dos componentes utilizados para comparação das medidas elétricas lidas pelo registrador e pelo multímetro. Esse procedimento ocorreu antes de iniciar a coleta de dados nos sistemas fotovoltaicos.

- Equipamentos de Potência 200 W / Resistência 450 Ω / 0 – 36 V/ 0 – 3 A
MARCA: ICEL MANAUS MODELO: OS- 7000;

- Multímetro Politerm, modelo A6

Depois de desenvolvido o registrador foi aplicado o procedimento de medição comparativa com um multímetro calibrado. Na Tabela 2 são apresentados os valores das medidas obtidas durante essa medição. A média de erro foi 3,6% nos valores de corrente e uma média de 0,1% nos valores de tensão. O desvio padrão da corrente foi de 1,07%, e o desvio padrão da tensão foi de 0,22%.

A faixa de valores apresentados na Tabela 2 é a mesma produzida pelos módulos durante a pesquisa, o que proporcionou uma maior proximidade dos valores que seriam coletados em campo. Os dados obtidos pelo registrador proporcionam uma confiabilidade para aplicação nos sistemas fotovoltaicos.

Tabela 2 Dados obtidos pela comparação entre o registrador de tensão e corrente e um multímetro calibrado

Registrador de Tensão e Corrente		Multímetro Calibrado			
Corrente (A)	Tensão (V)	Corrente (A)	Erro Registrador	Tensão (V)	Erro Registrador
0,74	10	0,7	5,1%	10,1	1%
1,32	11	1,26	4,9%	11,1	0,90%
1,47	12	1,4	4,7%	12,1	0,83%
1,57	13	1,5	4,5%	13,1	0,76%
1,67	14	1,6	4,3%	14,1	0,71%
2,08	15	2	3,9%	15,1	0,66%
2,58	16	2,5	3,1%	16,1	0,62%
2,98	17	2,9	2,9%	17,1	58,00%
3,18	18	3,1	2,6%	18,1	55,00%
3,38	19	3,3	2,4%	19,1	0,52%
3,87	20	3,8	1,9%	20,1	0,50%
Média do Erro		3,6%		0,1%	
Desvio padrão do Erro		1,07%		0,22%	

Fonte: Autor

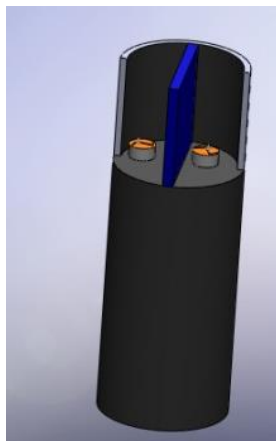
A capacidade de operação nominal do registrador de tensão e de corrente, e a capacidade de armazenamento de dados do cartão de memória, encontram-se nas seguintes faixas de trabalho: 0 - 20 V; 0 - 30 A; e 2 Giga Bytes, respectivamente. Nesse sentido, o registrador pode ser aplicado em diversos sistemas fotovoltaicos que atendam a esses limites elétricos de funcionamento.

4.2. Rastreador solar vertical azimutal

O sistema de controle para realizar o rastreamento do Sol utilizou três sensores de luminosidade LDR, um apenas para verificação da intensidade da luz e dois para realizar o rastreamento do Sol. O controle de rastreamento utilizado foi de malha fechada. O sensor de intensidade de luz ficou localizado na parte superior do rastreador, ao mesmo nível do módulo fotovoltaico.

À medida que ocorria sombreamento em um dos sensores, a tensão variava proporcionalmente ao nível de sombreamento, e conseqüentemente movimentava-se o rastreador. Esse sistema de controle de luminosidade é o principal responsável pelo rastreamento, sendo responsável pelo desempenho do rastreador. O suporte dos sensores de rastreamento está apresentado na Figura 17.

Figura 17 Suporte para os Sensores LDR



Fonte: Autor

O conversor A/D do Arduíno UNO R3 possui dez bits de resolução, e utilizando a tensão de referência de cinco volts, com isso apresenta um degrau de conversão de 4,88 mV. Com essa condição, os valores dos sinais do LDR foram convertidos em valores digitais. O sensor de presença de Sol foi relacionado com a

corrente produzida pelo módulo fotovoltaico. Essa relação estabeleceu a condição de movimento do rastreador, que acontecia apenas se o valores de corrente dos módulos fosse acima de um ampere. Os sensores de rastreamento solar foram baseados na variação de tensão devido à intensidade de luminosidade.

Após verificar o funcionamento do micro controlador Arduíno com o dispositivo LDR, o protótipo do sistema controlador pôde ser colocado em campo para registro das variações da resistência dos LDR em função luminosidade que está diretamente relacionada com a radiação solar.

Após análise dos valores obtidos durante alguns dias, foram estabelecidos os parâmetros de rastreamento do controlador, seguindo os valores de referência apresentados na Tabela 3. Esse levantamento determina qual a sensibilidade do sistema de controle durante o rastreamento, sendo a principal variável que contribui para o melhor desempenho do rastreador. A identificação do sentido do movimento e a quantidade de pulso enviado ao atuador dependem de qual sensor é sombreado, e do valor de tensão gerado neles. Por exemplo, na linha 2, o valor da tensão gerada pelo sensor de presença de Sol é de 2,59 V, a partir dessa condição, os valores de tensão do sensor de rastreamento determinam a direção do movimento do atuador.

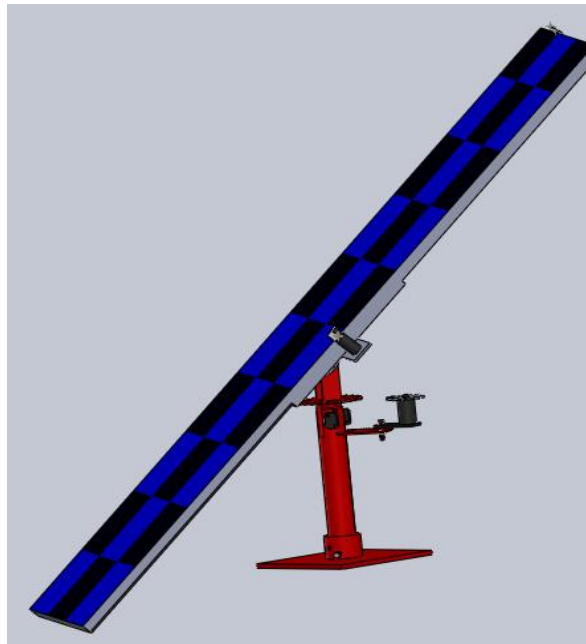
Tabela 3 Tabela dos valores de LDR em campo

Radiação kJ/m ²	Sensor presença de Sol	Sensor de rastreamento azimute		
		Mov. Leste	Mov. Oeste	Perpendicular ± 0,1 V
3.000	LDR <2,34 V	0	0	0
3.000	LDR= 2,59 V	>= 4,69 V	<= 3,62 V	4,59 V
3.100	LDR= 2,64 V	>= 4,66 V	<= 3,52 V	4,42 V
3.150	LDR= 2,68 V	>= 4,64 V	<= 3,37 V	4,35 V
3.200	LDR= 2,73 V	>= 4,54 V	<= 3,32 V	4,15 V
3.300	LDR= 3,17 V	>= 4,25 V	<= 3,13 V	4,11 V
3.800	LDR= 3,61 V	>= 3,32 V	<= 2,64 V	3,11 V

Fonte: Autor

Para escolha da relação de transmissão e do motor de passo a serem utilizados no rastreador solar, respeitaram-se alguns requisitos mais usuais de projeto, tais como: custo, eficiência e manutenção. A escolha da transmissão de bicicleta para o rastreador levou em consideração a redução de potência proporcionada pela relação de diâmetros das engrenagens, conforme segue na Figura 18.

Figura 18. Cálculo do motor de passo



Fonte: Autor

Dados: peso do módulo fotovoltaico= 12 kgf; diâmetro da coroa= 200 mm; diâmetro do pinhão= 80 mm, e relação de número de dentes coroa/ pinhão: 1:3.

$$T = F \times S \quad (7)$$

onde: T = Torque; F = Força e S = Deslocamento.

Força solicitada pela carga:

$$120 \text{ Nm} = F_{\text{coroa}} \times 0,2 \text{ m}$$

$$F_{\text{coroa}} = 120 \text{ Nm} / 0,2 \text{ m}$$

$$F_{\text{coroa}} = 600 \text{ N}$$

Torque mínimo do motor:

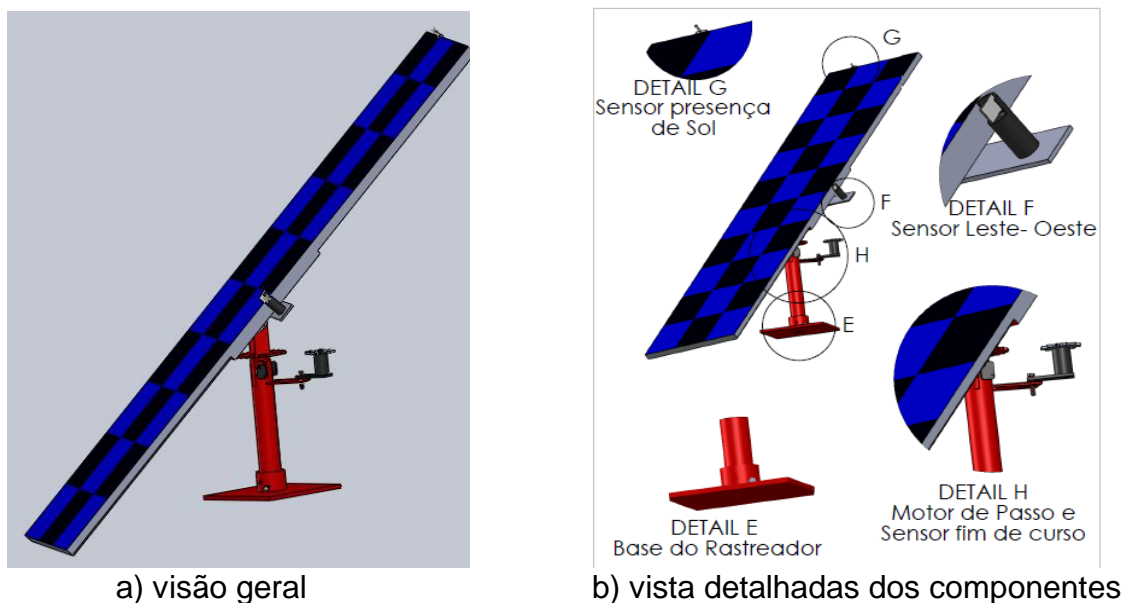
$$T_{\text{pinhão}} = 600 \text{ N} \times 0,08 \text{ m}$$

$$T_{\text{pinhão}} = 48 \text{ Nm}$$

Após o dimensionamento sistema de transmissão, foi selecionado o motor de passo Nema 6kgf.cm, com ângulos de passo de 1,8 graus. Com a relação de transmissão por corrente estabelecida, pôde-se reduzir o ângulo de cada passo no rastreador em aproximadamente 1:3. Essa relação proporcionou uma resolução de rastreamento ainda melhor, ou seja, menor que um grau por passo. O motor de passo escolhido opera com corrente contínua, na faixa de tensão de 7 – 35 V, atendendo aos objetivos de ser alimentado pelo próprio sistema fotovoltaico, tornando-se um sistema autônomo e independente de outras fontes de energia elétrica.

Na Figura 19, encontra-se o desenho da estrutura mecânica desenvolvida para o Rastreador, que foi projetada no software de desenho 3DSolidworks 2013. A escolha de definir o protótipo do rastreador azimutal, desde o primeiro momento da pesquisa, foi baseada em estabelecer os parâmetros que deveriam ser atendidos pelo protótipo, como geometria do rastreador, custo e viabilidade técnica. Com o desenho em 3D foi possível obter informações importantes antes da aquisição dos componentes para desenvolver o rastreador, visto que foram realizadas várias alterações nos desenhos para definir qual seria a melhor opção de aplicação.

Figura 19 Estrutura Mecânica do Rastreador Azimutal no SolidWorks 2013



Fonte: Autor

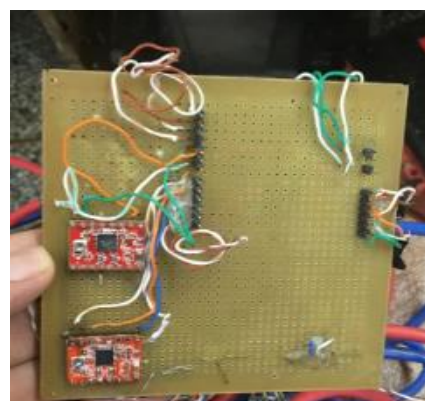
No desenho mecânico foram detalhadas as posições dos sensores de fim de curso (*micro switches*), a posição dos sensores LDR e demais componentes, com uma liberdade de alteração virtual do protótipo. O desenho auxiliou nas solicitações de compra de componentes e usinagem de peças, com medidas e vistas bem detalhadas. Para construção da estrutura mecânica do rastreador, Figura 20, foram utilizados materiais e equipamentos conforme lista a seguir:

- Base de uma cadeira giratória reciclada,
- Coroa, pinhão e corrente de bicicleta,
- Motor de passo NEMA 6 kgf.cm,
- Chapa metálica 1.1/4" e 3/16";
- Chapa metálica 20mm espessura.

Figura 20 Estrutura mecânica do rastreador solar vertical de um eixo e Controlador.



a) Rastreador solar em campo



b) Controlador do rastreador

Fonte: Autor

As escolhas do micro controlador Arduíno e demais componentes do controlador foram feitas levando-se em consideração o custo e eficiência para o sistema de controle de rastreamento. O sistema do controlador foi programado de acordo com os parâmetros do movimento do Sol, através da leitura dos sensores

LDR e a variação do ângulo dos movimentos do motor de passo. O software utilizado foi o Arduíno e a lógica de programação do controlador encontra-se nos apêndices. O esquema elétrico do rastreador solar produzido foi realizado utilizando-se o software *EASYEDA* e também se encontra nos apêndices.

