



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS DE
COMUNICAÇÃO E AUTOMAÇÃO**

ROMÊNIA GURGEL VIEIRA

**ANÁLISE COMPARATIVA DO DESEMPENHO ENTRE UM PAINEL SOLAR
ESTÁTICO E COM RASTREAMENTO NO MUNICÍPIO DE MOSSORÓ-RN**

MOSSORÓ – RN

2014

ROMÊNIA GURGEL VIEIRA

**ANÁLISE COMPARATIVA DO DESEMPENHO ENTRE UM PAINEL SOLAR
ESTÁTICO E COM RASTREAMENTO NO MUNICÍPIO DE MOSSORÓ-RN**

Dissertação de mestrado acadêmico
apresentada ao Programa de Pós-Graduação
em Sistemas de Comunicação e Automação,
como requisito para a obtenção do título de
Mestre em Sistemas de Comunicação e
Automação.

Orientador: Prof.^a Dr.^a Fabiana Karla de
Oliveira Martins Varella – UFERSA

Co-orientador: Prof. Dr. Marcelo Roberto
Bastos Guerra Vale – UFERSA

MOSSORÓ – RN

2014

O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade de seus autores

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Biblioteca Central Orlando Teixeira (BCOT)
Setor de Informação e Referência

V657a Vieira, Romênia Gurgel

Análise Comparativa do Desempenho entre um Painel Solar Estático e com Rastreamento no Município de Mossoró-RN /Romênia Gurgel Vieira -- Mossoró, 2014.
85f.: il.

Orientador: Prof^ª. Dra. Fabiana Karla de O. Martins Varella
Co-Orientador: Prof. Dr. Marcelo Roberto B. Guerra Vale

Dissertação (Mestrado em Sistema de Comunicação e Automação) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido. Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação.

1. Energia solar. 2. Energia energética. 3. Rastreador solar.
4. Sistema fotovoltaico. I. Título.

RN/UFERSA/BCOT /786-14

CDD: 621.47

Bibliotecária: Vanessa de Oliveira Pessoa
CRB-15/453

ROMÊNIA GURGEL VIEIRA

**ANÁLISE COMPARATIVA DO DESEMPENHO ENTRE UM PAINEL SOLAR
ESTÁTICO E COM RASTREAMENTO NO MUNICÍPIO DE MOSSORÓ-RN**

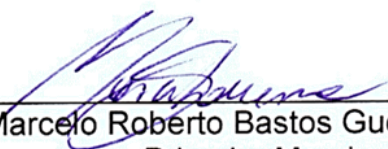
Dissertação de mestrado acadêmico
apresentada ao Programa de Pós-
Graduação em Sistemas de
Comunicação e Automação, como
requisito para a obtenção do título de
Mestre em Sistemas de Comunicação e
Automação.

APROVADA EM: 15 / 08 / 2014.

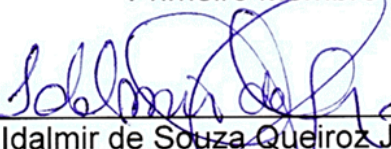
BANCA EXAMINADORA



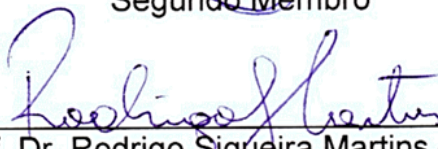
Prof. Dr.^a Fabiana Karla de Oliveira Martins Varella – UFERSA
Presidente



Prof. Dr. Marcelo Roberto Bastos Guerra Vale – UFERSA
Primeiro Membro



Prof. Dr. Idalmir de Souza Queiroz Júnior – UFERSA
Segundo Membro



Prof. Dr. Rodrigo Siqueira Martins – IFRN
Terceiro Membro

Mossoró, 15 de agosto de 2014

DEDICATÓRIA

Ao meu avô Raimundo Gurgel Diógenes
(*in memorian*) que com certeza estaria
comemorando mais esse passo
conosco, sempre na sua forma
carinhosa de me tratar.

Aos meus pais, Antônio Vieira da
Silva e Adelia Gurgel Vieira, aos
meus irmãos, Hummel Rafael e
Rudolfo Hummel, pelo apoio,
incentivo, amor, carinho,
compreensão, e dedicação. Por
estarem presentes em todos os
momentos, e por serem a base de
qualquer conquista em minha vida.

AGRADECIMENTOS

À toda minha família, em especial meus pais e meus irmãos, pela dedicação, compreensão, incentivo e suporte. Pela educação que me foi oferecida, e que me trouxe até essa conquista, pelos princípios que me foram ensinados, por toda força me deram em todos os momentos difíceis durante a caminhada árdua da graduação. Mas, sobretudo agradeço pelo carinho e amor incondicional que temos um pelo outro.

À minha cunhada-irmã Natália Fernandes, por, assim como minha família, e meus pais e irmãos estar sempre presente na minha vida.

Ao meu namorado Magno Medeiros, muito obrigada, por todo o auxílio no desenvolvimento do trabalho, além do apoio emocional, do companheirismo, do carinho e por suportar todos os meus momentos de desespero.

À Professora Dr.^a Fabiana Karla de Oliveira Martins Varella pela orientação, dedicação, compreensão e confiança ao ser minha orientadora. Além de dos ensinamentos técnicos, agradeço por toda contribuição na formação do meu caráter profissional.

Ao Professor Dr. Marcelo Roberto Bastos Guerra Vale, pela orientação, dedicação e confiança também em ser o meu co-orientador.

À banca examinadora presente, por contribuir para o aperfeiçoamento do meu trabalho.

Aos Professores do PPGSCA, especialmente ao Prof. Idalmir e ao Prof. Humberto, que sempre me ajudaram no desenvolvimento do trabalho, além de contribuir para minha formação profissional.

À todos os amigos mestrandos do PPGSCA, Adelson, Isaac, Monique, Lucas, Sameque e Tayara.

À secretária do PPGSCA, Livia Lessa, pelo apoio administrativo e muitas vezes emocional.

EPÍGRAFE

“A vontade de se preparar tem que ser maior do que a vontade de vencer. Vencer será consequência da boa preparação” (Bernardinho)

RESUMO

A energia solar fotovoltaica vem sendo explorada como uma das soluções energéticas ao declínio da produção de petróleo, e preocupações ambientais. No entanto, geração de energia elétrica através do sol ainda é considerada pouco competitiva frente às outras fontes, por apresentar baixo rendimento e alto custo de produção. Na tentativa de torná-la mais atrativa do ponto de vista financeiro, rastreadores solares têm sido utilizados a fim de aumentar o rendimento dos sistemas fotovoltaicos. Neste sentido, o presente trabalho tem por objetivo realizar um estudo comparativo entre um painel solar fotovoltaico estático e um painel com mobilidade em um eixo, instalados na cidade de Mossoró/RN. O município em questão está localizado no semiárido nordestino, sob altos índices de radiação solar, em uma região de clima seco e quente, atingindo elevadas temperaturas durante o dia. Inicialmente são abordados conceitos relativos à energia solar fotovoltaica, e tecnologias de rastreamento do sol. Em seguida, descreve-se os componentes de controle, sensoriamento e estruturas utilizadas nos sistemas fotovoltaicos propostos. Por fim, foram realizadas as análises de funcionamento e o estudo comparativo de desempenho do sistema estático e do móvel, que permitiram concluir o que o painel com rastreamento do sol apresentou baixo ganho médio na potência gerada em relação ao painel fixo.

Palavras-Chave: Sistema Fotovoltaico. Rastreador Solar. Eficiência Energética.

ABSTRACT

The photovoltaics energy has been explored as one of the solutions to the decline in oil production, and environmental worries. However, generating electric energy throw the sun is still considered uncompetitive when considering other sources, because it shows low efficiency and high production costs. Trying to turn it more attractive to the financial point view, sun trackers are been used to increase the photovoltaics system efficiency. Considering it, this work aims to perform a comparative study between a static photovoltaic solar panel and a one axis mobile panel, both installed in Mossoró/RN. The city is located on northeast semi-arid, under high levels of solar radiation, on dry and hot climate regions, achieving high temperatures during day. Initially are discussed concepts related to solar photovoltaics energy, and tracking technologies. Then, are described the control components, sensing and structures used on the photovoltaics systems proposed. Lastly, the analyses about the functioning and comparing study about the performance of the static and mobile system were realized, allowing to conclude that the sun tracker panel showed low gain on the generated power when compared to the static panel.

Keywords: Photovoltaic System. Sun Tracker. Energy Efficiency.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Média de radiação solar	48
Tabela 2 – Insolação diária média (horas)	48
Tabela 3 – Características do Arduino® Mega.....	51
Tabela 4 – Características elétricas do módulo FV utilizado	59
Tabela 5 – Desempenho do sistema estático.....	65
Tabela 6 – Desempenho do sistema móvel	68
Tabela 7 – Desempenho dos sistemas móvel e estático	71
Tabela 8 – Preços dos componentes do sistema de rastreo	76

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Radiação direta e radiação difusa.....	23
Figura 2 – Posição do afélio e periélio da Terra.....	24
Figura 3 – Ângulo de declinação solar δ	25
Figura 4 – Ângulo de altitude solar β_N	26
Figura 5 – Ângulo de inclinação do módulo fotovoltaico	26
Figura 6 – Ângulo de Azimute ϕ_s	27
Figura 7 – Célula fotovoltaica de silício	28
Figura 8 – Modelo elétrico simplificado de uma célula FV	29
Figura 9 – Modelo elétrico real de uma célula FV	29
Figura 10 – Curva característica corrente x tensão.....	31
Figura 11 - Curva característica potência x tensão	31
Figura 12 – Efeito causado pela variação da radiação solar incidente.....	32
Figura 13 – Efeito causado pela temperatura do módulo	33
Figura 14 – Disposição dos módulos FV	35
Figura 15 – Rastreador solar de eixo simples	36
Figura 16 – Rastreador solar de eixo duplo	37
Figura 17 – Estrutura de suporte tipo pedestal.....	38
Figura 18 – Estrutura de plataforma giratória.....	38
Figura 19 – Estrutura de base giratória utilizada em painéis fotovoltaicos.....	38
Figura 20 – Estrutura tipo <i>roll-tilt</i>	39
Figura 21 – Rastreador polar.....	41
Figura 22 – Rastreador azimutal	41
Figura 23 - Rastreador Horizontal	42
Figura 24 – Rastreador polar equatorial.....	42
Figura 25 – Rastreador azimutal/elevação	43
Figura 26 – Seguidor solar de eixo duplo de Dhanabal, <i>et. al.</i> , 2013.....	45
Figura 27 – Sistema de painéis fotovoltaicos analisados em Alves, 2008	46
Figura 28 - Esquematização dos sistemas analisados.....	50
Figura 29 – Arduino® Mega	51
Figura 30 – Módulo sensor de corrente.....	52
Figura 31 – Circuito divisor de tensão para medição de tensão.....	53
Figura 32 – Sensor de Temperatura LM35.....	54
Figura 33 – Sensor LDR.....	54

Figura 34 – Disposição dos sensores LDR para alinhamento da estrutura.....	55
Figura 35 – Sensor de posicionamento utilizado no painel FV móvel	56
Figura 36 – <i>Driver</i> motor de passo	57
Figura 37 – <i>Ethernet Shield</i> para registro de dados	57
Figura 38 – Desenho de estrutura estática	58
Figura 39 – Módulo FV utilizado	59
Figura 40 – Fluxograma do código de automação dos sistemas FVs	60
Figura 41 – Coolers instalados para refrigeração do Arduino®	61
Figura 42 – Capa protetora da caixa do Arduino®	62
Figura 43 – Sistema FV estático	63
Figura 44 – Sistema com rastreo antes (a) e após (b) as modificações	64
Figura 45 – Comportamento da energia gerada e temperatura para o sistema estático	66
Figura 46 – Curva de potência e energia gerada (dia nublado)	67
Figura 47 - Curva e potência e energia gerada (dia ensolarado)	67
Figura 48 – Comportamento da energia gerada e temperatura do sistema móvel	69
Figura 49 – Desempenho potência e energia gerada (dia nublado).....	69
Figura 50 - Desempenho potência e energia gerada (dia ensolarado)	70
Figura 51 – Comparação de desempenho dos sistemas estático e móvel (dia 1)	72
Figura 52 - Comparação de desempenho dos sistemas estático e móvel (dia 2)	72
Figura 53 - Comparação de desempenho dos sistemas estático e móvel (dia 3)	73
Figura 54 - Comparação de desempenho dos sistemas estático e móvel (dia 4)	73
Figura 55 - Comparação de desempenho dos sistemas estático e móvel (dia 5)	73
Figura 56 - Comparação de desempenho dos sistemas estático e móvel (dia 6)	74
Figura 57 - Comparação de desempenho dos sistemas estático e móvel (dia 7)	74

Figura 58 - Comparação de desempenho dos sistemas estático e móvel (dia 8)
..... 74

NOMENCLATURA

Letras Latinas

L – Latitude
I – Corrente de carga
I_s – Corrente da fonte
I_d – corrente do diodo
I_o – corrente de saturação
V – Tensão
K – constante de Boltzman
T – temperatura em kelvin
q – carga do elétron
R_s – resistência série
R_p – resistência paralelo
°C – grau celsius
I_{sc} – corrente de curto-circuito
V_{oc} – tensão de circuito aberto
P_m – potência máxima
I_{mp} – Corrente máxima
V_{mp} – tensão máxima
A – Área
I_c – radiação solar incidente
d – distância entre os arranjos dos painéis
b – comprimento do painel

Letras Gregas

δ – declinação solar
 β_N – altitude solar
 ϕ_s – ângulo de azimuth
 η – rendimento
 α – inclinação dos painéis

Abreviações

FV – Fotovoltaico

RN – Rio Grande do Norte

W_p – Watt Pico

Siglas

AC – *Alternate Current* (corrente alternada)

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

CLP – Controlador lógico programável

CI – circuito integrado

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

DC – *Direct Current* (corrente contínua)

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

LDR – *Light Dependent Resistor* (Resistor Dependente de Luz)

UFERSA – Universidade Federal Rural do Semi-Árido

USB – *Universal Serial Bus*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	19
1.1	JUSTIFICATIVA.....	20
1.2	OBJETIVOS.....	21
1.2.1	Objetivo Geral.....	21
1.2.2	Objetivos Específicos.....	21
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	22
2.1	ENERGIA SOLAR.....	22
2.1.1	Radiação Solar	23
2.2	MOVIMENTO DA TERRA.....	24
2.2.1	Declinação Solar.....	25
2.2.2	Posição do Sol.....	25
2.3	PAINÉIS FOTOVOLTAICOS	27
2.3.1	Modelo Elétrico de uma Célula FV.....	29
2.3.2	Características Elétricas dos Painéis FV	30
2.3.3	Tipos de Módulos FV	33
2.3.4	Sombreamento dos Painéis.....	34
2.4	RASTREADORES SOLARES	35
2.5	CLASSIFICAÇÃO DOS RASTREADORES SOLARES	36
2.5.1	Número de eixos rotativos	36
2.5.2	Estrutura de Suporte.....	37
2.5.3	Tipo de controle	39
2.5.3.1	Controle passivo.....	39
2.5.3.2	Controle eletro-óptico	40
2.5.3.3	Controle microprocessado.....	40
2.5.4	Estratégia de Rastreamento	40
2.5.4.1	Rastreador Polar.....	41
2.5.4.2	Rastreador Azimutal	41

2.5.4.3 Rastreador Horizontal	42
2.5.4.4 Rastreador Polar Equatorial	42
2.5.4.5 Rastreador Azimutal/Elevação	43
2.6 ESTADO DA ARTE EM RASTREADORES SOLARES	43
2.6.1 Mundo	44
2.6.2 Brasil	45
3 MATERIAIS E MÉTODOS	47
3.1 METODOLOGIA DA PESQUISA	47
3.2 CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL	47
3.3 CARACTERIZAÇÃO DOS SISTEMAS	49
3.3.1 Arduino® Mega	51
3.3.2 Sensores	52
3.3.2.1 Medição de Corrente	52
3.3.2.2 Medição de Tensão	53
3.3.2.3 Medição de Temperatura dos Módulos	53
3.3.2.4 Medição de Radiação Solar	54
3.3.2.5 Medição de Intensidade Luminosa para Posicionamento	55
3.3.3 Motor de Passo	57
3.3.4 Sistema de Registro de Dados	57
3.3.5 Estruturas	58
3.3.6 Módulo Fotovoltaico	58
3.3.7 Automação dos Sistemas	60
3.3.8 Montagem	61
3.3.8.1 Painel FV Estático	62
3.3.8.2 Painel FV Móvel	63
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	65
4.1 DESEMPENHO DO SISTEMA ESTÁTICO	65
4.2 DESEMPENHO DO SISTEMA COM MOBILIDADE EM UM EIXO	68

4.3 COMPARAÇÃO DE DESEMPENHO DOS SISTEMAS	70
4.4 ESTIMATIVA DE RETORNO FINANCEIRO	75
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	77
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	78
REFERÊNCIAS	79
ANEXO I	82
ANEXO II	83

1 INTRODUÇÃO

O consumo energético mundial vem apresentando elevado crescimento ao longo das últimas décadas, impulsionado pelo avanço tecnológico e desenvolvimento humano. Este crescimento, em conjunto com a possibilidade de redução da oferta de combustíveis fósseis, e ainda a crescente preocupação com a preservação do meio ambiente, têm sido fatores incentivadores à pesquisa e desenvolvimento de fontes alternativas de energia, menos poluentes, renováveis e que produzam pouco impacto ambiental.

Diante deste panorama mundial, o aproveitamento da energia solar, sobretudo no que diz respeito à geração de energia elétrica através de painéis fotovoltaicos, vem aumentando a potência instalada a cada ano, atingindo aproximadamente 139 GW instalados no ano de 2013 (EPIA, 2014).

A geração de energia elétrica através do sol pode trazer benefícios, tais como a diversificação da matriz energética, diminuição dos impactos ambientais, redução da dependência aos combustíveis fósseis. Ainda deve-se considerar dois outros pontos positivos importantes, como a eletrificação de regiões remotas, e a descentralização da geração de energia elétrica. Este último fator, é relevante sobretudo para o Brasil, visto que suas unidades geradoras são essencialmente hidráulicas, e em sua maioria distante dos grandes centros consumidores.

Apesar das vantagens apresentadas, os sistemas fotovoltaicos de geração de energia elétrica encontram barreiras à sua popularização. Dois fatores limitam seu uso atualmente, a saber, o alto custo de produção e baixo rendimento frente a outras fontes alternativas de energia.

Na busca pelo aumento da eficiência dos sistemas fotovoltaicos, pesquisas vêm sendo desenvolvidas com o uso de rastreadores solares. Estes dispositivos permitem manter os painéis sempre voltados em direção ao sol, de maneira a manter a superfície sempre perpendicular aos raios solares. Desta forma, há maior captação da energia solar e consequente aumento da produção energética.

1.1 JUSTIFICATIVA

Com o declínio dos combustíveis fósseis, a necessidade por soluções energéticas alternativas se evidenciou ao longo da última década. Na busca por fontes renováveis de energia, a energia solar vem desempenhar um papel primordial, por ser uma fonte abundante, tendo ainda grande potencial a ser explorado.

Dentre as formas de aproveitamento da energia solar, a geração fotovoltaica de energia elétrica apresenta-se como uma das mais promissoras. Porém, o rendimento destes sistemas ainda são considerados baixos, sendo necessária busca por formas de otimização da fonte, tornando-a mais eficiente e consequentemente competitiva frente a outras fontes renováveis de energia.

Uma maneira de aumentar a eficiência dos sistemas fotovoltaicos é através do uso de rastreadores solares. Estudos com o uso destes dispositivos vêm sendo desenvolvidos ao redor do mundo, e mostram acréscimos em média de 30 a 40% na produção de energia elétrica (BOSE, 2011; SILVA, 2012).

A proposta de análise comparativa entre um sistema fotovoltaico estático, e um que faz uso de um sistema de rastreamento, na cidade de Mossoró/RN, apresenta-se então como uma pesquisa relevante, visto a proximidade do local com a linha do equador, bem como estar situado na região do semiárido nordestino, onde há alto índice de radiação solar.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Analisar o desempenho de um sistema fotovoltaico sem mobilidade, ou seja, estático, com um outro sistema que contém um dispositivo de rastreamento solar com um eixo de mobilidade.

1.2.2 Objetivos Específicos

Para atingir-se o objetivo geral, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Montar os dois sistemas fotovoltaicos a serem analisados;
- Construir um rastreador solar capaz de seguir o sol, com mobilidade em um eixo;
- Controlar e automatizar o processo de rastreio do sol e coleta de dados de geração de energia e condições ambientais, tais como índice de radiação solar e temperatura ambiente;
- Analisar os dados obtidos para os dois sistemas de geração fotovoltaica;
- Avaliar o desempenho do painel fotovoltaico com rastreador solar, em relação ao painel fotovoltaico estático.

2 REVISÃO DA LITERATURA

O presente Capítulo apresenta inicialmente uma conceituação sobre energia solar, bem como trata do seu aproveitamento para geração de energia elétrica através de painéis fotovoltaicos. Além disso, analisa trabalhos semelhantes já desenvolvidos, a fim de contextualizar a pesquisa proposta no âmbito mundial e nacional.

2.1 ENERGIA SOLAR

A energia solar chega à Terra sob duas formas, energia térmica e energia luminosa, e é considerada uma fonte de energia abundante, limpa e renovável. Pode-se dizer que quase todas as fontes de energia existentes são formas indiretas de energia solar, como por exemplo, hidráulica, biomassa, eólica, combustíveis fósseis.

A radiação solar pode ser utilizada diretamente como fonte de energia térmica, para aquecimento de fluidos e ambientes, bem como para geração de potência mecânica ou elétrica (ANEEL, 2005). Outra forma de aproveitamento é a conversão direta em energia elétrica, através de sistemas fotovoltaicos ou indiretos, por meio de sistemas termoeletrônicos.

O aproveitamento térmico para aquecimento de fluidos ocorre através de coletores ou concentradores solares. Os coletores solares são mais utilizados em aplicações domésticas ou comerciais para aquecimento de água. Os concentradores aplicam-se quando há necessidade de elevadas temperaturas como secagem de grãos e produção de vapor.