O sensor de fim de curso funciona através do componente eletromecânico *micro switch*, permitindo ao controlador identificar seu estado de funcionamento a todo instante. A instalação dos sensores de fim de curso no rastreador tem um deslocamento entre eles de 180°.

A lista de materiais para construção do dispositivo controlador do rastreador solar é: Micro controlador Arduíno UNO, Sensor LDR, Sensor de fim de curso eletromecânico (interruptor de alavanca); *Driver* de Motor de Passo Bipolar A4988 e Motor de passo bipolar NEMA 6kgf.cm.

Depois de feito todo o processo de dimensionamento, iniciou-se o processo de fabricação estrutural do rastreador azimutal, sendo necessário ir para oficina mecânica, centros de usinagem e serralheria para realizar os procedimentos descritos a seguir:

1. Cortes na cadeira reciclada;
2. Cortes e furos no suporte de motor de passo e do módulo fotovoltaico;
3. Soldagens da coroa na estrutura do rastreador
4. Adaptação do pinhão no motor de passo
5. Furos para fixação da chave de fim de curso;
6. Desenvolvimento dos suportes de LDRs;
7. Pintura da estrutura;
8. Montagem e soldagens finais do rastreador solar.

Depois de fabricado o protótipo do rastreador, o mesmo foi colocado em campo, sendo interligado ao sistema fotovoltaico. Os valores de corrente do motor de passo foram medidos para verificar seu consumo, e assim atestar os valores que seriam incluídos no cálculo de desempenho do sistema. O valor de potência obtido pelo motor de passo foi de 10W por cada pulso acionado, em que o tempo de cada pulso é de um segundo. Para o rastreamento solar durante o dia, o percurso a ser realizado pelo motor de passo precisou de 240 passos, desde o movimento inicial pela manhã até o final, ao anoitecer.

Após anoitecer, o sensor fim de curso é acionado pela estrutura mecânica instalada, fazendo com que o motor de passo de 120 passos para oeste. Com isso o posicionamento do módulo fica próximo da direção do Norte. Somando-se a energia de todos os passos possíveis durante um dia inteiro, tem-se um total de 360 passos, totalizando 3600 Ws/dia, que equivale a um total de 1Wh/dia.

O ajuste do ângulo de inclinação em relação ao Norte pode ser feito manualmente, através dos parafusos de regulagem instalados no rastreador. O módulo fotovoltaico é facilmente instalado no rastreador com a fixação de dois parafusos na chapa de sustentação acima do eixo rotacional. Para regulagem da transmissão de potência, utilizou-se um sistema de chapas que permite o tencionar da corrente nos períodos de manutenção, evitando assim tempo elevado das manutenções. A base do rastreador pode sofrer alteração visando se adaptar aos telhados e superfícies que receberem sua instalação, desde que seja feito um estudo estrutural para aplicação.

4.3. Estudo comparativo dos sistemas fotovoltaicos

Esse trabalho foi desenvolvido na cidade de Campo Grande, no estado de Mato Grosso do Sul, com sua localização sob as coordenadas a seguir: latitude: -20° 26' 34", longitude: -54° 38'47" e altitude: 532 metros [23]. Os níveis de radiação nesta região são muito favoráveis às instalações de painéis fotovoltaicos, conforme visto na literatura, apresentando níveis de radiação solar no plano inclinado – média anual de aproximadamente 5.000 Wh/m² [24].

O local da instalação do sistema fotovoltaico deste trabalho foi na Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. Foi desenvolvida primeiramente uma estrutura fixa para apoio dos módulos, com um ângulo de inclinação de 20° uma estrutura portátil de proteção dos dispositivos elétricos, visando sua proteção de umidade e outras interferências do tempo. Os ensaios experimentais desenvolvidos foram realizados através do sistema fotovoltaico isolado (SFI).

As mesmas condições de trabalho foram estabelecidas para os dois módulos, dentre as quais estão o consumo elétrico, o banco de baterias, os inversores de frequência, os controladores de carga e o local de instalação. Com essa metodologia aplicada nesse estudo, as condições de realizar um estudo comparativo das

produções dos módulos fotovoltaicos foram possíveis, exibindo assim um descritivo qualitativo e quantitativo das potências produzidas pelo recurso fotovoltaicos no estado de Mato Grosso do Sul.

Na Figura 21 pode-se ver uma foto das duas estruturas de sistema fotovoltaico em funcionamento, onde uma está instalada em estrutura fixa e a outra se encontra instalada na estrutura móvel.

Figura 21 Estrutura fixa e o Rastreador solar azimuthal



Fonte: Autor

Ambos os sistemas fotovoltaicos isolados continham os seguintes equipamentos e acessórios para estudo: Baterias estacionárias de 150 Ah, Inversores de frequência 300 W, controladores de carga de 20 A, módulo fotovoltaico de silício mono cristalino de 75W, registrador de tensão e corrente, rastreador solar (em somente um deles) e 4 Lâmpadas LED de 30 W cada uma. As limpezas dos módulos foram realizadas em intervalos de 15 dias.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste trabalho foi realizado um estudo comparativo de dois sistemas fotovoltaicos, através de dois tipos de estruturas. Um sistema utiliza-se de uma estrutura fixa, e a outra se encontra com rastreador solar. Os resultados mostram as vantagens de se instalar o rastreador na região. Foram obtidas as produções de energia diária dos sistemas fotovoltaicos e analisadas qualitativamente as variações causadas pelo sombreamento de nuvens que influenciavam na geração de energia.

Serão abordadas as produções de energia nos dias com maior rendimento e menor rendimento, com intuito de mostrar a capacidade de ganho proporcionado pelo rastreamento na região. As médias dos ganhos foram plotadas e apresentaram resultados que servem de apoio para projetos futuros que venham a aplicar o sistema com rastreamento. A caracterização da radiação será apresentada através de fontes de pesquisas de estação meteorológicas governamentais certificados.

O consumo de energia dos motores de atuação no sistema de rastreamento será abordado a fim de demonstrar que sua aplicação tem viabilidade técnica. Também será apresentado o ganho real da produção de um sistema aplicado na região e qual seu retorno de investimento.

5.1. Radiação solar observada

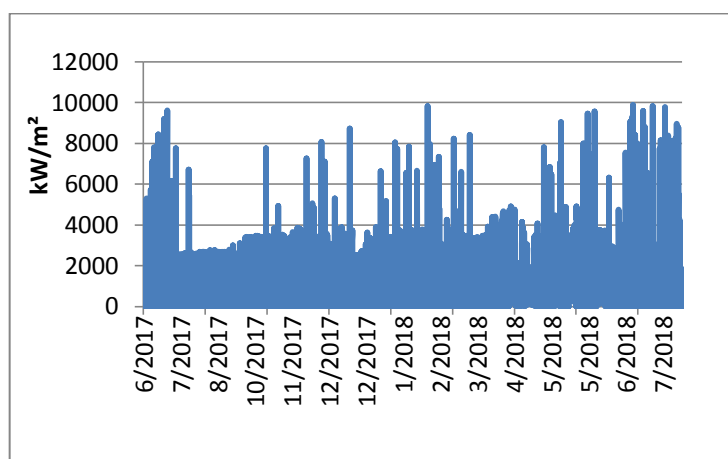
Foi realizado o levantamento da radiação solar no estado, obtendo-se os dados através da estação meteorológica do Instituto de Meteorologia de Campo Grande- INMET, conforme Figura 22. Esses valores de um ano caracterizam um nível de radiação típico para a região [25]. O índice de radiação analisado é entre junho de 2017 e julho de 2018, apresentando valores com oscilação mais intensa nos meses de junho 2017 e junho e julho de 2018. Nesses meses os valores chegam acima de 8.000 kW/m². Nos dias finais do mês de julho de 2017 até dezembro, verifica-se que a radiação fica abaixo de 4.000 kW/m², com alguns dias de radiação alcançando 8.000 kW/m².

A radiação acima de 3.000 kW/m² representa cerca de 80% dos dias analisados, mostrando condições de produções capazes de fornecer produções de energias fotovoltaicas equilibradas durante o ano. O índice de variação da radiação

na região esclarece um dos principais fatores de dimensionamento fotovoltaico, que é a demanda de energia capaz de atender um consumo. Com valores de radiação sem oscilações drásticas durante o ano, promove o fornecimento seguro para os geradores de energia fotovoltaicos.

De acordo com a produção gerada pelo módulo fotovoltaico em dias com radiação chegando a 4.000 kW/m^2 , apresenta um desempenho de 70% da potência nominal. Nos dias em que alcança radiação atinge 8.000 kW/m^2 , o desempenho promove 90% da potência nominal, mostrando que não há geração do valor total da potência dos módulos discriminado pelo fabricante, conforme será mostrado no item de produção fotovoltaico.

Figura 22 Radiação durante um ano de medidas entre junho/2017 e junho/2018



Fonte: INMET, 2017

Foram levantadas outras fontes de medidas de radiação para a região, que demonstraram as capacidades médias mensais típicas para região. De acordo com os valores de irradiação solar diária média mensal fornecida pelo CRESESB, através do programa Sundata V 3.0, a região de Mato Grosso do Sul tem sua caracterização de energia recebida por metro quadrado disposto na tabela 4 [26]. Nessa tabela os valores da irradiação solar são apresentados para vários ângulos de inclinação, sendo que a média anual de todos os ângulos de inclinação apresentados, tem produção anual bem próxima, em torno de $5 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{dia}$.

Tabela 4 Irradiação solar Anual - média mensal em Mato Grosso do Sul

Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal (kWh/m ² .dia)												
		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	média
Ângulo igual à latitude	20° N	5,11	5,4	5,39	5,32	4,8	4,68	4,79	5,51	5,18	5,29	5,42	5,5	5,2

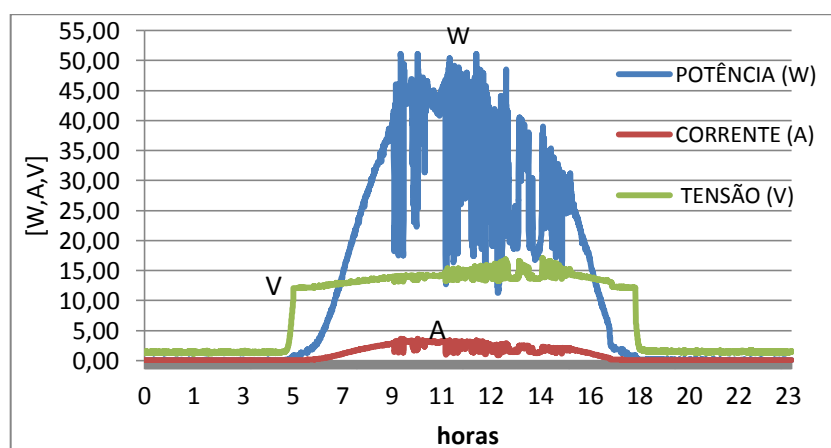
Fonte: CEPEL,2017

Nos valores obtidos para um ano de leitura dos dados fornecidos pelo INMET, é observado que nos meses de junho e julho, têm-se radiações bem maiores que o período dos outros meses, diferenciando-se dos valores fornecidos pela CEPEL na Tabela 4. Porém, os dados fornecidos pela estação da CEPEL são médias mensais de irradiação, o que pode divergir das medidas fornecidas pelo INMET diariamente. Os valores de produção foram caracterizados com as medidas diárias fornecidas pela estação meteorológicas de Campo Grande, visto que seus valores coincidem com as produções dos módulos fotovoltaicos obtidas durante os trabalhos desenvolvidos.

5.2 Medidas obtidas pelo sistema fotovoltaico isolado

Na Figura 23 observa-se a leitura dos dados elétricos realizados no dia 08/03/2017 pelo SFI. As grandezas elétricas apresentadas no gráfico são de corrente, tensão e potência. O eixo da vertical apresenta os valores obtidos para cada grandeza elétrica, e o eixo horizontal apresenta as horas da medida.

Figura23 Curvas características típicas de tensão, corrente e potência em função do horário da medida - 08/03/2017.



Fonte: Autor

Com isso, apresentam-se essas medidas de forma unificada de três gráficos na mesma figura, proporcionando uma leitura integrada das grandezas analisadas. A tensão fornecida pelo sistema fotovoltaico entre as 07h 00min e as 17h 00min variou em até 23% nesse dia. Esse efeito é devido à radiação solar e à presença da bateria, que com o aumento de sua carga, aumenta a tensão lida pelo registrador. Essa variação é máxima entre 10h 00min e 15h 00min, horários que se tem a maior irradiação sob as placas. A tensão média gira em torno de 13,5 Volts e sua máxima atinge 16,9 volts. Segundo Tharamuttam (2017), as tensões sofrem variações nas tensões lidas nos terminais do módulo fotovoltaico durante à radiação incidente, chegando a 14% em sistemas híbridos, comparados a sistemas estacionários [27].