Dentre os vários processos de aproveitamento da energia solar, atualmente os mais utilizados no Brasil e no mundo são a tecnologia de aquecimento de água e a geração fotovoltaica de energia elétrica (ANEEL, 2005).

A eficiência destes processos está diretamente ligada à radiação solar incidente na região de aplicação. Portanto, é importante entender posicionamento do sol ao longo do ano, bem como as condições ambientais que possam vir interferir no nível de radiação solar.

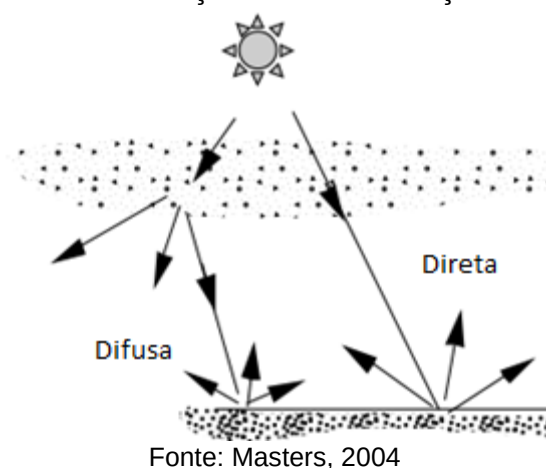
2.1.1 Radiação Solar

Segundo o Plano Nacional de Energia 2030 a irradiação de energia solar por ano na superfície da Terra é suficiente para atender milhares de vezes o consumo anual de energia do mundo (ANEEL *apud* EPE, 2009). Entretanto, esta radiação não atinge de maneira uniforme toda a crosta terrestre. Vários são os fatores que influenciam a radiação solar incidente em uma determinada região, a saber, a latitude, a estação do ano, e condições atmosféricas como nebulosidade e umidade relativa do ar.

De toda a radiação solar incidente na atmosfera, apenas uma fração atinge a superfície terrestre, devido à reflexão e absorção dos raios solares nas camadas mais altas. Esta fração que atinge o solo é composta por um feixe, ou radiação direta, e uma parte difusa, ou radiação difusa (CRESESB, 2004).

A radiação direta é a fração dos raios solares com maior potencial de aproveitamento energético, em relação à radiação difusa. Entretanto, a quantidade de radiação direta varia de acordo com a interação entre os raios solares e as massas de ar, ou seja, fatores como umidade relativa, poluição, e nebulosidade interferem na quantidade de radiação direta incidente em uma região. A Figura 1 ilustra os fenômenos de radiação direta e radiação difusa.

Figura 1 – Radiação direta e radiação difusa.



A movimentação do planeta em torno do Sol ao longo do ano é também um fator determinante dos níveis de radiação solar, e será tratado na seção 2.2.

2.2 MOVIMENTO DA TERRA

O posicionamento da Terra em relação ao Sol depende de dois movimentos simultâneos realizados pelo planeta, a saber, o movimento de rotação, e o movimento de translação.

O movimento de rotação é aquele exercido em torno do seu próprio eixo, desta forma a radiação solar atingirá apenas parte da Terra, dando origem aos dias e noites. O movimento de translação corresponde ao movimento anual do planeta em torno do Sol.

Na trajetória elíptica descrita no movimento de translação, há momentos em que a Terra está mais próxima ou mais longe do Sol. Estes pontos da elipse descrita são chamados de afélio, quando a Terra está mais longe do Sol, e periélio, quando a Terra está mais próxima ao Sol. A Figura 2 ilustra a trajetória, bem como o posicionamento do planeta nos pontos extremos da elipse.

Figura 2 – Posição do afélio e periélio da Terra



Fonte: Silva, 2012

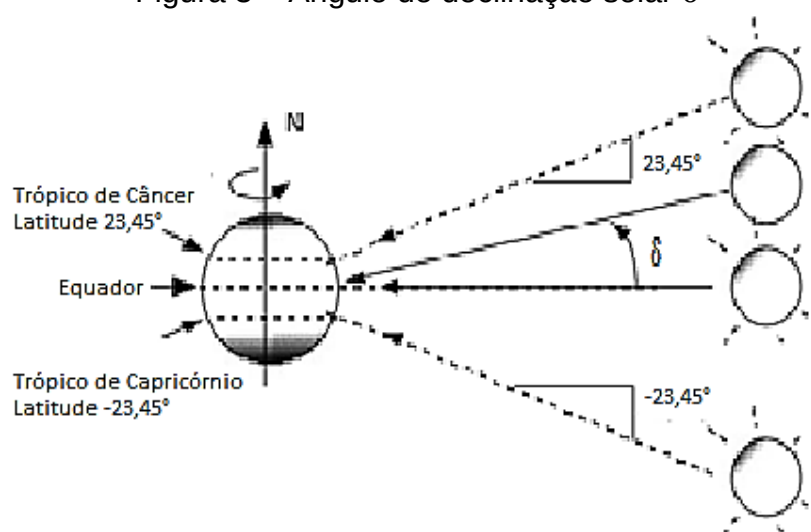
A variação no posicionamento da Terra em relação ao Sol ao longo do ano produzirá variação dos ângulos de incidência dos raios solares sobre a superfície terrestre, o que é um fator decisivo no posicionamento de painéis fotovoltaicos, e será mostrado nas seções 2.2.1 e 2.2.2.

2.2.1 Declinação Solar

A trajetória elíptica da Terra é descrita num plano que tem inclinação de aproximadamente $23,45^\circ$ em relação ao plano equatorial. Esta inclinação é responsável pela variação da posição do Sol no horizonte ao longo do ano.

O ângulo formado entre o centro do Sol e o centro da Terra é chamado de declinação solar (δ), como ilustra a Figura 3. Este ângulo varia entre $-23,45^\circ$ e $+23,45^\circ$, de acordo com o dia do ano, e chega a zero nas posições de afélio e periélio (CASTAÑEDA, 2011).

Figura 3 – Ângulo de declinação solar δ



Fonte: Masters, 2004

O ângulo de declinação solar é dado pela Equação 1, onde a variável n representa o dia do ano.

$$\delta = 23,45 \times \left[\sin \frac{360}{365} (n - 81) \right] \quad (1)$$

Somando a declinação solar e a latitude do local, determina-se a trajetória do Sol para um determinado dia e local do planeta.

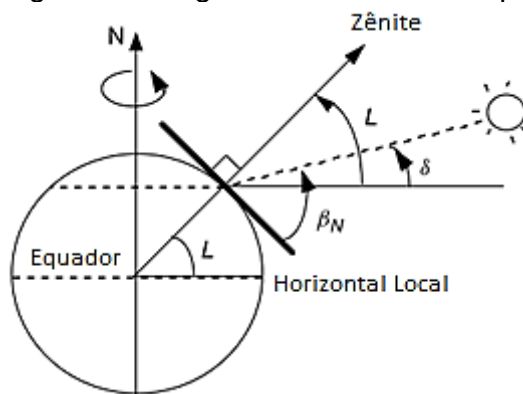
2.2.2 Posição do Sol

Determinar o posicionamento do sol ao longo do dia e do ano é um fator importante para o aumento da eficiência dos painéis fotovoltaicos. A posição do sol pode ser descrita por dois ângulos, o de altitude solar β_N e o ângulo de azimute ϕ_s . Em geral, o ângulo de inclinação dos painéis deve ser igual à latitude do local

de instalação, e devem ser posicionados com as superfícies direcionadas a linha do equador (METERS, 2004).

Entretanto, para determinar uma inclinação mais precisa dos painéis, faz-se necessário conhecer o ângulo de altitude solar β_N , correspondente ao ângulo entre a posição do sol e a projeção deste sobre um plano horizontal da superfície da Terra, como ilustrado na Figura 4.

Figura 4 – Ângulo de altitude solar β_N



Fonte: Masters, 2004

Desta forma têm-se que o ângulo β_N é dado Equação 2, onde a variável L representa a latitude do local, e δ o ângulo de declinação solar.

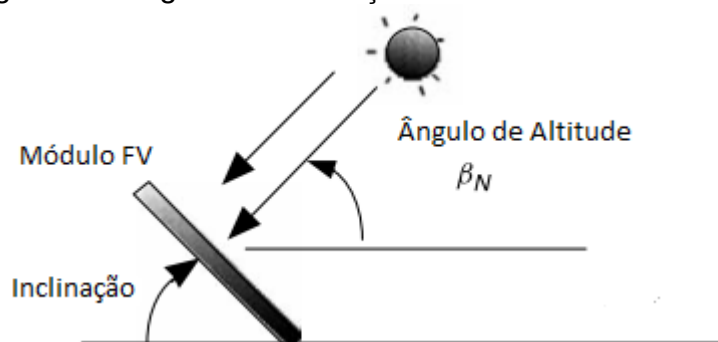
$$\beta_N = 90^\circ - L + \delta \quad (2)$$

Conhecendo o ângulo de altitude do sol β_N , pode-se determinar a inclinação mais adequada para o painel fotovoltaico de acordo com a região de instalação, através da Equação 3.

$$\text{Inclinação} = 90^\circ - \beta_N \quad (3)$$

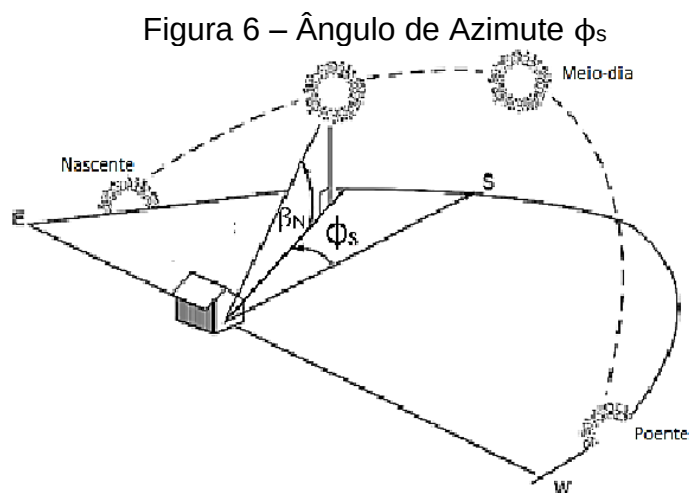
O ângulo de inclinação do módulo fotovoltaico está ilustrado na Figura 5, onde pode-se compreender melhor a necessidade do ângulo de altitude para determinação da inclinação adequada dos painéis.

Figura 5 – Ângulo de inclinação do módulo fotovoltaico



Fonte: Masters, 2004

Para determinação da posição do sol, ainda deve-se considerar o ângulo de azimuth ϕ_s , ilustrado na Figura 6, definido como o ângulo entre a projeção horizontal dos raios solares e a direção Norte-Sul no plano horizontal. Por convenção o ângulo de azimuth é positivo antes do meio dia, e negativo depois do meio dia solar.



Fonte: Masters, 2004

O entendimento do movimento da Terra e do posicionamento do sol em relação a um determinado local do planeta são fatores importantes para o aumento do rendimento dos painéis fotovoltaicos, e o funcionamento destes será discutido na seção 2.3.

2.3 PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

O painel fotovoltaico (FV) é o dispositivo principal de um sistema solar de geração de energia. Estes são responsáveis por captar a energia solar e transformá-la em energia elétrica. Segundo a definição de Cortez (2012), painéis FV, também conhecidos como módulos FV, são "*conjuntos de células fotovoltaicas interligadas entre si com o objetivo de converter energia solar em energia elétrica*".

As células FV, ou células solares, convertem a energia do sol através do efeito fotovoltaico. Este fenômeno dá-se em materiais semicondutores, que caracterizam-se pela presença de bandas de energia onde é permitida a presença de elétrons (banda de valência), e outra totalmente vazia (banda de condução), separadas por uma região proibida, chamada de *gap*. Os semicondutores mais

comuns são o germânio e o silício, sendo este último o mais utilizado, por ser o elemento mais abundante na Terra.

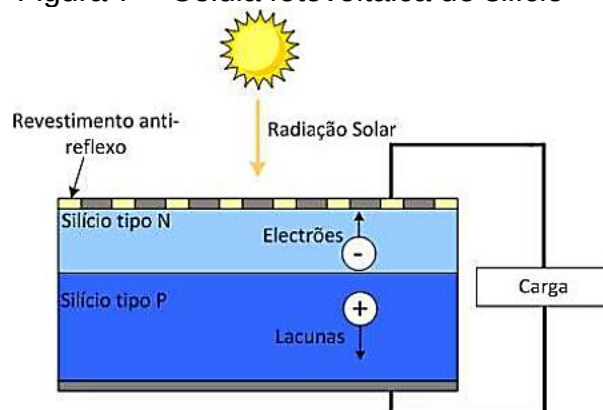
Quando a radiação eletromagnética do sol atinge o semicondutor, os elétrons da banda de valência ganham energia, atravessam o *gap*, e chegam à banda de condução, produzindo uma corrente elétrica. Ao sair do seu lugar de origem, o elétron deixa uma lacuna, que será preenchida por outro elétron, neutralizando o material novamente.

Para aumentar a corrente elétrica no interior do semicondutor, é necessária a adição de elementos químicos. Esse processo é chamado de dopagem, e são adicionados elementos com 5 ou 3 elétrons na camada de valência, como por exemplo, fósforo e boro, respectivamente.

Ao dopar o semicondutor com um elemento pentavalente, o quinto elétron ficará fracamente ligado ao átomo do semicondutor, fazendo com que o material fique carregado negativamente, e este elétron facilmente passará da camada de valência para a camada de condução, caracterizando um semicondutor do tipo N. Caso o dopante seja um elemento trivalente, faltará uma ligação com os átomos do semicondutor, fazendo com que o material fique carregado positivamente, caracterizando um semicondutor do Tipo P.

A junção de um semicondutor do tipo N e um tipo P formam uma célula fotovoltaica, como ilustra a Figura 7. Ao receberem a luz solar, os elétrons são energizados, mas não conseguem fluir da camada N para a camada P. Ao ligar as duas camadas externamente, haverá fluxo de elétrons, caracterizando a corrente elétrica gerada na célula.

Figura 7 – Célula fotovoltaica de silício



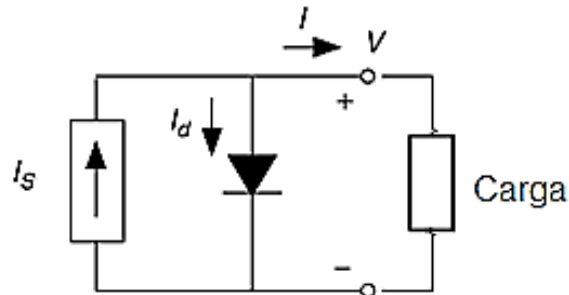
Fonte: Silva, 2012

Para melhor análise das células fotovoltaicas, foi criado um modelo elétrico, que será explicado na seção 2.3.1.

2.3.1 Modelo Elétrico de uma Célula FV

O modelo mais simplificado de uma célula fotovoltaica consiste de um circuito elétrico, composto de um diodo real, ligado em paralelo a uma fonte de corrente ideal, como mostra a Figura 8. A corrente fornecida pela fonte é proporcional ao fluxo solar incidente na célula.

Figura 8 – Modelo elétrico simplificado de uma célula FV



Fonte: Masters, 2004

Da análise do circuito da Figura 8, tem-se a corrente I é dada pela Equação

4.

$$I = I_s - I_D \leftrightarrow I = I_s - I_0 \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) \quad (4)$$

Em que:

$I \rightarrow$ Corrente da carga

$I_s \rightarrow$ Corrente da fonte

$I_d \rightarrow$ Corrente no diodo

$I_0 \rightarrow$ Corrente de saturação do diodo

$V \rightarrow$ Tensão nos terminais da célula FV

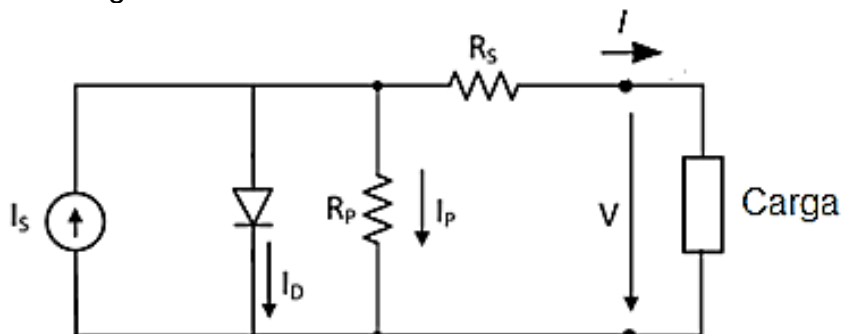
$k \rightarrow$ Constante de Boltzman

$T \rightarrow$ Temperatura da célula em Kelvin

$q \rightarrow$ Carga do elétron

O circuito equivalente real de uma célula FV é um pouco diferente do apresentado na Figura 8, e está representado na Figura 9.

Figura 9 – Modelo elétrico real de uma célula FV



Fonte: Silva, 2012

A resistência elétrica R_s , apresentada na Figura 9 refere-se às perdas por efeito Joule de uma célula FV devido a corrente elétrica que o atravessa, dependendo da resistividade do material da célula e dos seus contatos metálicos.

Ainda sobre a Figura 9, o parâmetro R_p representa as perdas por correntes parasitas. Em caso de sombreamento do módulo FV, a resistência R_p é um fator relevante, pois uma célula sombreada não produz corrente (I_s), e desta forma, as correntes produzidas por outras células em série passarão pela resistência R_p , gerando uma queda na tensão do módulo. Além disso, a passagem que corrente em R_p ocasionará aquecimento, e consequentemente dano à célula sombreada.

Considerando o circuito real da célula FV, a corrente na carga será dada pela Equação 5, em que a corrente que passa pela resistência R_p é considerada.

$$I = I_s - I_D - I_p \leftrightarrow I = I_s - I_0 \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) - \frac{V + R_s I}{R_p} \quad (5)$$

Em que:

$I \rightarrow$ Corrente da carga

$I_0 \rightarrow$ Corrente de saturação do diodo

$R_s \rightarrow$ Resistência referente às perdas por efeito Joule

$R_p \rightarrow$ Resistência referente às perdas por correntes parasitas

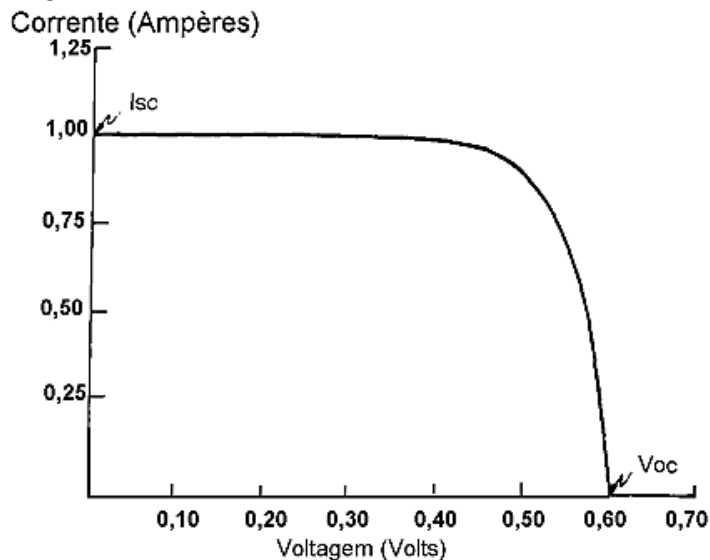
Conhecendo a equação da corrente elétrica produzida por uma célula FV, pode-se determinar as curvas e características elétricas dos módulos. Tais parâmetros serão mais bem explicados na seção 2.3.2.

2.3.2 Características Elétricas dos Painéis FV

As características elétricas dos painéis FV são definidas a partir das suas curvas características de corrente-tensão e corrente x potência, como ilustrado na Figura 10 e Figura 11, respectivamente.

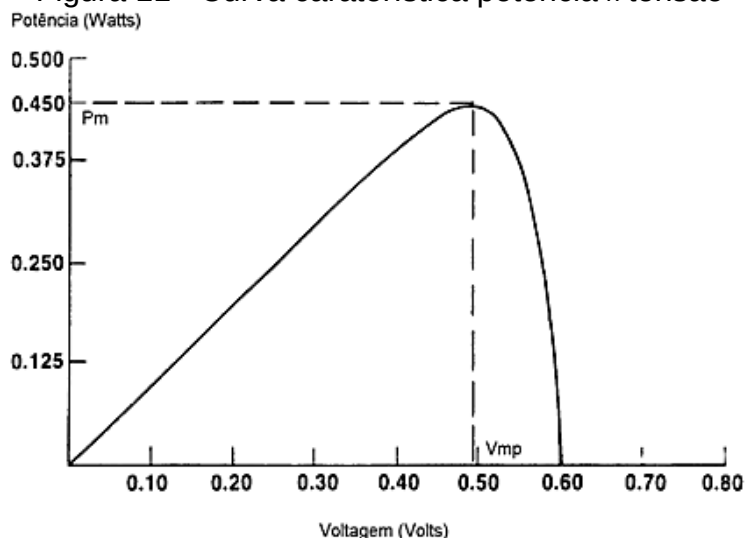
Estas curvas sofrerão alterações conforme haja variações na temperatura dos módulos e na radiação solar incidente nestes. A condição padrão para obtenção das curvas características é definida para radiação solar de 1000 W/m² e temperatura de 25 °C na célula (CRESEB, 2004).

Figura 10 – Curva característica corrente x tensão



Fonte: CRESEB, 2004

Figura 11 - Curva característica potência x tensão



Fonte: CRESEB, 2004

A curva ilustrada na Figura 10 é obtida conectando-se um multímetro ao circuito do painel FV com carga e são feitas medições de corrente e tensão. As medidas tomadas são plotadas em um gráfico, gerando a curva de tensão e corrente.

A Figura 10 ainda indica duas variáveis I_{sc} e V_{oc} , duas características importantes dos módulos FV. A corrente I_{sc} corresponde a corrente de curto circuito, medida quando os terminais do painel estão ligados diretamente, sem qualquer carga conectada entre eles, neste caso a tensão é zero. Já a tensão de circuito aberto V_{oc} , corresponde a tensão medida nos terminais do painel sem nenhuma carga conectada entre eles. Neste caso não haverá fluxo de corrente.