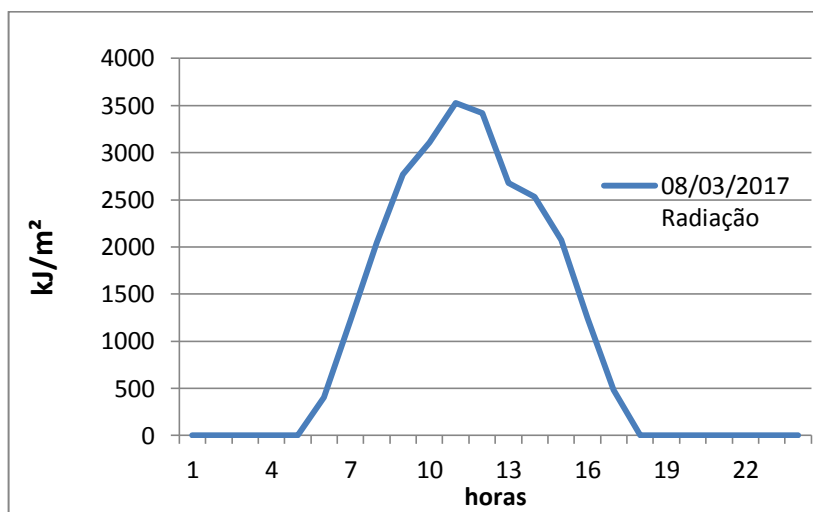
A corrente máxima atingida nesse dia foi 3,33 A. Esses valores variam bastante durante o dia, principalmente nos momentos em que ocorrem sombreamentos causados pelas nuvens na atmosfera. No período matutino entre 08h 00min e 9h 00min, verifica-se uma corrente máxima desse dia, devido a pouca interferência de sombreamento nesse horário. Nesse dia verificou-se que a relação inversa de corrente e tensão, nos horários que a tensão apresentava um aumento, inversamente a corrente diminuía. Esse fenômeno de redução da corrente é devido à principalmente temperatura da placa, que com o aumento da temperatura contribui diretamente na diminuição da geração de par elétron-lacuna no Silício.

A curva da potência está diretamente relacionada com o nível de radiação sob a placa, mas também depende da temperatura da placa e da limpeza dos módulos. É possível verificar o desempenho da placa fotovoltaica, onde o sistema fotovoltaico apresenta uma potência máxima de 50 watts nesse dia, o que mostra um desempenho de 65% da sua produção máxima de energia elétrica. Esses valores são próximos da máxima potência que ocorreram na pesquisas, encontradas principalmente entre os horários das 09h 00min às 13h 00min.

A radiação medida, conforme Figura 24, apresenta um valor máximo de 3500 kJ/m². Essa faixa de radiação é típica para região, visto que em maior parte do ano fica nesses valores. Observa-se que, nos horários das 9h 00min até as 16h 00min, os valores de radiação estão acima de 2000 kJ/m² e que as placas a partir dessa faixa de radiação apresentam potência superior a 30 W, ou seja, durante 6 horas de radiação a placa produz mais de 50% da sua capacidade real de geração de energia. Estes resultados mostram que a aplicação de um rastreador se faz

necessário para aproveitar as radiações baixas, que são pouco captadas pelas placas instaladas em estrutura fixa.

Figura 24 Medidas da radiação solar para o dia 08/03/2017 em função do horário.



Fonte: Autor

Nos horários da 6h 00min às 8h 00min e das 16h 00min às 17h 30min, tem-se as radiações poucos absorvidas pelas placas em estrutura fixa. Contudo o valor de radiação nesse período é de até 2000 W/m². Essa faixa de radiação proporciona uma produção de até 30 watts pela placa fotovoltaica utilizada. O eixo horizontal representa o horário das medidas coletadas e o eixo da ordenada representa os valores da intensidade de cada grandeza obtida. Como dito anteriormente, o intervalo de leitura de 30 amostras de tensão e corrente é realizada em 30 segundos pelo registrador, apresentando sensibilidade de interferência causada por sombreamento de forma instantânea e destacada nos gráficos de produção diária.

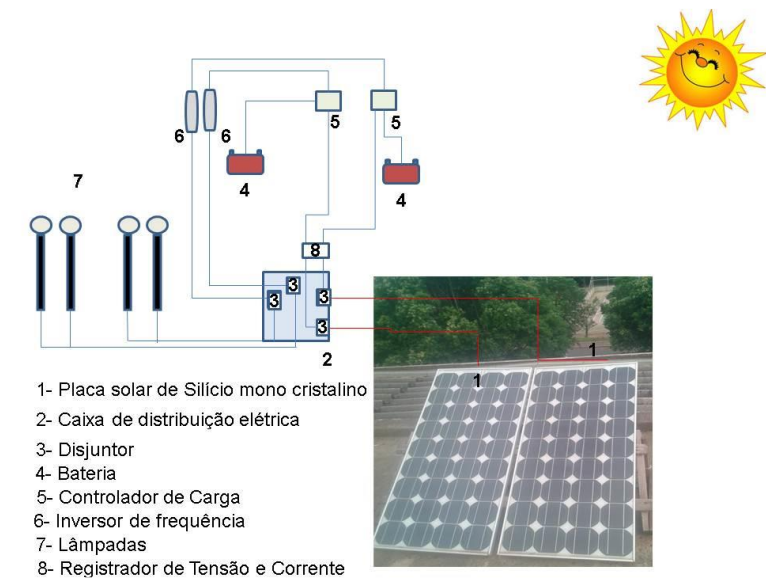
Essa sensibilidade atrelada ao curto intervalo de registro dos valores obtidos pelo registrador proporciona uma leitura real da produção e permite quantizar de forma detalhada a energia produzida por um sistema fotovoltaico.

5.3. Comparação dos módulos para provar que são idênticas

Para realização do estudo foi necessário comprovar que os módulos fotovoltaicos produziram a mesma quantidade de energia, desde que submetidos às mesmas condições de trabalho [28]. Para isso realizou-se primeiramente uma instalação com dois painéis instalados nas mesmas condições. Esse procedimento

aplicado apresenta a real produção das placas em campo, permitindo verificar a similaridade entre os módulos utilizados. A Figura 25 ilustra o sistema fotovoltaico para verificar as capacidades de produção das placas sob as mesmas condições.

Figura 25 Esquema do Sistema Fotovoltaico Isolado



Fonte: Autor

Foi realizado um comparativo da energia produzida diariamente pelos módulos, durante vários dias conforme Tabela 5. Os resultados mostram a diferença de produção desses módulos em campo. O valor da diferença de produção diária de energia em condições de instalação idênticas foi uma média de 3% durante os dias analisados. Esse valor é completamente aceitável, sendo menor do que indicado pelo fabricante, cuja indicação é de variação de até 5%.

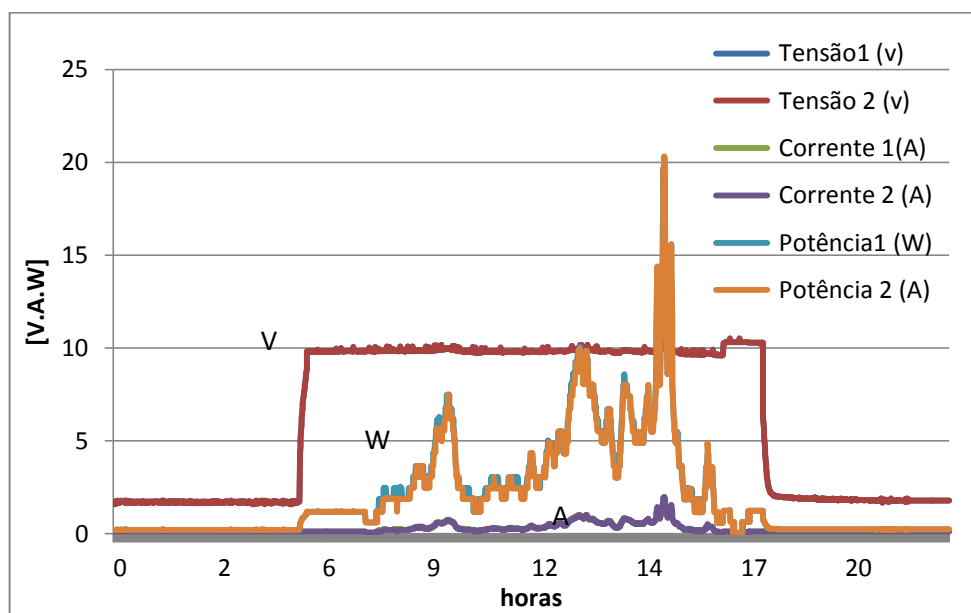
Tabela 5 Produção diária de energia dos módulos Fotovoltaicos nas mesmas condições

Data	Energia do módulo fixo1	Energia do módulo fixo2	Diferença de produção
10/03/2017	176 kWh/dia	181,4 kWh/dia	3%
11/03/2017	266kWh/dia	274,3 kWh/dia	3,1%
12/03/2017	273,3 kWh/dia	281,5 kWh/dia	3%
13/03/2017	278 kWh/dia	288kWh/dia	3%

Fonte: Autor

No período entre 07h 00min e 12h 00min e no período das 13h 00min às 13h 30min foi verificada a maior diferença instantânea de produção entre as placas, Nesse dia a radiação não alcançou 1000 kW/m², resultando em potência máxima de 22 W e tensão em torno de 10,8V. Essa tensão é baixa devido à radiação ser baixa e o consumo demandado pelas lâmpadas ser constante. Esses efeitos fizeram com que a bateria chegasse à tensão registrada.

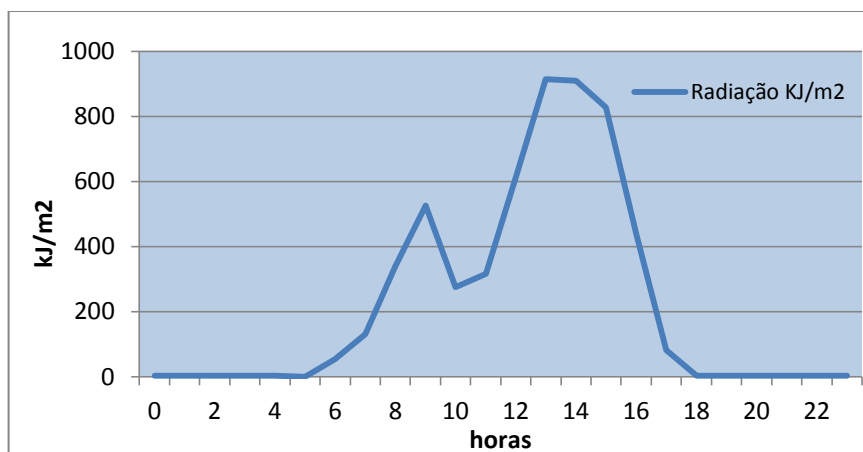
Figura 26 Curvas características típicas de tensão, corrente e potência em função do horário de medida para comparação no dia 29/09/2017.



Fonte: Autor

Na Figura 27 está a radiação durante o dia 29/09/2017, com valores inferiores à 1.000 kJ/m². Com esses valores de radiação, a placa fotovoltaica apresenta baixo desempenho como foi visto na Figura26. No período das 13h 00min às 15h 00min foi quando a radiação ficou acima de 800kJ/m², e no período em que a potência foi a maior registrada.A radiação influencia diretamente na produção de energia pelos módulos, sendo comprovado através dos gráficos de potência gerada que estão oscilando no mesmo período.

Figura27 Medidas da Radiação solar para o dia 29/09/2017 em função do horário.



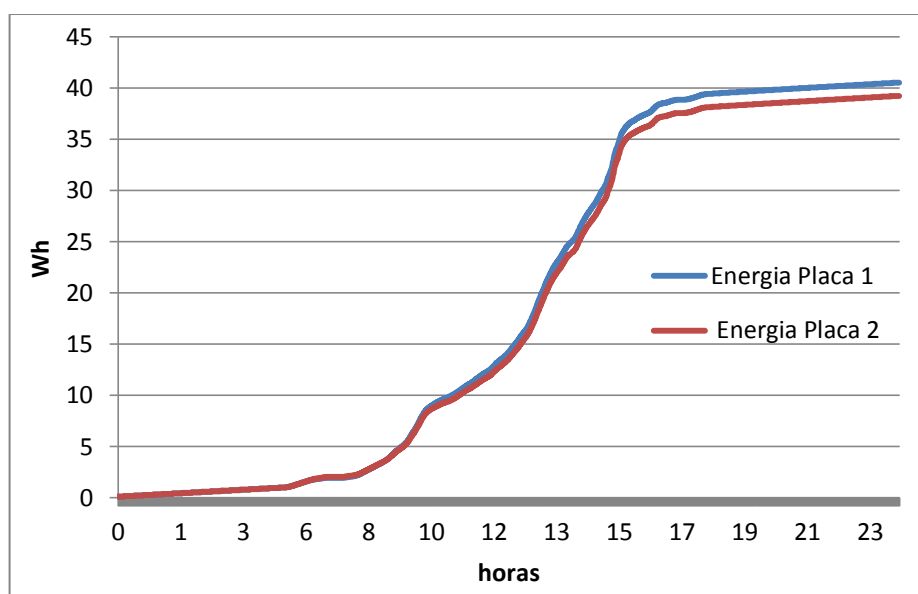
Fonte: Autor

Após o registro das produções e análises da radiação diária da região, elaborou-se o gráfico de energia produzida pelos sistemas. Os valores da energia estão apresentados em Wh. Para calcular a energia foi aplicada a integral de energia para as potências lidas a cada 30 segundos, como pode ser visto na Equação 8. Com os valores obtidos nessa integral, foram feitos o comparativo das produções de energia e demais análises de produção de energia gerada pelos painéis fotovoltaicos.

$$E_{placa\ fixa} = \left(\frac{(Pot\ 1+Pot\ 2)*30}{2*3600} \right) + \left(\frac{(Pot\ 2+Pot\ 3)*30}{2*3600} \right) + \left(\frac{(Pot\ n-1+Pot\ n)*30}{2*3600} \right) \quad (8)$$

Como visto na Figura27, é baixa a radiação nesse dia, e conseqüentemente tem-se uma baixa produção de energia. Porém, observa-se que a energia produzida pelas placas é bem próxima. Realizaram-se medidas diárias de 5 dias para verificar as diferenças nas produções realizadas pelas placas. No dia 11/03/2017, conforme Tabela 5, foi o dia que se apresentou maior diferença entre as produções dos módulos fotovoltaicos, devido às baixas radiações e a resolução do registrador de tensão desenvolvido. Na Figura 28 está apresentada a energia produzida durante o dia 29/09/2017. A energia total gerada pela Placa 1 foi de 39,46 Wh/dia, e a produção da Placa 2 foi de 40,54 Wh/dia. Esse valor produzido representa um valor em relação à placa fotovoltaica de 75 watts, porém justifica-se pela baixa radiação do dia. Observa-se que foi no período vespertino a maior radiação do dia, sendo a diferença máxima entre as placas justamente nesse período. Como os resultados apresentaram uma relação entre as energias produzidas de até 3%, iniciaram-se os estudos comparativos das estruturas fixas e com rastreador.