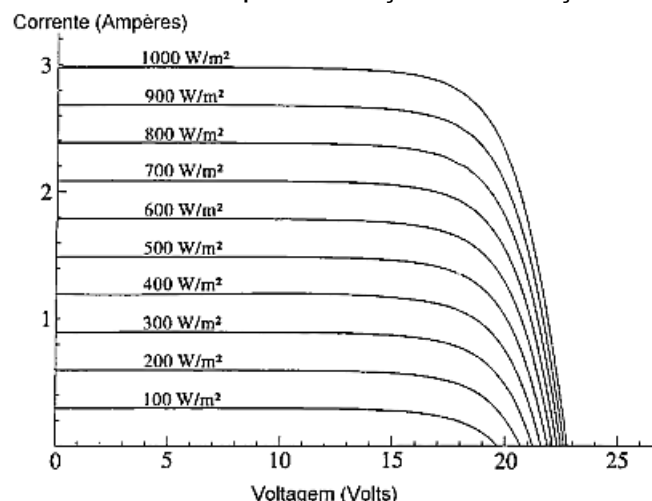
O produto de cada ponto da curva corrente $\times$ tensão representa a potência gerada para aquela condição de operação, de onde pode ser obtida a curva de tensão $\times$ potência ilustrada na Figura 11. Esta curva mostra que existe um ponto ótimo para obtenção da máxima potência do módulo, ou seja, existe somente uma tensão, e correspondente corrente, as quais podem gerar o máximo da capacidade do módulo. A potência máxima (P_m) é dada geralmente em watt pico (W_p), e é indicada nos dados de placa do módulo, acompanhado a tensão máxima (V_{mp}) e corrente máxima (I_{mp}) necessária para geração da potência de pico.

Em suma, as características elétricas dos painéis FV são cinco, a saber:

- Potência máxima (P_m)
- Tensão máxima (V_{mp})
- Corrente Máxima (I_{mp})
- Corrente de curto circuito (I_{sc})
- Tensão de circuito aberto (V_{oc})

É importante ressaltar que estas características podem ser influenciadas por condições ambientais, tal como supracitado, portanto então suscetíveis à variação de radiação incidente e temperatura dos módulos. A corrente gerada aumenta linearmente com o aumento da radiação incidente, portanto, quanto maior a radiação solar incidente, maior será a corrente gerada, como ilustra a Figura 12.

Figura 12 – Efeito causado pela variação da radiação solar incidente

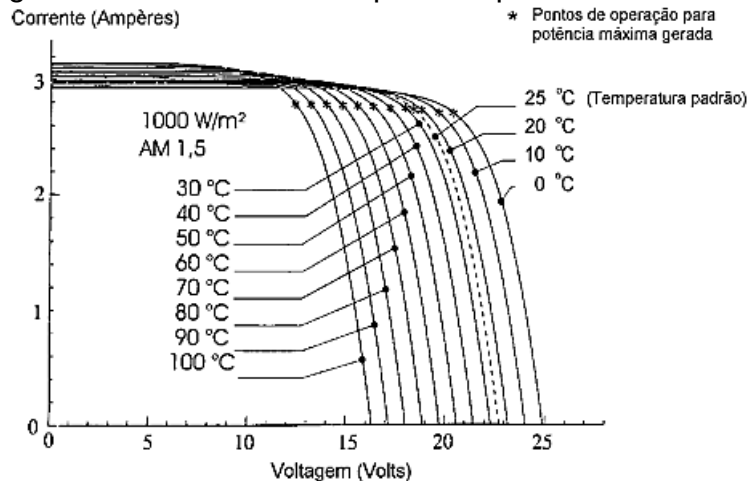


Fonte: CRESESB, 2006

Observa-se na Figura 12 o crescimento da corrente elétrica gerada no módulo FV, acompanhando o aumento da radiação incidente. Em contrapartida ao aumento da corrente, o aumento da temperatura, ocasionado pelo aumento da

radiação, faz com que a eficiência do módulo decresça, diminuindo assim os pontos de operação para a máxima potência gerada. A Figura 13 ilustra o decréscimo do rendimento com o aumento da temperatura do módulo.

Figura 13 – Efeito causado pela temperatura do módulo



Fonte: CRESEB, 2006

Analisando a Figura 13, observa-se que o aumento da temperatura causa diminuição da tensão e ligeira queda na corrente gerada no módulo FV. De um modo geral, a eficiência de um módulo pode ser encontrada de acordo com a Equação 6, considerando-se as condições ambiente as quais este está submetido.

$$\eta = \frac{P_m}{A \times I_c} \quad (6)$$

Em que:

η → eficiência do módulo

P_m → potência gerada no módulo

A → área útil do módulo

I_c → radiação solar incidente

A eficiência de um módulo FV ainda pode ser influenciada pelo tipo de semicondutor utilizado, bem como o seu processo de fabricação. A classificação dos módulos FV será discutida na seção 2.3.3.

2.3.3 Tipos de Módulos FV

Há dois tipos de materiais semicondutores mais empregados nas indústrias, a saber, o silício e o germânio. Embora o silício (0,7 V) apresente queda de tensão maior que a o germânio (0,3 V), na fabricação dos painéis FV é utilizado o silício, por ser o material mais abundante na Terra, de fácil extração, bem como

necessita de um comprimento de onda da luz de $1,15\mu\text{m}$, inferior ao do germânio que é de $1,8\mu\text{m}$ (CASTAÑEDA, 2011).

Sendo assim, pode-se classificar as células FV em três tipos, de acordo com seu processo de fabricação:

- Silício Monocristalino

As células são obtidas através do corte de barras cilíndricas de silício monocristalino, com espessura variando entre 0,4 e 0,5 mm. Sua eficiência de conversão é superior a 12% (CASTAÑEDA, 2011).

- Silício Policristalino

São células produzidas a partir de blocos de silício puro, fundidos em moldes especiais. Nesse processo formam-se estruturas policristalinas, com separação entre os cristais. Sua eficiência de conversão é um pouco inferior ao de silício monocristalino (CASTAÑEDA, 2011).

- Filmes finos

Seu processo de fabricação se dá por meio da deposição de finas camadas de material semicondutor, sob um substrato de baixo custo, como vidro, aço inoxidável ou plástico. Sua eficiência de conversão não ultrapassa 8% (CASTAÑEDA, 2011).

Os materiais semicondutores comercialmente produzidos e utilizados atualmente nessa tecnologia estão o Silício amorfo (a-Si), disseleneto de cobre e índio ou gálio (CIS, CIGS) e o telureto de cádmio (CdTe). É uma tecnologia de baixo custo, e deve ser utilizada em aplicações que não demandem muita energia.

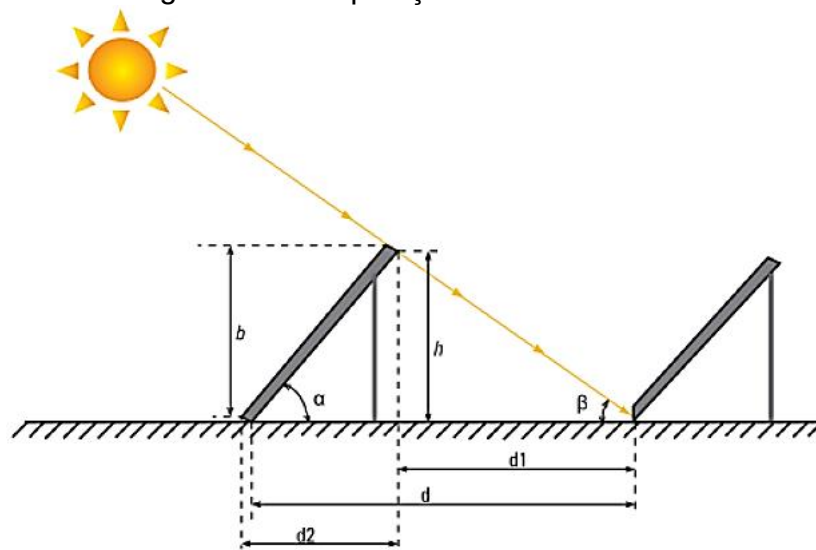
2.3.4 Sombreamento dos Painéis.

Ao instalar painéis FV é necessário levar em conta possíveis sombreamentos no painel, a fim de mantê-lo em bom funcionamento e extrair máxima eficiência na conversão. O sombreamento dos painéis FV é um fator que deve ser levado em consideração pois diminui a produção de energia elétrica, e nos casos de sistemas que utilizam o rastreamento do sol, pode desorientar os seguidores solares.

Para evitar o sombreamento dos painéis, deve-se considerar uma distância mínima entre os arranjos dos módulos, de maneira que uma estrutura não venha

a sombrear outra em nenhum momento do dia. Os painéis devem estar dispostos como ilustra a Figura 14 e Equação 7.

Figura 14 – Disposição dos módulos FV



Fonte: Cortez, 2012

$$d = b \times \left(\cos \beta + \frac{\sin \alpha}{\tan \beta} \right) \quad (7)$$

Em que:

- $\beta \rightarrow$ ângulo de altitude solar
- $\alpha \rightarrow$ inclinação dos painéis
- $d \rightarrow$ distância entre os arranjos dos painéis
- $b \rightarrow$ comprimento do painel

2.4 RASTREADORES SOLARES

Um rastreador solar é um dispositivo que segue o curso do sol de leste para oeste durante o dia. Rastreadores solares buscam manter os painéis (FV), ou arranjos de painéis, concentradores de energia, ou coletores solares orientados diretamente para os raios solares, regulando o ângulo entre o raio de incidência e o painel FV em 90° .

Desta forma, o uso de rastreadores solares aumenta a quantidade de energia solar incidente nos painéis, e conseqüentemente aumenta a eficiência do painel, bem como a energia elétrica gerada na saída. Esse tipo de dispositivo pode aumentar de 30 a 40% a produção de eletricidade (BOSE, 2011; SILVA, 2012),

variando conforme o local de instalação do sistema FV, e com o tipo de rastreador solar utilizado para controle de posição.

A classificação dos rastreadores solares será tratada mais detalhadamente na seção 2.5.

2.5 CLASSIFICAÇÃO DOS RASTREADORES SOLARES

Os rastreadores solares podem ser classificados em quatro tipos, a saber, quanto ao número de eixos rotativos, à estratégia de rastreamento, ao tipo de estrutura utilizada, e quanto ao tipo de controle. As seções 2.5.1 a 2.5.4 descrevem cada uma das classificações.

2.5.1 Número de eixos rotativos

Os dispositivos seguidores do sol podem ser de eixo simples ou de duplo, ou seja, um eixo ou dois eixos de rastreamento, respectivamente. Nos rastreadores de eixos simples, há movimentação dos painéis em apenas uma direção, seguindo o sol de leste para oeste, como mostra a Figura 15.

Figura 15 – Rastreador solar de eixo simples

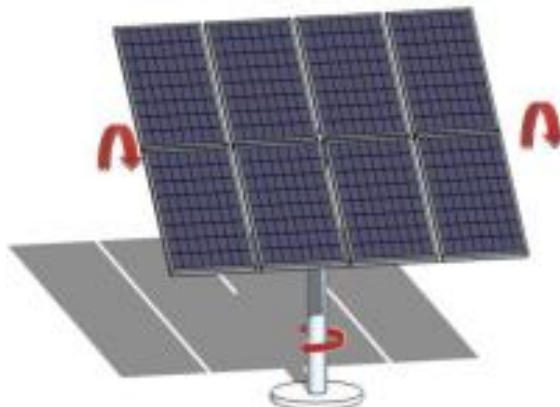


Fonte: SOLAR CHOICE, 2014

Esse tipo de rastreador apresenta menor custo e menor precisão. A eficiência desse tipo de configuração de eixo é maior em regiões equatoriais, onde a incidência de sol não varia significativamente com o movimento da terra em relação ao sol (DEEPTHI, *et. al.*, 2013).

Os rastreadores de eixo duplo apresentam dois eixos de movimentação, ou seja, estes dispositivos acompanham o curso do sol no sentido leste-oeste, bem como, acompanha a altura do sol no céu, como mostra a Figura 16.

Figura 16 – Rastreador solar de eixo duplo



Fonte: PINTO, *et. al.*, 2010

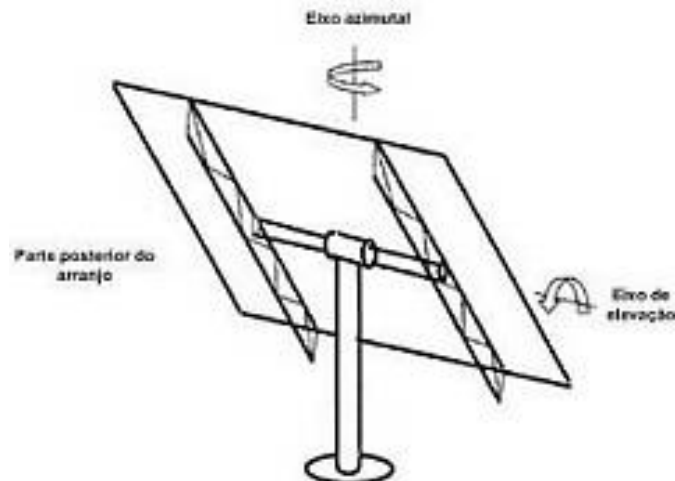
Desta forma, o rastreador solar consegue captar mais a luz solar, consequentemente aumentando a eficiência do painel fotovoltaico. Esse arranjo de eixos é mais complexo com relação à mecânica e controle de posição, além de apresentarem maior custo, embora sejam mais precisos. Pelo fato de haver movimentação em todos os sentidos, para o uso deste tipo de rastreador, é necessária maior área de terreno.

2.5.2 Estrutura de Suporte

Com relação às estruturas de suporte dos painéis fotovoltaicos, podem se classificar os rastreadores solares em três tipos, a saber, plataforma giratória, pedestal, e *roll-tilt*.

O seguidor do tipo pedestal é a estrutura mais simples, onde o próprio eixo gira a fim de dar movimento ao painel, conforme mostrado na Figura 17. Devido aos esforços mecânicos causados pelo vento necessitam de uma fundação, e uma caixa de engrenagens mais robusta (PINTO, *et. al.*, 2010).

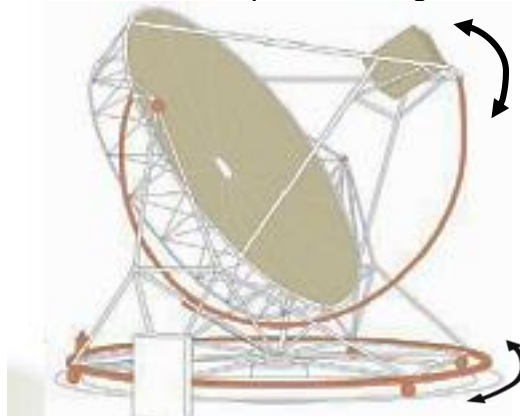
Figura 17 – Estrutura de suporte tipo pedestal



Fonte: PINTO, *et. al.*, 2010

A estrutura de plataforma giratória movimenta-se no eixo horizontal através da sua base. É geralmente utilizada em concentradores solares, por serem sistemas de grande porte como mostra a Figura 18.

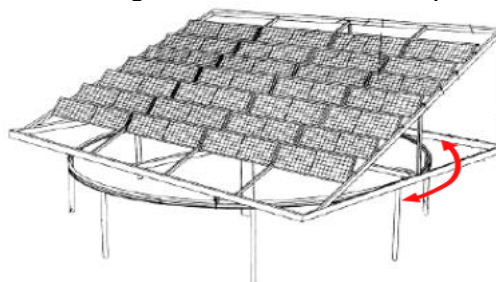
Figura 18 – Estrutura de plataforma giratória



Fonte: PINTO, *et. al.*, 2010

Entretanto, podem ser utilizadas também para suporte de grandes arranjos de painéis fotovoltaicos, ilustrado na Figura 19.

Figura 19 – Estrutura de base giratória utilizada em painéis fotovoltaicos

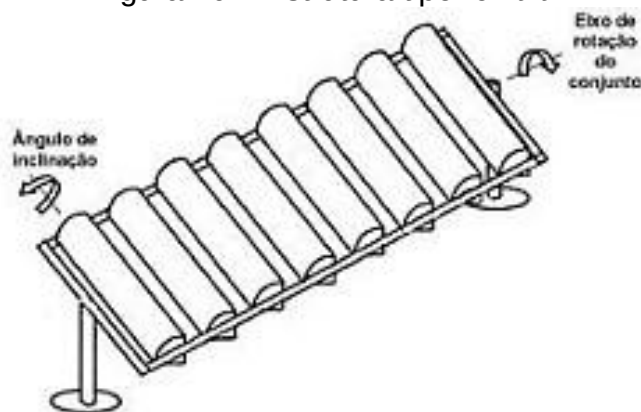


Fonte: ARGESSEANU, *et. al.*, 2010

O seguidor solar com estrutura *roll-tilt*, orienta um conjunto de painéis fotovoltaicos, como mostra a Figura 20. Este dispositivo movimenta o arranjo na

direção norte-sul, e separadamente em cada painel há o controle na direção leste-oeste.

Figura 20 – Estrutura tipo *roll-tilt*



Fonte: PINTO, *et. al.*, 2010

2.5.3 Tipo de controle

O controle dos seguidores solares pode ser classificado em três tipos: passivos, eletro-ópticos e microprocessados. Seguidores passivos utilizam controle mecânico, enquanto os outros dois tipos funcionam através de dispositivos eletrônicos e são conhecidos como rastreadores ativos.

2.5.3.1 Controle passivo

No controle passivo, o sistema consiste na movimentação do painel solar ao longo do dia sem nenhuma fonte externa de energia, utilizando apenas a radiação solar e a movimentação mecânica do painel (CANSTAÑEDA, 2011). Esse sistema é composto por dois vasos cilíndricos, contendo fluido internamente, mantido sob certa pressão, e posicionados nos extremos do painel fotovoltaico com distâncias iguais ao eixo.

O painel inicia seu ciclo voltado para o oeste, direção do nascer do sol, e conforme haja transferência de calor entre os raios solares e o fluido contido nos cilindros, o painel começa a se movimentar. Desta forma, o painel sempre seguirá a luz do sol, que será a fonte de calor para as trocas com o fluido dos cilindros. A velocidade do movimento é limitada por um sistema de amortecedores.

2.5.3.2 Controle eletro-óptico

O rastreador com controle eletro-óptico o posicionamento do conjunto é baseado em sensores ópticos como fototransistor, fotodiodo, LDR (resistores dependentes de luz), e células fotovoltaicas. É instalado um par de sensores ópticos, separados entre si por uma parede, assim, só haverá movimentação do painel quando houver incidência de luz solar igual em ambos os sensores. O deslocamento é feito através de um motor DC, alimentado pela energia gerada no próprio painel fotovoltaico. Esse tipo de controle apresenta desvantagem em dias nublados, pois na falta de luminosidade suficiente, o sistema pode não se posicionar corretamente.

2.5.3.3 Controle microprocessado

O controle microprocessado é feito através de um microcontrolador, programado com um algoritmo matemático para prever a movimentação do sol. A movimentação também é feita através de um motor DC alimentado pelo próprio painel solar. É um controle sofisticado, podendo controlar várias estruturas ao mesmo tempo, e são utilizados em sistemas que requerem alta precisão, como concentradores solares (OLIVEIRA, 2008).

2.5.4 Estratégia de Rastreamento

A estratégia de rastreamento da luz solar depende do número de eixos existentes no painel. Para sistemas de um eixo, existe o rastreamento polar, azimutal e horizontal. Já para os sistemas de dois eixos, há duas possibilidades de rastreamento, a saber, polar equatorial, azimutal/elevação (PINTO, *et. al.*, 2010).

2.5.4.1 Rastreador Polar

O seguidor solar polar tem o plano girando sobre o eixo norte-sul, inclinado na latitude local, tendo seu eixo posicionado paralelamente ao eixo da Terra (PINTO, *et. al.*, 2010), como ilustra a Figura 21.

Figura 21 – Rastreador polar

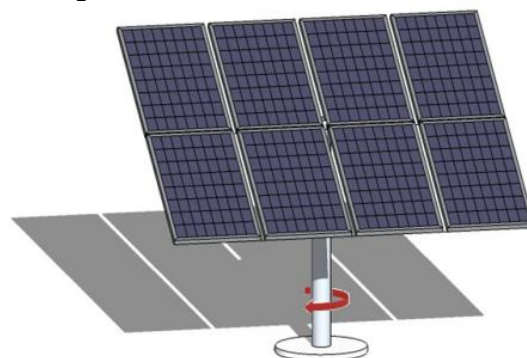


Fonte: PINTO, *et. al.*, 2010

2.5.4.2 Rastreador Azimutal

Esse seguidor tem seu sentido de movimentação no eixo vertical, no sentido leste-oeste, como mostra a Figura 22. Esse tipo de estratégia tem um bom desempenho em latitudes e estações do ano onde os dias são longos o ajuste da inclinação dos painéis é feito manualmente ao longo do ano (OLIVEIRA, 2008).

Figura 22 – Rastreador azimutal

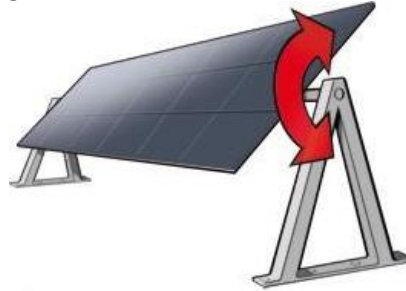


Fonte: PINTO, *et. al.*, 2010

2.5.4.3 Rastreador Horizontal

O rastreador horizontal pode apresentar orientação sul-norte ou leste-oeste, dependendo da configuração, e tem como plano de orientação o horizontal, como ilustra a Figura 23. Esse tipo de estratégia de rastreamento é utilizada em concentradores solares, bem como painéis fotovoltaicos.