Figura 28 Energia produzida pelo sistema fotovoltaico durante o dia 29/09/2017



Fonte: Autor

Essa diferença entre os módulos fotovoltaicos observados está intimamente ligada às condições do estado de conservação das placas, visto que estavam aplicadas em uma usina fotovoltaica de um projeto e com vários anos de uso. A ação das intempéries do local em que foram instaladas anteriormente promoveu um tipo de mancha no vidro, que pressupõe essa diferença de produção dos módulos. Essas avarias são uma alteração química dos vidros, devidos as reações com o ambiente.

Depois de quantificados as diferenças entre os módulos fotovoltaicos, aplicaram-se o que produzia menos energia ao rastreador solar, e o módulo que produziu mais energia foi instalado na estrutura fixa. Com isso, a energia produzida pelo rastreador já parte de uma diferença desfavorável de 3%, observados no estudo comparativo dos módulos.

5.4. Sistemas de rotação manual, constante e com LDR

O sistema para controle do rastreamento passou por três formas de seguir o Sol até a instalação do protótipo final. Inicialmente, foi utilizado o movimento manual do rastreador, em seguida utilizou-se o motor de passo com movimentos constantes

de 3 minutos, e por último aplicou-se o controlador eletrônico desenvolvido, que busca a condição de maior incidência luminosa.

Durante a fase inicial do trabalho foi realizado o movimento manual para seguir o Sol, em que o ganho em relação à estacionária chegou a 10%, já incluindo a diferença de 3% de produção dos módulos. Durante esse método de rastreamento manual foi feito uma rotação com deslocamento de 7,5 graus a cada 30 minutos, ou seja, o sistema não captava de forma eficiente a radiação solar incidente sobre as placas, porém, já apresentava um ganho em relação ao módulo instalado na estrutura fixa.

Com a aplicação de um motor de passo programado para movimentar o módulo a cada 3 minutos, a produção de energia aumentou e apresentou maior quantidade de oscilações no gráfico de produção de energia. Esse efeito de oscilação é devido a maior precisão de rastreamento. Houve um pequeno ganho em relação ao movimento manual, com uma média de 15% de ganho nos dias analisados, já incluindo a diferença entre os módulos. O resultado obtido do sistema de rastreamento de movimento constante a cada 3 minutos apresentou-se como alternativa vantajosa de rastreamento.

O controlador através de sensores LDR foi o último a ser aplicado ao rastreamento, que foi instalado no sistema e apresentou resultados de ganho que variam entre 11 e 24%. A diferença verificada entre os três sistemas de controle utilizados chegou a 20%. Com essa comparação de rastreamento, percebe-se que o movimento com menor intervalo de leitura apresenta maior precisão. A diferença entre o rastreador com movimentos constantes de 3 minutos apresentou diferença menor que 10% em relação ao rastreador utilizando LDR.

Tabela 6 Ganho médio de produção de energia utilizando três tipos de sistema de rastreamento em relação ao sistema fotovoltaico estacionário

Ganho com movimentação manual	Ganho utilizando atuador de 3 minutos	Ganho utilizando LDR
10%	15%	18%

Fonte: Autor

O controlador utilizando sensor é mais eficiente que o controlador com movimento constante. Os dias em que ocorrem sombreamentos durante todo o dia, ou nos dias em que não há radiação em nenhum momento no final do dia, esse tipo de rastreador apresentou menor gasto de energia do sistema. Essa afirmação se baseia no fato de que se o controlador constatar que é desnecessário seu movimento levando em conta a luminosidade, ele não se move, e com isso consome menos energia do sistema. A movimentação em ângulos de 10° com leituras realizadas a cada 10 minutos, segundo Zhang et al (2015), apresentaram ganhos de até 25% em relação ao fixo. [24]. Porém quando as leituras são feitas em intervalos maiores, menor a precisão de leitura da produção de energia dos módulos fotovoltaicos, Com isso, quanto menor o intervalo entre o tempo de leitura, a produção de energia é mais próxima do real convertido pelos módulos fotovoltaicos,

5.5. Resultados nos dias com maior e menor ganho utilizando-se rastreador solar

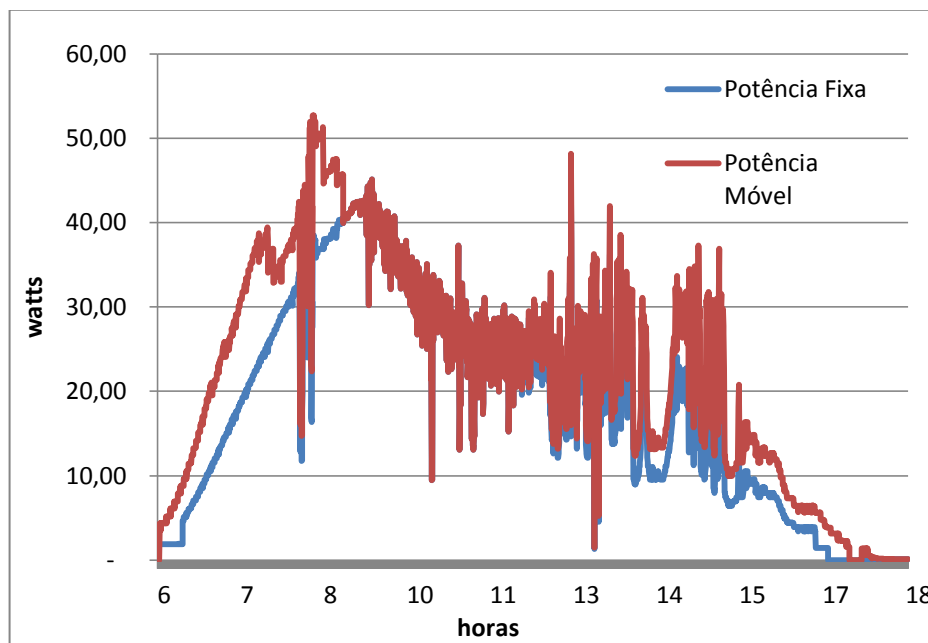
Depois de quantificadas medidas de produção dos módulos em estrutura fixa, realizaram-se os estudos comparativos do sistema com rastreador solar. As medidas com os módulos instalados no rastreador solar apresentam curvas típicas para os dias analisados, sendo apresentados os dias com máximo e mínimo de ganhos obtidos. As médias apresentadas servem para apoio na expectativa de produção dos módulos fotovoltaicos. De acordo com os dados obtidos, o rastreador trabalha com uma faixa de ganho na produção de energia que varia entre 11% e 24% em relação à instalação fixa.

O ganho depende do tempo da radiação incidente e sensibilidade do rastreamento. Segundo trabalho de Zhang *et al* (2015), o ganho do rastreador fica entre 20 e 25%, sendo que em dias nublados o ganho do rastreador com movimentação constante é menor [29]. Segundo Mohamed (2004), o ganho obtido com o rastreador solar em relação à capacidade de produção diária foi de 20%, próximo ao obtido neste trabalho [30]. O rastreador mostrou-se eficiente com a utilização de controladores dotados de sensores de luminosidade. A diferença de ganho observada em relação à estrutura fixa está relacionada intimamente com a intensidade da radiação e presença de nuvens nubladas para o dia analisado. O

gráfico apresenta oscilações causadas por sombreamentos de nuvens que instantaneamente afetam a produção de energia dos módulos.

Nos dados obtidos para o dia 16/03/2017 verifica-se que a potência máxima alcançada atingiu 51 W, conforme Figura 29. Durante os períodos das 06h 00min até 09h 00min e das 13h 20min até 17h 30min é onde ocorrem os maiores ganhos de energia com o rastreador com movimento constante. Em determinados períodos entre as 06h 00min e 07h 40min, a diferença de potência média chega a um ganho máximo de 52 W, porém, essa diferença é apenas momentânea nesse período, ou seja, em curtos intervalos de 20 minutos mantém-se o valor máximo, pois ocorrem sombreamentos que reduzem esses valores no decorrer do dia. No período das 13h30min até 17h00min verifica-se um ganho máximo de 60% na potência produzida nas amostragens.

Figura 29 Potência produzida pelos dois sistemas fotovoltaicos durante o dia 16/03/2017

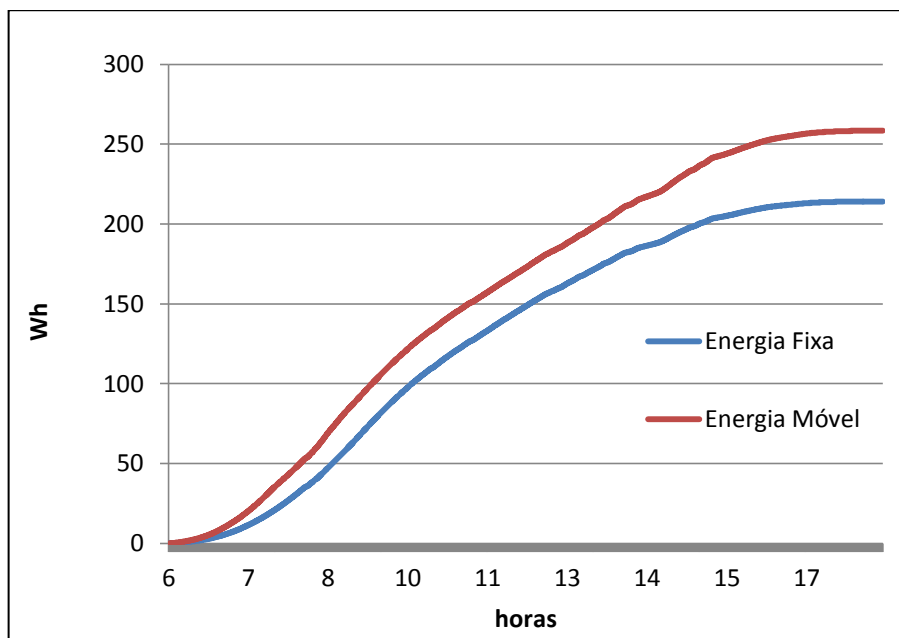


Fonte: Autor

Esse resultado mostra que o sistema com rastreador disponibiliza uma potência maior em relação ao painel em estrutura fixa nos períodos citados, ou seja, aproveita a energia solar nos ângulos de azimute em que a estrutura fixa recebe menos radiação perpendicular do Sol. Nesse dia o ganho máximo de energia

utilizando o rastreador chegou ao patamar de 24%, em comparação com a estrutura fixa. A energia gerada pela placa instalada no rastreador solar foi 258,43 Wh/dia, enquanto que a placa instalada na estrutura fixa gerou 214,21 Wh/dia, Figura 30. A diferença de produção de energia entre as placas foi 44,2 Wh/dia, o que representa um ganho significativo para o sistema fotovoltaico.

Figura 30 Energia produzido pela placa fotovoltaica no 16/03/2017



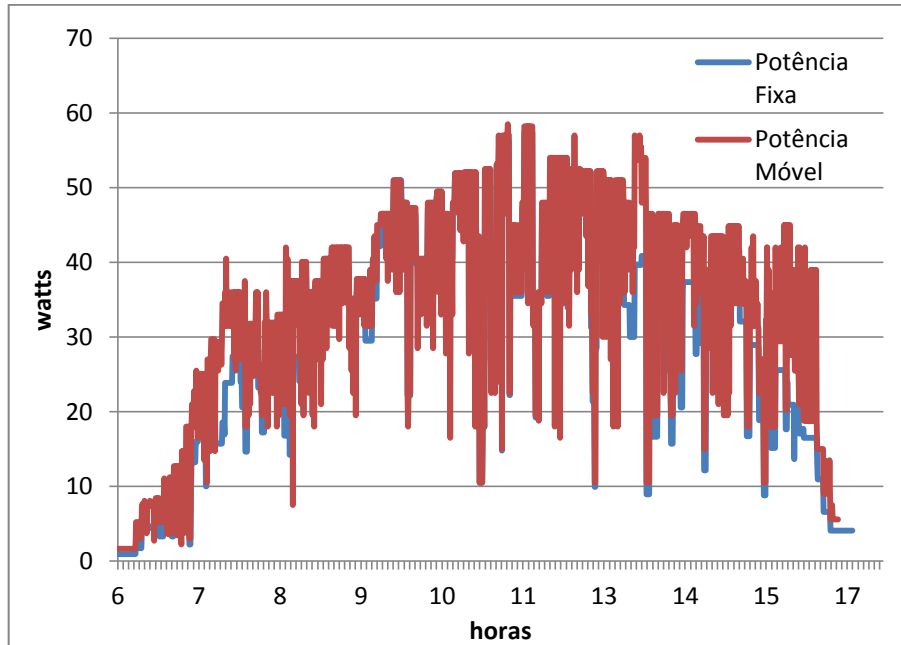
Fonte: Autor

A produção nesse dia representa a média obtida para região no período entre os dias 08/03 e 29/03 para o ano de 2017. Os valores de energia produzidos para esse dia são também visualizados na maioria dos dias analisados nesse trabalho, mostrando que conforme as radiações obtidas em um ano, essa produção é típica para a região. A média será obtida através das produções diárias obtidas no mês de maio e julho do estudo comparativo das duas estruturas.

Na Figura 31 verifica-se a variação da potência durante o dia, com variações abruptas ocorridas a todo instante, mesmo utilizando rastreador. Os sombreamentos causados por nuvens causavam esse efeito de oscilação na corrente produzida, devido a redução radiação global incidente sobre as placas. Essa interferência é válida tanto para a placa instalada nos rastreadores, quanto para a placa instalada na estrutura fixa.

Contudo, com a interferência do sombreamento nos módulos instalados em campo, o rastreador ainda produzia mais corrente que a estrutura fixa. Esse fato se justifica pelo fato da placa instalada no rastreador solar receber radiação perpendicular em maior quantidade em relação à outra estrutura.

Figura 31 Potência produzida pelos dois SFI no dia 01/07/2018

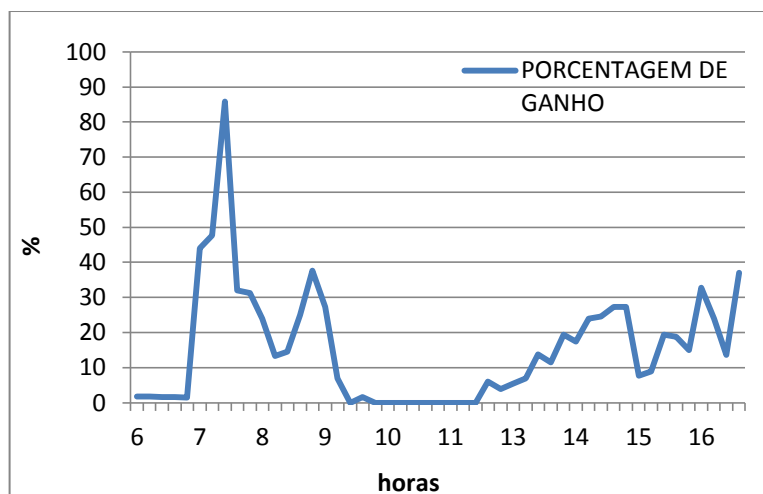


Fonte: Autor

A tensão ficou com um faixa de variação em torno de 13 a 13,9 volts nesse dia. A potência máxima foi de 59 W, justificado pela radiação recebida no dia. Durante o período das 10h 00min até as 12h 00min tem-se uma produção bem próxima entre as placas, devido aos seus posicionamentos serem praticamente iguais, mesmo que isso só seja rigorosamente verdade durante 3 minutos. Os valores obtidos para a produção nesse horário é devido aos módulos estarem com diferenças no ângulo azimutal mínimas.

Na Figura 32 apresenta-se o percentual de ganho de energia durante o dia 01/07/2018, onde se percebe que o período de maior ganho de energia do dia utilizando rastreador é de manhã, entre as 6h 00min às 9h 00min.

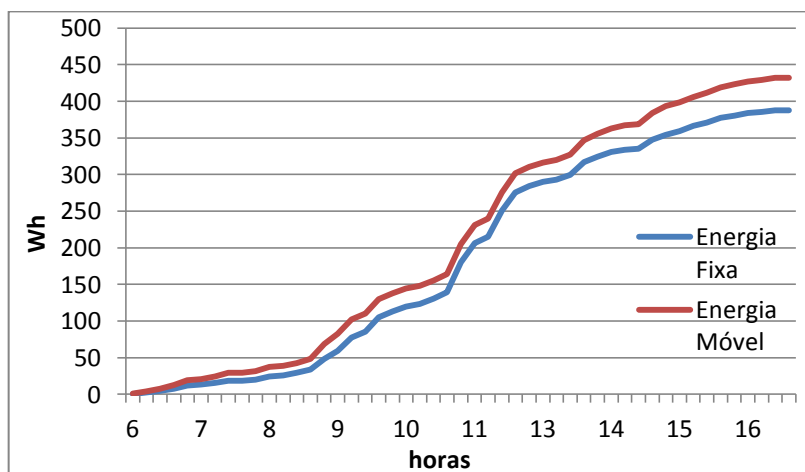
Figura 32 Ganho percentual do rastreador solar no dia 01/07/2018



Fonte: Autor

O maior ganho instantâneo na potência comparando a estrutura fixa e rotativa foi de 85%, apresentado no início do dia entre 06h 00min e 07h 30min. Entre os horários das 10h 00min e 12h 00min tem-se que as produções das placas atingem os mesmos valores, justificado pela mesma posição das duas estruturas em relação ao Sol e no período vespertino o ganho foi menor. O ganho de energia utilizando-se o rastreador foi de 11%. Este é o menor ganho encontrado durante as pesquisas. Esse ganho varia durante os dias devido aos sombreamentos naturais que ocorrem. Na Figura 33 verifica-se que o ganho de energia durante a manhã contribuiu menos que o ganho obtido pela tarde.

Figura 33 Produção de energia para o dia 01/07/2018



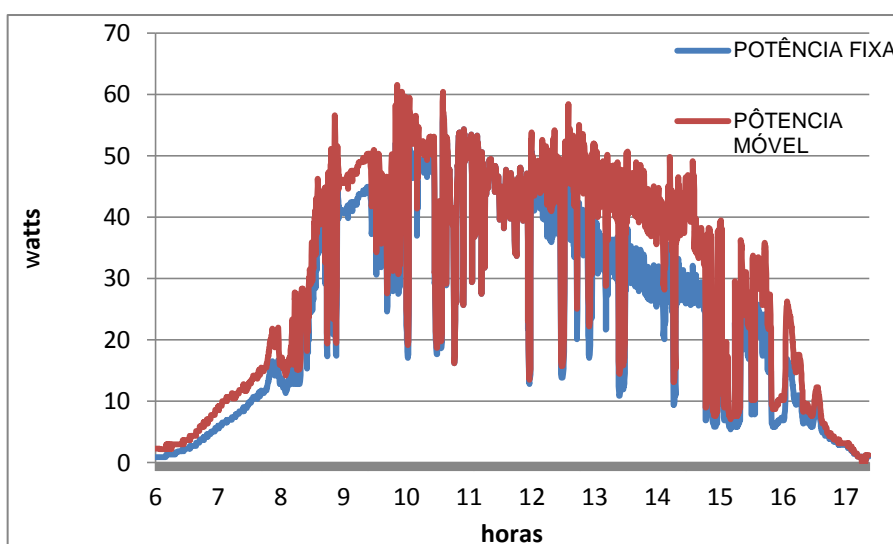
Fonte: Autor

Isso se justifica pelo fato do tempo de exposição da radiação. Pela manhã o tempo de exposição do rastreador é entre as 06h 30min e 09h 30min, ou seja, uma exposição de 3 horas de radiação até se igualar a potência da placa instalada na estrutura fixa. Já no período vespertino, verifica-se que o tempo de exposição é 04h 30min.

Essa diferença de produção de energia significa redução nos custos de investimentos, visto que para alimentar determinados pontos de consumo seriam necessárias menos placas fotovoltaicas para atingir a mesma produção de energia de instalação fixa. A viabilidade técnica em se instalar o rastreador proporciona avanços no desenvolvimento e aperfeiçoamento dos recursos aplicados à energia solar. A versatilidade dos rastreadores não restringe sua aplicabilidade apenas para sistema fotovoltaico, mas também para todos os sistemas que utilizam a energia do Sol como fonte de energia.

A média do ganho obtida para os dias analisados com esse rastreador está na faixa de 18%, com produções semelhantes à Figura 34. O comportamento do gráfico durante os dias analisados permite observar que o formato é devido às condições do dia. O ganho não se torna definitivamente maior nos dias com maiores intensidade de radiação, sendo observado que em dias sombreados, o ganho também alcança desempenho próximo de dias claros.

Figura 34 Potências produzidas pelos dois SFI no dia 16/06/2018

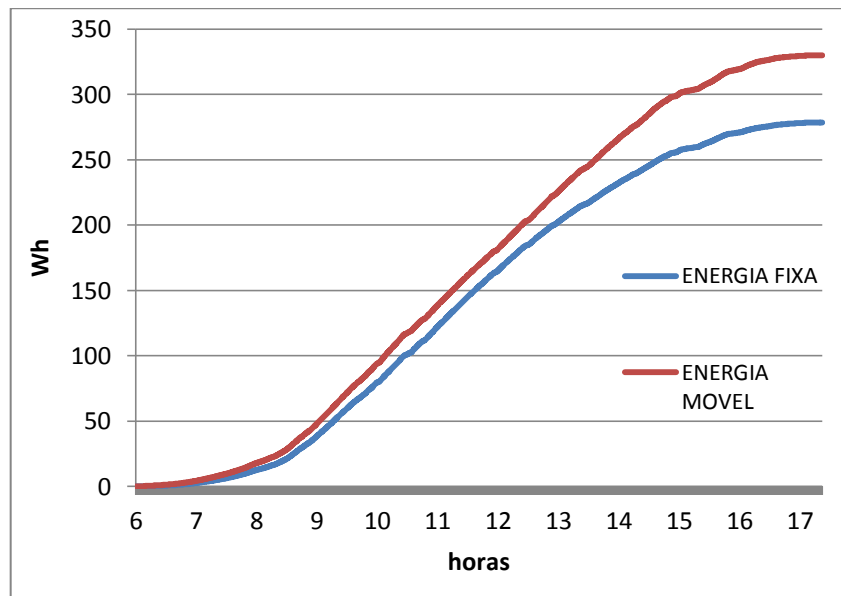


Fonte: Autor

Isso é justificado pelo fato da radiação sofrer variações até chegarem aos módulos perpendiculares. Outra variável importante para o aumento de ganho é o tempo de exposição às radiações com intensidades favoráveis. As médias da energia produzida pelo sistema com rastreador nos meses de maio e junho de 2018 mostra que o ganho médio é de 18%.

A energia produzida pelo módulo acompanha a radiação do dia conforme apresentado na Figura 22. Com isso, esse estudo realizado permite informar valores médios de produção para os dimensionamentos de projetos fotovoltaicos utilizando-se rastreadores. A produção do rastreador nesse dia foi de 330 Wh, enquanto que o outro módulo fixo produziu 278 Wh, conforme Figura 35.

Figura 35 Energia produzida pelos dois módulos no dia em alguns dias



Fonte: Autor

Na tabela 7 está apresentada a energia diária produzida durante alguns dias do ano de 2018. O ganho utilizando o módulo na estrutura dotada com o rastreador azimutal desenvolvido tem uma média de 18% para os dias analisados. O levantamento das produções diárias de energia produzida permite demonstrar a capacidade de produção na região, além de apresentar a linearidade de ganho do rastreador para o período analisado.

Tabela 7 Ganho médio das produções diárias dos sistemas fotovoltaicos

Data	Estrutura Fixa	Estrutura Móvel	Ganho obtido
10/02/2018	285,12 kWh/dia	345 kWh/dia	21%
11/02/2018	306,45 kWh/dia	380 kWh/dia	24%
12/02/2018	300,80 kWh/dia	373 kWh/dia	21%
26/03/2018	181,03 kWh/dia	210 kWh/dia	14%
27/03/2018	147,82 kWh/dia	170 kWh/dia	15%
28/03/2018	262,71 kWh/dia	310 kWh/dia	18%
29/03/2018	232,75 kWh/dia	270 kWh/dia	16%
05/05/2018	278,68 kWh/dia	340 kWh/dia	18%
06/05/2018	298,38 kWh/dia	370 kWh/dia	21%
07/05/2018	274,59 kWh/dia	335 kWh/dia	18%
08/05/2018	288,70 kWh/dia	358 kWh/dia	21%
Média Total			18%

Fonte: Autor

5.5. Análise das produções diárias dos módulos fotovoltaicos

Foram explorados os dias com os máximos e mínimos níveis de radiação, para que possa ser indicada a produção dos módulos com rastreador solar nas extremas condições. A relação direta de radiação solar com a produção de energia dos módulos foi apresentada nos itens anteriores. Essa relação demonstra a real capacidade de se aplicar o sistema de rastreamento com ganho mínimo e máximo de acordo com o período em que estiver analisando, visando estabelecer o fornecimento de energia para o consumo.

Com essa caracterização de radiação no estado do MS visto na Figura 22, acompanhado da produção gerada pelos módulos fotovoltaicos, estima-se a quantidades de módulos necessários para que se determine a energia elétrica de qualquer ponto de consumo na região da pesquisa. Com isso, a média desse ganho pode ser aplicada diretamente para dimensionamentos de sistemas fotovoltaicos.

O ganho mínimo alcançado em dias com radiação em torno de 2500 kJ/m² indica que os valores para os meses em que a radiação permanece nessa faixa, têm-se o ganho mínimo de 11%. Nos períodos em que a radiação alcançar a 8.000

kW/m², o ganho pode chegar a ser 24%. Com isso, podem-se projetar os sistemas fotovoltaicos com dados mais próximos da real incidência no estado. A média da radiação mensal é de 3500 kJ/m², o que significa que os módulos fotovoltaicos estarão dispostos a essas faixas de radiação durante 80% no ano.

A diferença na produção de energia é observada ao longo do ano, sendo a média de radiação com capacidade de produção acima de 245 Wh/dia para o módulo fotovoltaico instalado. Esse ganho obtido pelo rastreador apresentado anteriormente demonstra a redução no tempo de retorno dos investimentos. A diferença entre 11% e 24%, já incluindo a diferença dos módulos, condiz com a literatura levantada. Essa diferença impacta principalmente nos custos dos investimentos, em que são necessários menos módulos fotovoltaicos quando comparados com a estrutura fixa que acomoda os módulos.

A média do ganho obtido durante as pesquisas foi de 18%. Essa média é justamente os períodos em que se encontram níveis de radiação com intensidade em torno de 3.500 kW/m² na região sem muitas incidências de sombreamento. Essa faixa de valores é observada em praticamente todo período do ano apresentado na Figura 22.