Figura 23 - Rastreador Horizontal

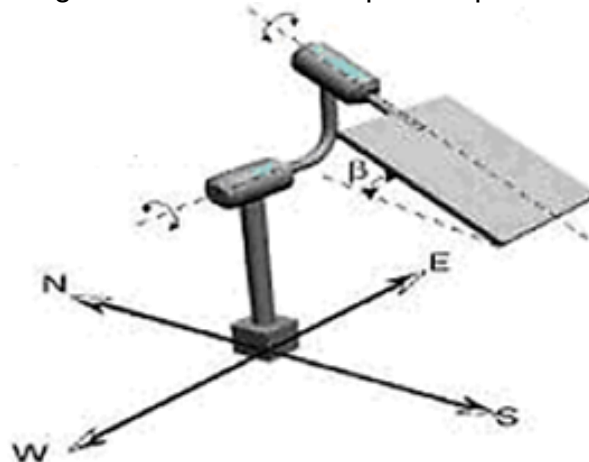


Fonte: PINTO, *et. al.*, 2010

2.5.4.4 Rastreador Polar Equatorial

Esse tipo de estratégia de rastreamento permite máxima absorção de energia possível, porém a um custo mais elevado em relação às outras configurações. Nesse tipo de estrutura, um eixo é inclinado de acordo com a latitude local, e o ângulo de seguimento acompanha o ângulo horário. O outro eixo gira junto com o ângulo de declinação solar (PINTO, *et. al.*, 2010). A Figura 24 ilustra o posicionamento do rastreador polar equatorial.

Figura 24 – Rastreador polar equatorial



Fonte: PINTO, *et. al.*, 2010

2.5.4.5 Rastreador Azimutal/Elevação

Nesse tipo de estratégia de rastreamento há movimentação nos dois eixos, e possui características bastante semelhantes ao rastreador polar equatorial. A principal diferença entre as duas configurações é que o eixo de rotação no sentido leste-oeste é o eixo vertical, como mostra a Figura 25. Portanto, permite coletar o máximo de energia possível, embora ocupe uma área maior de terreno para não causar sombreamento nas adjacências.

Figura 25 – Rastreador azimutal/elevação



Fonte: PINTO, et. al., 2010

2.6 ESTADO DA ARTE EM RASTREADORES SOLARES

A energia solar fotovoltaica é uma fonte renovável, que pode vir a suprir as demandas necessárias de aumento da produção de energia elétrica, bem como diversificação da matriz energética brasileira. Porém, atualmente tem participação pouco expressiva na geração centralizada. Um dos principais entraves encontrados a popularização desta fonte de energia é o seu alto custo de geração frente a outras fontes, como por exemplo, a energia hidráulica e eólica.

Diante da necessidade de tornar a energia fotovoltaica mais competitiva, atualmente existem no Mundo e no Brasil, diversas pesquisas com o propósito de aumentar o rendimento e eficiência dos painéis fotovoltaicos através do uso de tecnologias de rastreamento solar. Algumas dessas tecnologias foram elencadas, a fim de situar a pesquisa proposta no âmbito mundial e nacional.

2.6.1 Mundo

A pesquisa desenvolvida por Mousazadeh, *et. al.*, (2009) revisou os principais métodos de rastreamento solar, com relação a número de eixos, estratégia de rastreamento e tipo de controle. E a partir da análise de trabalhos desenvolvidos com rastreador, determina o qual apresenta melhor eficiência. Neste artigo, a melhor eficiência apontada foi para o rastreador polar e o azimutal.

O trabalho realizado por Catarius & Christiner (2010) descreveu o projeto e montagem de um rastreador solar de dois eixos, instalado na cidade de Worcester/US, bem como testa e analisa a sua funcionalidade. A pesquisa ainda comparou a eficiência do seu rastreador de dois eixos, com outros sistemas com movimentação em apenas um eixo, e um sistema fixo. A comparação mostrou um ganho de 49% na produção de energia de um sistema com movimentação em dois eixos e um sistema fixo.

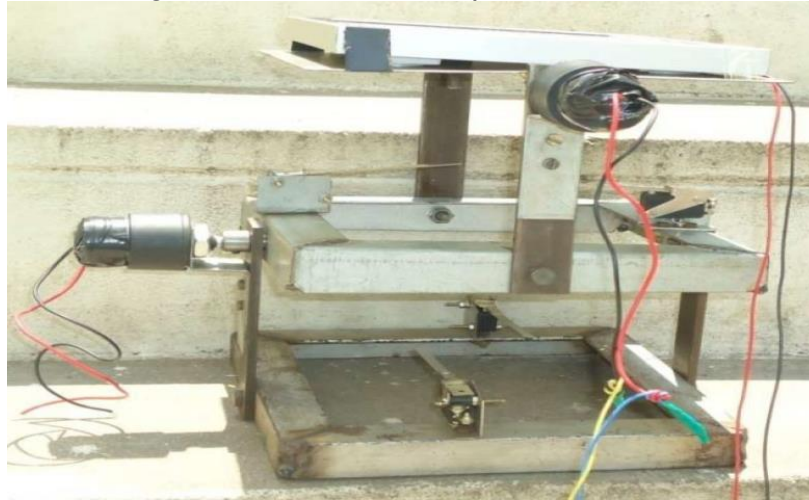
Outra pesquisa relevante na área de rastreadores solares foi desenvolvida por Cortez (2012), onde foi projetado um rastreador solar através do uso da plataforma Arduino®, utilizando para o sensoriamento de a luz solar fotodiodos. Este trabalho foi desenvolvido na cidade de Porto em Portugal, e propôs uma alternativa para rastreamento do sol da empresa JPM, que originalmente utiliza Controlador Lógico Programável (CLP) como dispositivo de controle do posicionamento dos painéis. O rastreador proposto controlou a movimentação em um eixo, e a eficiência dos painéis controlados, comparada à de painéis fixos, apresentou um ganho de em média 10% na produção de energia elétrica.

Na pesquisa de Silva (2012), comparou-se o desempenho de um painel solar fotovoltaico fixo e um móvel, instalados na cidade de Braga, Portugal. O sistema móvel apresentou movimentação em apenas um eixo, e o controle de rastreio é feito através de um sistema astronômico, ou seja, o sistema prevê a movimentação do sol. O aumento da produção de energia no sistema móvel pode chegar até 60% se comparado como o sistema fixo.

O trabalho desenvolvido por Dhanabal, *et. al.*, (2013) comparou o desempenho de rastreador de eixo simples, e um painel fixo, bem como, de um rastreador de eixo duplo com um painel fixo, instalados na Índia Para controle do sistema é utilizado um microcontrolador, e como sensores de luz são utilizados LDR's (Light Dependent Resistors). Para o caso do rastreador solar de eixo

simples comparado ao painel fixo, o ganho na produção de energia foi de aproximadamente 32%, enquanto que para o rastreador de eixo duplo, mostrado na Figura 26, foi de aproximadamente 82%.

Figura 26 – Seguidor solar de eixo duplo de Dhanabal, *et. al.*, 2013



Fonte: Dhanabal, *et. al.*, 2013

2.6.2 Brasil

Assim como no restante do mundo, no Brasil vem sendo desenvolvidas pesquisas com rastreadores solares. No trabalho desenvolvido por Tessaro, *et. al.*, (2005) foi analisado o desempenho de um painel fotovoltaico acoplado a um rastreador solar, instalado na cidade de Cascavél-PR. O sistema de rastreamento tem movimentação em um eixo, e foi comparado o seu desempenho com um sistema fotovoltaico fixo. Os resultados apresentaram um ganho de aproximadamente 20% do sistema com rastreamento em comparação com a energia gerada pelo sistema fixo.

Monteiro (2007), desenvolveu um sistema de controle de baixo custo para rastreamento solar com movimentação em um eixo, instalado na cidade de Recife/Pe. O sistema é composto por sensores, circuito de controle e circuito de acionamento do motor de passo. Este projeto não utiliza *softwares*, e portanto, diferencia-se da maioria dos rastreadores solares. O circuito de controle foi desenvolvido utilizando apenas componentes eletrônicos, como circuitos integrados (CI's), resistores, capacitores, amplificadores operacionais, dentre outros componentes. O resultado experimental apresentou um ganho de em

média 36% da geração de energia pelo sistema com movimentação em um eixo e um sistema fixo.

A pesquisa realizada por Alves (2008), desenvolveu um sistema de posicionamento automático para painéis fotovoltaicos, na cidade de Bauru/SP, como mostrado na Figura 27. O trabalho compara o rendimento de um sistema fixo e um sistema móvel de dois eixos. O centro do experimento está no Controlador Lógico Programável (CLP), que controla o sistema móvel e também coleta e armazena os dados dos sensores. Os resultados mostraram um ganho de aproximadamente 45% do sistema móvel em relação ao sistema fixo.

Figura 27 – Sistema de painéis fotovoltaicos analisados em Alves, 2008



Fonte: Alves, 2008

O trabalho de Oliveira (2008), analisou o desempenho de um rastreador solar do tipo azimutal, ou seja, com movimentação no eixo vertical, de leste para oeste, instalado na cidade de Porto Alegre/RS. O sistema de controle foi feito através de microcontrolador programável, e o rendimento do painel móvel foi comparado ao rendimento de um painel fixo. A análise concluiu que houve um ganho de 24% do painel com seguidor em relação ao painel fixo.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente Capítulo caracteriza a pesquisa realizada, de acordo com a sua metodologia empregada, bem como o local de instalação, e ainda trata dos materiais e meios utilizados em seu desenvolvimento.

3.1 METODOLOGIA DA PESQUISA

A metodologia adotada para realização da pesquisa baseia-se na comparação de desempenho de um sistema fotovoltaico com angulação fixa, e um sistema móvel. Fazendo uso de um rastreador solar para o sistema com mobilidade, procura-se demonstrar a maior eficiência do sistema com seguimento, e sua viabilidade de instalação.

O desenvolvimento da pesquisa foi realizado em duas etapas. A primeira delas refere-se ao levantamento bibliográfico sobre estado da arte dos rastreadores solares, sobretudo no que diz respeito aos tipos de rastreadores solares existentes, e as pesquisas desenvolvidas nessa área.

A partir disso foi possível desenvolver a segunda etapa do trabalho, referente à montagem do sistema proposto para análise. Primeiramente foi determinado o tipo de controlador a ser utilizado, os sensores de medição de tensão, corrente, intensidade luminosa e temperatura. Definidos os componentes de leitura de dados, foi escolhido então o sistema de aquisição de dados, e por fim, as estruturas para ambos os sistemas, fixo e móvel.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL

A pesquisa foi desenvolvida no campus central da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), na cidade de Mossoró/RN. O município está situado na região do semiárido nordestino, com localização geográfica definida pelas coordenadas geográficas de 5° 11' Latitude Sul (S) e 37° 20' Longitude Oeste (W), a uma altitude de 18 m acima do nível do mar.

O clima do município é classificado como seco, muito quente e com estação chuvosa no verão, apresentando temperatura anual média de 27,4 °C, precipitação pluviométrica média de 673,9 mm, e umidade relativa do ar média de 68,9% (NUNES, 2012).

O índice médio de radiação solar anual de Mossoró é de 5,23 kWh/m².dia, apresentado juntamente com as médias mensais na Tabela 1.