5.6. Consumo de energia do motor de passo

A potência consumida pelo motor de passo durante o rastreamento é de 10 watts/pulso [31]. Para movimentar o rastreador é necessário um pulso por segundo, ou seja, a cada atuação do motor para seguir o Sol é solicitado esse consumo. Foi feita uma comparação da energia consumida pelo motor de passo utilizado com programação de movimento constante e com movimento através de leituras dos sensores LDR. O consumo de energia utilizando controle de motor com passos constante, e com controle através de sensores LDR foi de 1 Wh durante os dias claros, porém, em dias em que o céu apresentava-se nublado durante todo o dia ou ao final do dia, conseguiu-se uma redução de consumo de energia com o sistema de LDR. Isso porque o sistema não se movimentava nos períodos em que a radiação não atendia a potência mínima de 10 W.

Uma produção diária de um dia com baixa radiação solar foi de 45 Wh/dia. Nesse dia, o consumo de energia do controlador do rastreador representou 2,5% do total de energia produzido pelo sistema fotovoltaico. Esse valor de energia

consumida é quase imperceptível em relação ao ganho de energia promovido pelo rastreador em dias de produção acima de 300 Wh/dia, representando 0,003% da energia produzida pelo módulo dessa pesquisa.

No trabalho apresentado pelo Tharamuttamet. *al*, o consumo do rastreador foi de até 30%, mostrando que o sistema estava superdimensionado para rastreamento, porém, como afirmado pelo autor, é possível melhorar esse rendimento de acordo com o aumento da potência dos painéis. É importante destacar que o consumo de energia do rastreador está diretamente ligado à estrutura mecânica utilizada e ao dimensionamento correto do motor de passo para o sistema fotovoltaico. A vantagem desse sistema é produzir mais energia consumindo pouco.

No dia 01/07/2018 a produção de energia pelo sistema fotovoltaico foi de 400 Wh/dia. O rastreador nesse dia consumiu 0,025% do total da energia produzida. O consumo exigido para o rastreador é baixo em relação ao produzido pelo sistema fotovoltaico, o que contribui para sua eficiência. Quanto maior a radiação diária, maior a eficiência do rastreador. O diferencial desse rastreador está no fato que ele apenas se movimenta quando “tem Sol”, ou seja, quando a radiação nele incidente é relevante, o que o faz ser eficiente durante a operação, sem comprometer o sistema nos momentos em que não houver a presença do Sol na região.

Outra vantagem desse sistema está em não haver necessidade de ser instalado um atuador para manter o sistema fixo em determinadas posições, ou seja, a força do vento não faz movimentar a placa. Com essa característica, o rastreador proporciona uma economia de energia em relação aos rastreadores polares e aos horizontais, visto que eles precisam manter o sistema fixo na posição desejada, consumindo mais energia. Essa resistência mecânica oferecida pela inércia da placa fotovoltaica, juntamente com o atrito interno do sistema de rotação, é o responsável pela vantagem na economia de energia obtida pelo rastreador. Além desses fatores positivos citados anteriormente, tem-se a facilidade de se aplicar sistema de freios para aumentar a resistência ao movimento causado pelos ventos, caso haja necessidade.

O sistema de controle para rastreadores solares apresenta condições de melhoria na sensibilidade do rastreamento, onde através de estudos futuros podem ser aperfeiçoados e se proporcionarem maiores ganhos. O baixo consumo

demonstrado na aplicação para esse rastreador apresenta condições de avanços nos sistemas de rastreamento.

5.7. Aplicação do Rastreador em Mato Grosso do Sul

No estado de Mato Grosso do Sul, a tarifa de energia elétrica de baixa tensão, classificado como residencial sem benefício, tem um valor único cobrado de 0,54R\$/kWh, sem considerar os impostos [32]. O incentivo de utilizar esse sistema de geração de energia sustentável se justifica não só pela economia, mas também pela redução de impactos ambientais feitos pela geração de energia.

Conforme o ganho obtido entre 11% e 24% obtido pelo rastreador desenvolvido, é vantajoso instalar esse rastreador em locais que já possuem sistema fotovoltaico em estrutura fixa, assim como também em novos projetos fotovoltaicos. Como exemplo, em um sistema fotovoltaico residencial que for instalado esse rastreador nas mesmas condições, significaria que o consumidor final investiria um valor em média de 10% menor em módulos fotovoltaicos, em relação a estruturas fixas.

O custo envolvido para o desenvolvimento do rastreador leva em consideração desde a aquisição dos componentes até a montagem do circuito dos dispositivos. O controlador do rastreador solar possui um custo de produção de 450,00 reais. A estrutura mecânica tem a capacidade de suportar até 10 módulos fotovoltaicos. O dimensionamento do motor de passo é fundamental para o retorno mais rápido do investimento.

Utilizando-se as produções de energia obtidas para dimensionar um sistema fotovoltaico, pode-se observar que o rastreador utilizando toda sua capacidade estrutural, tem um custo adicional de R\$ 350,00 para atuar com 10 módulos fotovoltaicos. Nesse valor está incluso o motor para movimentar essa matriz com 10 módulos. Para teste foram colocados 120 kg sob o rastreador solar. O mesmo comportou-se de forma equilibrada.

Utilizando-se a capacidade máxima do rastreador, o retorno de investimento esperado é mais rápido. Esse tempo menor do retorno de investimento proporcionado pelo rastreador. Em uma instalação de 10 módulos em estrutura fixa

para atender uma demanda de energia, com a aplicação do rastreador, consegue-se reduzir uma placa para atender o mesmo consumo.

O valor levantado para módulos fotovoltaicos nesse trabalho é de R\$ 350,00 reais. Utilizando-se 10 módulos em uma instalação, tem-se um investimento de R\$ 3.500,00. Somando-se o valor dos módulos com o custo do rastreador dimensionado para este sistema, o valor total do conjunto chega a R\$ 4.300,00 reais.

Com esse investimento de R\$ 4.300, 00 reais, e considerando-se o ganho médio de 18% obtidos no trabalho, é possível prever que para o sistema produzir a energia de dez módulos instalados em uma estrutura fixa é necessário apenas nove módulos com o rastreador solar, economizando-se assim no investimento. Outra possibilidade de ser analisado esse retorno proposto pelo rastreador solar é a maior quantidade de energia produzida com menos módulos fotovoltaicos conforme apresenta a Tabela 8.

Tabela 8 Simulação da aplicação do Rastreador desenvolvido com 10 módulos

Descrição	Medidas/Quantidades
Módulos Fotovoltaicos	10 unidades
Potência do módulo FV	75 W
Custo por módulo FV	R\$ 350,00
Produção diária com Rastreador	350 Wh/dia
Custo da Energia	0,54 R\$/KWh
Custo Rastreador	R\$ 800,00
Investimento Total	R\$ 4.300,00
Conversão do investimento em energia em MS	9.555 KWh
Irradiação média anual	5 KWh/(m ² /dia)
Radiação local Dias do ano	80% ou 292 dias
Retorno com rastreador	9 anos
Retorno sem Rastreador	11 anos

Fonte: Autor

Esse investimento seria o equivalente a 9.550 kWh de energia elétrica. Os módulos fotovoltaicos para produzir essa energia, considerando-se a média observada de radiação no estado e com sua produção de 350 Wh/dia, promoveria um retorno dos investimentos em nove anos. Levando em consideração que o módulo possui 25 anos de vida útil, mesmo com o decaimento causado pelo tempo nos módulos, ainda se encontra vantagens na produção.

O sistema mecânico e eletrônico do rastreador exige um nível de qualificação para mão de obra na manutenção do sistema. Todos os itens são acessíveis e garantem uma instalação segura. Este sistema tem potencial para proporcionar uma fonte de geração de trabalho e renda, contribuindo para o desenvolvimento social e sustentável. O controlador do rastreador é independente da quantidade de módulos fotovoltaicos.

CONCLUSÃO

O trabalho apresentou os resultados obtidos no estudo comparativo da eficiência dos painéis fotovoltaicos. O ganho de até 24% na produção de energia pelo sistema fotovoltaico que adotou o rastreador solar destaca-se pela simplicidade do sistema e sua eficácia no rastreamento. Como o rastreamento oferece um ganho considerável, a viabilidade de acordo com os custos do rastreador foi apresentada e mostrou-se ser aplicável a todos os projetos de sistemas fotovoltaicos na região.

A radiação solar observada para a região mostra-se estável durante todo o ano, oferecendo períodos com radiações mais intensas principalmente nos meses de junho e julho. Porém em alguns dias dos meses de janeiro, fevereiro e maio de 2018, apresentam-se também radiações próximas dos valores encontradas para os meses de junho e julho, aproximadamente 8.000 kJ/m². Esses valores de radiação obtidos garantem que o rastreador tem condições de aplicação, e esse valor pode ser utilizado no dimensionamento de projetos de sistema fotovoltaico com rastreador.

O controlador do rastreador solar apresentou resultados de rastreamento com precisão de 0,8° aproximadamente, mas ainda existem questões que precisam ser discutidas e resolvidas para os períodos de sombreamento, assunto que certamente servirá de revisão para estudos futuros. A integridade dos LDR deve ser observada visando garantir sua sensibilidade com o passar do tempo, para atestar sua capacidade de leitura de luminosidade após ações do tempo. Este ganho já considera o consumo de energia para movimentação durante o rastreamento solar, o que garante uma vantajosa utilização desse sistema de produção de energia fotovoltaica. Os dispositivos criados para leitura e registro de dados obtidos pelos módulos fotovoltaicos proporcionaram uma análise comparativa dos sistemas fotovoltaicos em estudo.

O ganho obtido com o rastreamento através de sensores LDR mostrou-se eficiente, mas permitiu observar que um sistema com movimentos constantes também se torna uma alternativa vantajosa de ser aplicada ao rastreamento, desde que se tenha uma abrangência das variáveis de posicionamento de início e fim do rastreamento. Embora o ganho efetivo seja menor com um sistema de movimento constante, há de se aceitar que trata-se de um sistema muito mais simples e prático

de instalação, mesmo para pessoas leigas no assunto. Outro fator importante é considerar as mudanças de horários, sendo para isso necessário um controlador específico para essa função.

Ficaram estabelecidas, com a realização deste trabalho, alternativas para trabalhos futuros, como o estudo da radiação com o intervalo de tempo igual do registrador, visando obter a real eficiência dos módulos fotovoltaicos. Para trabalhos futuros, podem-se aplicar ao registrador desenvolvido um display que mostre, através de gráficos, a produção real das placas fotovoltaicas, permitindo acompanhar as medidas paralelamente ao registrador. A contribuição deste trabalho é também para outros que vierem a necessitar de dispositivos que registrem a leitura de dados elétricos durante períodos prolongados de tempo, e com mobilidade do seu sistema.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] PEREIRA, E.B; Martins, F.R; Abreu, S.L; Ruther, R.et.al. Atlas Brasileiro de Energia Solar. São José dos Campos. ISBN 978-85-17-00089-8. 2º Ed. INPE, 2017.
- [2] CORTEZ, R.J.M. Sistema de Seguimento Solar em Produção de Energia Fotovoltaica, 76f. 1995. Dissertação de Mestrado-Faculdade de Engenharia do Porto, Portugal, 1995.
- [3] PINHO, J. T; Galdino, M. A. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. CEPEL – CRESESB. Ed. atualizada. Rio de Janeiro. 2014.
- [4] VIEIRA, R. G. Análise Comparativa do Desempenho entre um Painel Solar Estático e com Rastreamento no Município de Mossoró-RN, 2014. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Semi - Árido, Mossoró, 85f. 2014.
- [5] QUERINO, C. A. S; Moura, M. A. L; Lyra, R. F. F; Mariano, G. L. Avaliação e comparação de radiação solar global e albedo com ângulo zênital na região amazônica. Revista Brasileira de Meteorologia, V21, n.3ª, 42-49, 2006.
- [6] RENN, J. A física clássica de cabeça para baixo: Como Einstein descobriu a teoria da relatividade especial*. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 27, n. 1, p.27 - 36, 2004.
- [7] DIAS, I.F.L. Novos materiais e estruturas semicondutoras. Semina, v. 12, n. 4, p.265-274, 1991.
- [8] MATTOS, F. C. Contribuição ao estudo de um sistema solar fotovoltaico monofásico de único estágio, 2011. Dissertação de Mestrado – Universidade de Juiz de fora, 143f. 2011.
- [9] REZENDE, S. M. Materiais e Dispositivos Eletrônicos. 2. Ed. São Paulo. Editora: Livraria Física. 2004.

- [10] DIAS, E. P. R. Caracterização e reciclagem de matérias e módulos fotovoltaicos (Painéis Solares), 2015. Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Dissertação de Mestrado,70f. 2015.
- [11] TORRES, R. C. Energia Solar Fotovoltaico como Fonte Alternativa de Geração de Energia Elétrica em Edificações Residenciais. Universidade Federal de São Paulo – Dissertação de Mestrado,164f. 2012.
- [12] LIRA, R. J. V. Desenvolvimento de um Rastreador Solar do tipo Polar com ajuste de Ângulo de Inclinação. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 82f. 2014.
- [13] MOUSAZADEH, H; Keyhani, A; Javadi, A; Mobil, H; Abrinia, K; Sharifi, A. *A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output.Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v.13, n. 8, p. 1800–1818, 2009.
- [14] KALOGIROU, S. A. *Design and construction of a one-axis sun-tracking. Solar Energy* Vol. 57, No. 6, pp. 465-469, 1996.
- [15] POULEK, V. *Testing the New Solar Tracker with Shape Memory Alloy Actuators*.CH3365-4/94/0000-113.First WCPEC.Dec. 5-9, Hawaii, 1994.
- [16] ABDALLAH S, NIJMEH S. *Two axes sun tracking system with PLC control*.ELSEVIER.Energy Conversion and Management. 45. 1931–1939. 2004.
- [17] ABOUZEID, M. Use of a Reluctance Stepper Motor for Solar Tracking Based on a Programmable Logic Array (PLA) Controller. *Renewable Energy*, 23, 551-560. 2001.
- [18] ORIA, J. P.; SALA, G. A good combination: Tracking of the Sun in polar axis and bifacial photovoltaic modules. *Solar & Wind Technology*, v.5, p.629-636, 1988.

- [19] ROTH, P; GEORGIEV, A; BOUDINOV, H. *Design and construction of a system for suntracking*. ELSEVIER. *RenewableEnergy*,29, 393–402. 2004.
- [20] PINTO, A. Descrição de Seguidores Solares e sua Aplicação em Centrais Fotovoltaicas Conectadas à Rede. Disponível em <<http://www.iee.usp.br/sites/default/files/biblioteca/producao/2010/Trabalhos/pintonetodescricao.pdf>>. Acesso em 12/05/2018.
- [21] Aula prática. UFJF. <http://www.ufjf.br/fisica/files/2013/10/FIII-05-07-Divisor-de-tens%C3%A3o.pdf>. Último acesso em: 07/04/2018.
- [22] Fully Integrated, Hall Effect-Based Linear Current Sensor with 2.1 kVRMS Voltage Isolation and a Low-Resistance Current Conductor. <https://www.sparkfun.com/datasheets/BreakoutBoards/0712.pdf>. Último acesso em: 08/03/2018.
- [23] Consulta Dados da Estação Automática: Campo Grande (MS). INMET. <http://www.inmet.gov.br/sonabra/pg_dspDadosCodigo_sim.php?QTcwMg==>. Acesso realizado em: 16/07/2018.
- [24] Relatório <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2012.pdf>. Acesso realizado em: 16/07/2018.
- [25] Flumigna, D.L; Fietz, C.R. O clima na região do Bolsão de Mato Grosso do Sul. Dourado, MS. Embrapa Agropecuária Oeste, 42p. ISSN 1679-043X.127. 2015.
- [26] Dados de potencial solar. CRESESB-CEPEL. Softwares SundataV3.0. <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata>>. Acesso realizado em: 16/07/2018.
- [27] Tharamuttam, J.K; Ng,AK. Desing and development of an Automatic Solar Tracker. World Engineers Summit – Applied Energy Symposium & Forum: Low

Carbon Cities & Urban Energy Joint Conference, 19-21 July 2017.Singapore. Energy Procedia 143 (2017) 629-634.10.2017.

[28]MARKUS, Otávio. Circuitos elétricos: corrente contínua e corrente alternada: teoria e exercícios/ Otavio Markus. – 9. Ed. rev. – São Paulo.Érica.2011.

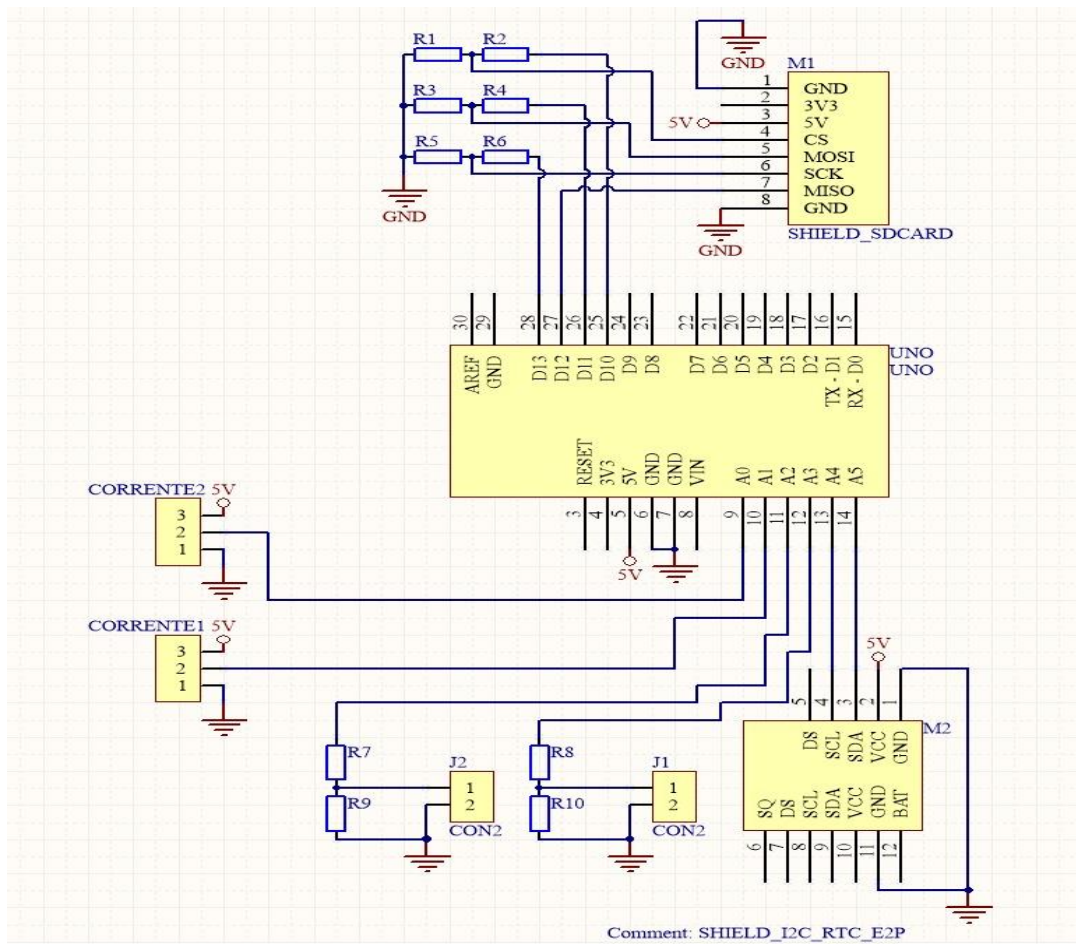
[29] Zhang Q.X; Yu H.Y; Zhang Q.Y; Zhang Z.Y; Shao C.H; and Yang D.A solar automatic tracking system that generates power for lighting greenhouses.*Energies*, vol. 8(7), pp. 7367–7380, 2015.

[30] Mohamad A. Efficiency improvements of photo-voltaic panels using a sun tracking system. *Applied Energy*. 2004.

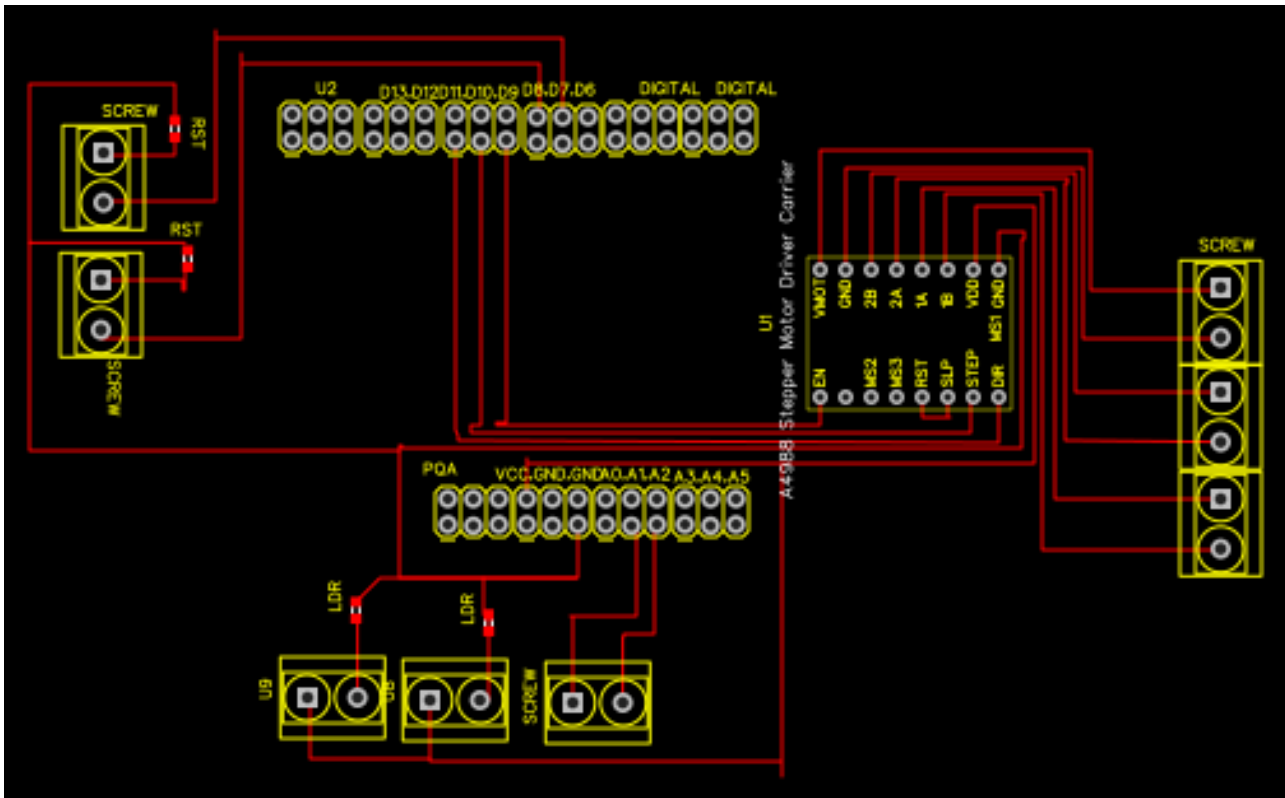
[31] Gussow, Milton. PLT- Eletricidade básica/ Milton Gussow; tradução José Lucimar do Nascimento. -2. ed. p. 15 a 21. – Porto Alegre. – Bookman, 2009.

[32] ENERGISA. www.energisa.com.br. Último acesso em 07/04/2018.

APÊNDICE A - Esquema elétrico do registrador de tensão e corrente



APÊNDICE B - Esquema elétrico do rastreador solar de um eixo



APÊNDICE C - Programação do registrador de tensão e corrente

```
// SD card attached MOSI - pin 11, MISO - pin 12, CLK(SCK) - pin 13, CS (SS) - pin
4 no Arduíno Mega
#include <Wire.h>
#include <SD.h>
#include <SPI.h>
#include <RTClib.h>
#define DS1307_ADDRESS 0x68
Sd2Card card;
SdFile root;
const int chipSelect = 10;
#define AMOSTRAS 30 // numero de medidas para tirar a média
#define AMOSTRAS2 30 // numero de medidas para tirar média da placa 2
float aRef = 5; // medir a voltagem no pino Vref do Arduíno
float relacao = 4; // relacao = Vin/Vout = (R1+R2)/R2
float Voltagem = 0.0;
float Voltagem2 = 0.0;
float Vpor1 = 0.0;
float Vpor2 = 0.0;
float Corrente = 0.0;
float Corrente2 = 0.0;
int mVporAmp = 66;
int vspinoIM = A1; //pino analógico do sensor de corrente placa móvel
int vspinoVM = A3; //pino analógico do sensor de tensão placa móvel
int vspinoIF = A0; //pino analógico do sensor de corrente placa fixa
int vspinoVF = A2; //pino analógico do sensor de tensão placa fixa
int vsI = 0; // sensor de corrente acs712 com 66mv por amper
int vsV = 0; // 1024 = 5volts
int vsI2 = 0; // sensor de corrente acs712 com 66mv por amper
int vsV2 = 0; // 1024 = 5volts
int Potencia = 0;

//Modulo RTC DS1307 ligado as portas A4 e A5 do Arduíno
RTC_DS1307 rtc;
char daysOfTheWeek[7][14] = {"Domingo", "Segunda-feira", "Terça-feira", "Quarta-
feira", "Quinta-feira", "Sexta-feira", "Sabado"};
//a linha acima é um array com os dias da semana

String zero(int n){ //função que verifica se o numero é menor
//que dez, e se for adiciona o 0 antes
if(n < 10){ //Exemplo: entra 5, sai 05-> 00:05:00
return "0" + String(n); //como seria-> 00:5:00
}else{
return String(n);
}
}
}
```

```

void printAgora(){ //função que imprime -a hora atual
DateTimenow = rtc.now(); //variavelnow do tipo DateTime e define ela como a hora
do rtc
Serial.print(String(daysOfTheWeek[now.dayOfTheWeek()]) + ", " + zero(now.day()) +
"/" + zero(now.month()) + "/" + now.year())+"-";
Serial.print(" - ");
Serial.println(zero(now.hour()) + ":" + zero(now.minute()) + ":" + zero(now.second()));
//as três linhas de cima imprimem as informações: dia da semana, dia/mês/ano -
hh:mm:ss
}
void setup() {
Serial.begin(9600);
if(!rtc.begin()){ //se !(nao) iniciar o rtc imprime a mensagem.
Serial.println("RTC nao encontrado.");
while(1);
}
//rtc.adjust é a função que envia a data e hora para o rtc:
//rtc.adjust(DateTime(2018, 3, 16, 15, 59, 0)); //descomente essa linha para alterar
a hora do RTC!
if(!rtc.isrunning()){ //se o rtc !(nao) estiver funcionando, ajusta ele com a
Serial.println("RTC nao esta funcionando!"); //data e hora da compilação do sketch
rtc.adjust(DateTime(F(__DATE__), F(__TIME__)));
}
pinMode (chipSelect, OUTPUT); //selecao do cartao SD
if (!SD.begin(chipSelect)) {
Serial.println("Card SD falhou");
return;
}
else {
Serial.println("Card SD ok");
}
}
void loop() {
printAgora(); //executa a função que imprime as informações
// Fazer as medidas de corrente(móvel) e armazena-la no SD
vsl2 = 0;
for (int i=0; i<int (AMOSTRAS2); i++){
vsl2 +=1.0 * analogRead(vspinoIM);
delay(500); // tempo entre as medidas para fazer a media

vsl2 = vsl2/30;
VporI2 = (vsl2/1024.0)*5000; // tensao medida no sensor de corrente em mV
Corrente2 = (VporI2 - 2500 )/66;
}
// Fazer as medidas de tensao e armazena-las no SD
vsV2 = 0.0;
for (int i=0; i<int (AMOSTRAS2); i++){
vsV2 +=1.0 * analogRead(vspinoVM);
delay(50); // tempo entre as medidas para fazer a media
}

```

```

vsV2 =vsV2/30;
  Voltagem2 = (vsV2*aRef)/1024.0;
  Voltagem2 = (Voltagem2 * relacao);
}
  // Fazer as medidas de corrente (fixa) e armazena-las no SD
vsl = 0;
for (int i=0; i<int (AMOSTRAS); i++){
vsl += 1.0* analogRead(vspinolF);
delay(500);
  // tempo entre as medidas para fazer a media
vsl =vsl/30;
Vporl = (vsl/1024.0)*5000; // tensao medida no sensor de corrente em V
  Corrente = (Vporl - 2500)/66; //
}
  // Fazer as medidas de tensao(fixa) e armazena-las no SD
vsV = 0.0;
for (int i=0; i<int (AMOSTRAS); i++){
vsV +=1.0 * analogRead(vspinoVF);
delay(50);          // tempo entre as medidas para fazer a media
vsV =vsV/30;
  Voltagem = (vsV*aRef)/1024.0;
  Voltagem = (Voltagem * relacao);
}
  File Dados = SD.open("DADOS.txt", FILE_WRITE);
if (Dados) {      // testa pra ver se tem o arquivo DADOS.TXT no SD.
Dados.print("PLACA1 ");
Dados.print(Voltagem);
Dados.print(" ,V, ");
Dados.print(Corrente);
Dados.print(" ,A, ");
Dados.print("PLACA2 ");
Dados.print(Voltagem2);
Dados.print(" ,V, ");
Dados.print(Corrente2);
Dados.print(" ,A, ");
Dados.print ("Potencia1 ");
Dados.print (Voltagem *Corrente);
Dados.print(" ,W1, ");
Dados.print ("Potencia1 ");
Dados.print (Voltagem2 *Corrente2);
Dados.print(" ,W2, ");
//Obter a data e horário e armazena-los no SD
//byte second, minute, hour, dayOfWeek, dayOfMonth, month, year;
// readDS1307 time(&second, &minute, &hour, &dayOfWeek, &dayOfMonth,
&month, &year);
DateTime now = rtc.now();
Dados.print(String(daysOfTheWeek[now.dayOfTheWeek()]) + " , " + zero(now.day())
+ "/" + zero(now.month()) + "/" + now.year() + " ,";
Dados.println(zero(now.hour()) + ":" + zero(now.minute()) + ":" + zero(now.second()));

```

```
Dados.close();  
}  
}
```

APÊNDICE D - Programação do rastreador solar de um eixo

```
#include <AccelStepper.h>
AccelSteppermotor1(1,6,7 );
int w = 0;
int pino_enable= 4;
int vldrpinolo = A3; //pino analogico dos sensores L-O
int vldrpinocentro = A2;
int ldrcentral = 0;
int vldrlo = 0 ;
int pinoSensorLeste = 11;
int pinoSensorOeste = 12;
void setup() {
  Serial.begin (9600);
  motor1.setMaxSpeed(100);
}
void loop() {
  int sensorLeste = digitalRead(pinoSensorLeste);
  int sensorOeste = digitalRead(pinoSensorOeste);
  vldrlo = analogRead(vldrpinolo);
  ldrcentral = analogRead(vldrpinocentro);
  Serial.println (sensorOeste);
  Serial.println (sensorLeste);
  if(ldrcentral< 480 ){
    motor1.moveTo(0);
    digitalWrite(pino_enable, HIGH);
    Serial.println (ldrcentral);
    Serial.println (" sol baixo menor 480 ");
    delay(8000);
  }
  else if (ldrcentral> 481 &&ldrcentral< 550 &&vldrlo< 960 &&vldrlo> 800
  &&sensorLeste == 0 &&sensorOeste == 0 ){
    motor1.moveTo(0);
    digitalWrite(pino_enable, HIGH);
    delay(1000);
  }
  else if (ldrcentral> 481 &&ldrcentral< 550 &&vldrlo> 960 &&sensorLeste == 0
  &&sensorOeste == 0 ){
    w -= 1;
    digitalWrite(pino_enable, LOW);
    motor1.moveTo(w); //MotorAnda(w);
    motor1.run();
    Serial.print (vldrlo);
    Serial.println (" leitura do sensor de movimento para leste");
    Serial.print (ldrcentral);
    Serial.println (" ldr central ");
    Serial.println (w);
    delay(1000);
  }
}
```



```

}
else if (ldrcentral > 481 &&ldrcentral < 550 &&vldrLO < 740 &&sensorLeste == 0
&&sensorOeste == 0 ){
    w += 1;
digitalWrite(pino_enable, LOW);
motor1.moveTo(w); //MotorAnda(w);
motor1.run();
Serial.print (vldrLO);
Serial.println (" sensor de movimento movimento para oeste ");
Serial.print (ldrcentral);
Serial.println (" ldr central ");
Serial.println (w);
delay(1000);
}
else if (ldrcentral > 481 &&ldrcentral < 550 &&vldrLO < 960 &&vldrLO > 740
&&sensorLeste == 0 &&sensorOeste == 0 ){
motor1.moveTo(0);
digitalWrite(pino_enable, HIGH);
delay(1000);
}
else if (ldrcentral > 481 &&ldrcentral < 550 &&vldrLO > 960 &&sensorLeste == 0
&&sensorOeste == 0 ){
    w -= 1;
digitalWrite(pino_enable, LOW);
motor1.moveTo(w); //MotorAnda(w);
motor1.run();
delay(1000);
}
else if (ldrcentral > 481 &&ldrcentral < 550 &&vldrLO < 740 &&sensorLeste == 0
&&sensorOeste == 0 ){
    w += 1;
digitalWrite(pino_enable, LOW);
motor1.moveTo(w); //MotorAnda(w);
motor1.run();
delay(1000);
}
else if (ldrcentral > 551 &&ldrcentral < 649 &&vldrLO < 889 &&vldrLO > 841
&&sensorLeste == 0 &&sensorOeste == 0 ){
motor1.moveTo(0);
digitalWrite(pino_enable, HIGH);
delay(1000);
}
else if (ldrcentral > 551 &&ldrcentral < 649 &&vldrLO > 889 &&sensorLeste == 0
&&sensorOeste == 0 ){
    w -= 1;
digitalWrite(pino_enable, LOW);
motor1.moveTo(w); //MotorAnda(w);
motor1.run();
}

```

```

delay(1000);
}
else if (ldrcentral> 551 &&ldrcentral< 649 &&vldrLO< 840 &&sensorLeste == 0
&&sensorOeste == 0 ){
    w += 1;
digitalWrite(pino_enable, LOW);
motor1.moveTo(w); //MotorAnda(w);
motor1.run();

delay(1000);
}
else if (ldrcentral> 650 &&ldrcentral< 739 &&vldrLO< 870 &&vldrLO> 640
&&sensorLeste == 0 &&sensorOeste == 0 ){
motor1.moveTo(0);
digitalWrite(pino_enable, HIGH);
delay(1000);
}
else if (ldrcentral> 650 &&ldrcentral< 739 &&vldrLO> 870 &&sensorLeste == 0
&&sensorOeste == 0 ){
    w -= 1;
digitalWrite(pino_enable, LOW);
motor1.moveTo(w); //MotorAnda(w);
motor1.run();
delay(1000);
}
else if (ldrcentral> 650 &&ldrcentral< 739 &&vldrLO< 640 &&sensorLeste == 0
&&sensorOeste == 0 ){
    w += ;
digitalWrite(pino_enable, LOW);
motor1.moveTo(w); //MotorAnda(w);
motor1.run();
delay(1000);
}
else if (ldrcentral> 740 &&vldrLO< 680 &&vldrLO> 540 &&sensorLeste == 0
&&sensorOeste == 0 ){
motor1.moveTo(0);
digitalWrite(pino_enable, HIGH);
delay(1000);
}
else if (ldrcentral> 740 &&vldrLO> 680 &&sensorLeste == 0 &&sensorOeste == 0 ){
    w -= 1;
digitalWrite(pino_enable, LOW);
motor1.moveTo(w); //MotorAnda(w);
motor1.run();
delay(1000);
}
else if (ldrcentral> 740 &&vldrLO< 540 &&sensorLeste == 0 &&sensorOeste == 0 ){
    w += 1;
digitalWrite(pino_enable, LOW);

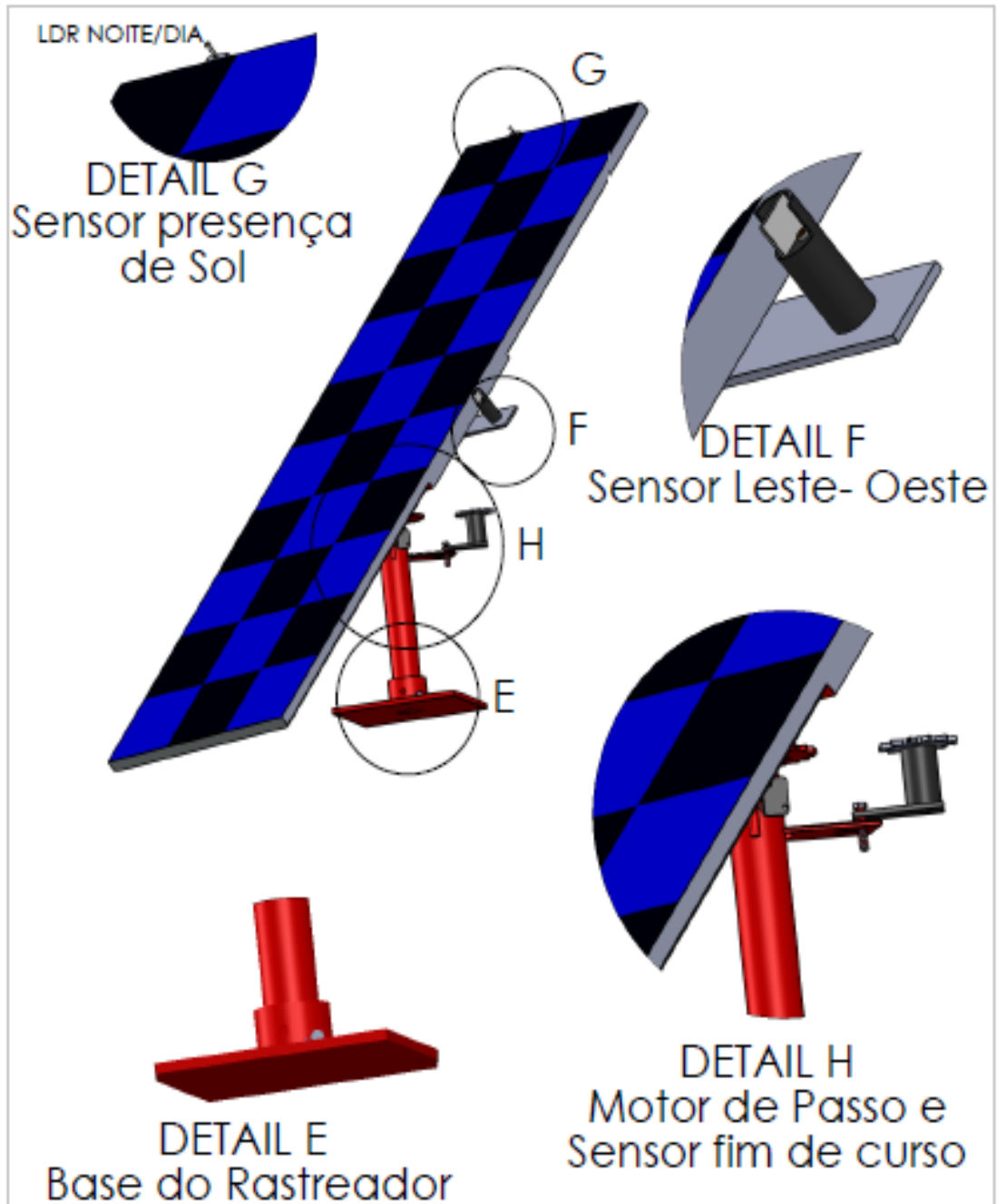
```

```

motor1.moveTo(w); //MotorAnda(w);
motor1.run();
delay(1000);
}
else if (sensorLeste == 0 &&sensorOeste == 1 ){
  w += 30;
  motor1.moveTo(w);
  digitalWrite(pino_enable, LOW);
  motor1.run();
  Serial.println (" aqui apertou fim de curso1");
  Serial.println (w);
  delay(10000);
}
else if (sensorOeste == 0 &&sensorLeste == 1 ){
  w -= 30;
  motor1.moveTo(w);
  motor1.run();
  digitalWrite(pino_enable, LOW);
  delay(10000);
}
else
{
  motor1.moveTo(0);
  digitalWrite(pino_enable, HIGH);
  delay(8000);
}
}
}

```

APÊNDICE E - Desenho 3 d do rastreador solar azimuthal



Curso Mestrado em Ciência dos Materiais		ACADÊMICO Walney Britos Ramires		Ano UFMS 2018	Orientador: Prof. Flávio Arlstone	Dptº: Física
					Area de Concentração: Dispositivos	
DEL	NOME Walney	ASSINATURA	DATA		TÍTULO: Rastreador Solar de Eixo Unico	
					Projeto: ESTUDO COMPARATIVO DA EFICIÊNCIA ENTRE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS DE SILÍCIO EM ESTRUTURA FIXA E COM RASTREADOR	
				MATERIAL: Peso: 15 Kg	ESCALA: 1:30	A4 FOLHA 1 DE 1