Tabela 1 – Média de radiação solar

MÊS	MÉDIA (kWh/m².dia)
Janeiro	5,6
Fevereiro	5,6
Março	5,04
Abril	4,48
Maio	4,48
Junho	4,48
Julho	4,48
Agosto	5,6
Setembro	5,6
Outubro	6,16
Novembro	5,6
Dezembro	5,6
Média Anual	5,23

Fonte: Tiba, 2000

A Tabela 2 mostra as horas de insolação diária média para todos os meses do ano, e a média anual, para a cidade de Mossoró.

Tabela 2 – Insolação diária média (horas)

MÊS	MÉDIA (horas)
Janeiro	8
Fevereiro	7
Março	6
Abril	6
Maio	7
Junho	7
Julho	7
Agosto	8
Setembro	8
Outubro	8
Novembro	9
Dezembro	8
Média Anual	7,42

Fonte: Tiba, 2000

Devido à proximidade da cidade de Mossoró com a linha do equador, ou seja, uma região de baixa latitude, não há grandes variações da posição do sol ao longo do ano, ou nas horas de sol diárias.

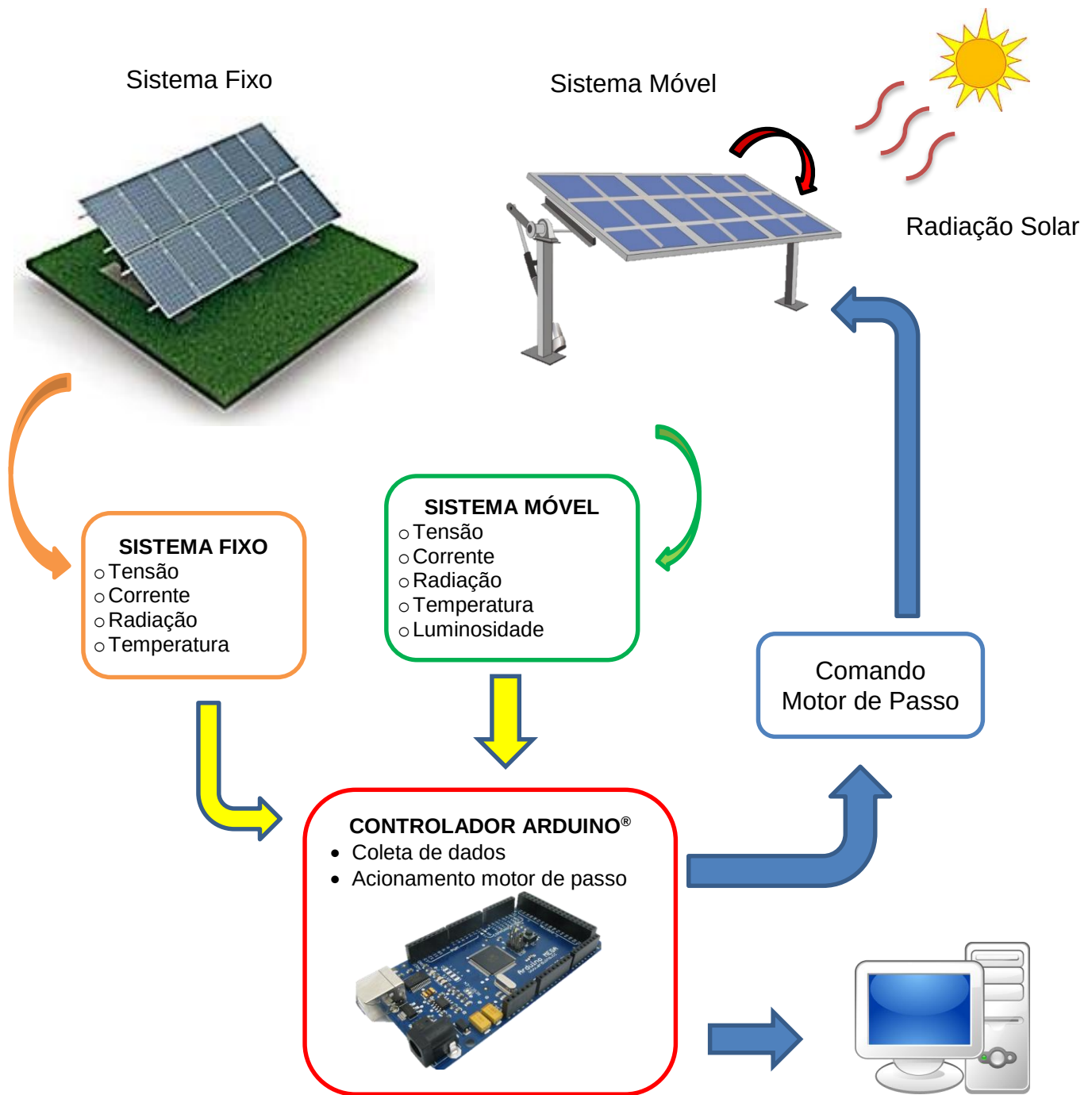
3.3 CARACTERIZAÇÃO DOS SISTEMAS

O trabalho propõe desenvolver e analisar dois sistemas FV distintos, conforme supramencionado, o primeiro deles um painel solar fixo, e o outro com mecanismo de rastreamento do sol com mobilidade em um eixo. A Figura 28 esquematiza os dois sistemas montados e analisados. Ambos os sistemas coletam dados referentes às análises, como corrente e tensão geradas, temperatura dos painéis e radiação solar incidente. Os dados coletados são enviados ao controlador, neste caso utiliza-se uma plataforma Arduino®, armazenados e enviados a um computador para posterior análise.

Para o caso do sistema com rastreamento, o controlador recebe ainda informações da intensidade luminosa incidente nos painéis. Caso o controlador identifique que a captação da energia solar nos painéis não está sendo máxima, este envia um sinal de comando ao motor de passo instalado na estrutura. O motor movimenta o sistema até que os sensores identifiquem a intensidade luminosa necessária para melhor rendimento do painel.

O controlador ainda recebe dados do ambiente, como temperatura e umidade relativa do ar, os quais também serão armazenados e enviados a um computador.

Figura 28 - Esquemática dos sistemas analisados

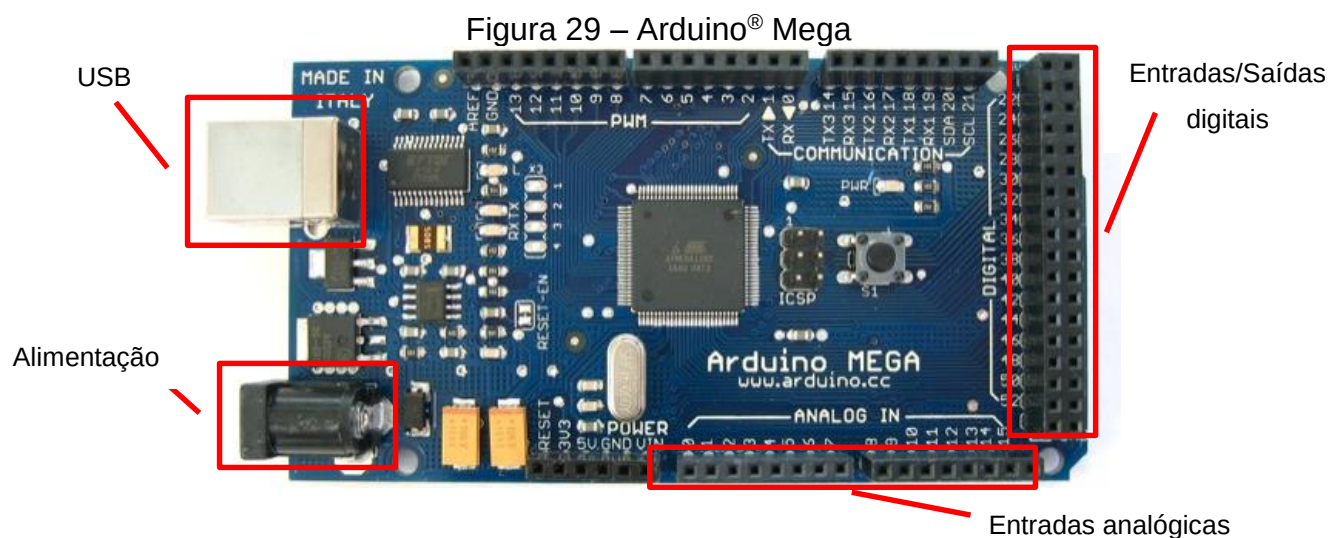


Fonte: Elaboração Própria

Maiores detalhes dos componentes do sistema serão tratados nas seções 3.3.1 a 3.3.8.

3.3.1 Arduino® Mega

O controlador utilizado para automação dos sistemas fotovoltaicos analisados foi uma plataforma microcontrolada Arduino® Mega, ilustrado na Figura 29.



A alimentação da placa pode ser feita através de um adaptador AC-DC, ou ainda pela entrada USB, a qual também pode também ser usada para comunicação com computador. As características básicas da placa estão descritas na Tabela 3.

Tabela 3 – Características do Arduino® Mega

ARDUINO® MEGA	
Microcontrolador	ATmega2560
Tensão de operação	5 V
Tensão de entrada (recomendada)	7-12 V
Tensão de entrada (limite)	6-20 V
Pinos digitais de entrada/saída	54 (15 pode usar saída PWM)
Pinos de entrada analógica	16
Corrente contínua por pino de entrada/saída	40 mA
Corrente contínua para pino de 3,3 V	50 mA
Memória <i>flash</i>	256 KB
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Velocidade do <i>clock</i>	16 MHz

Fonte: Arduino, 2013

O Arduino® Mega conta com 54 pinos digitais, que podem ser usados tanto com entrada, como saída, com tensão de operação de 5 V. O microcontrolador

ATmega2560 possui 256 KB de memória *flash* para armazenamento de código, e a programação da placa é feita através da linguagem própria e do software Arduino®, assim como qualquer outra plataforma do fabricante.

O controlador deve receber dados coletados pelos sensores do sistema, e executar uma ação programada. Estes sensores serão tratados com maiores detalhes na seção 3.3.2.

3.3.2 Sensores

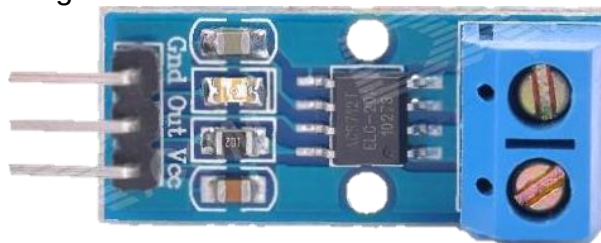
Os sensores são os dispositivos responsáveis pela coleta de dados do sistema. Neste caso as variáveis de medição são: corrente; tensão; temperatura dos módulos; radiação solar; e a intensidade luminosa para posicionamento dos painéis.

A caracterização destes sensores será detalhada nas subseções 3.3.2.1 ao 3.3.2.5.

3.3.2.1 Medição de Corrente

A medição de corrente é feita através do sensor ACS712ELC-30A, ilustrado na Figura 30. Sua alimentação é feita através da placa do controlador, com tensão de entrada de 5 V. Foram instalados dois sensores de corrente, um para cada painel fotovoltaico, com o objetivo de medir a corrente gerada pelos sistemas.

Figura 30 – Módulo sensor de corrente



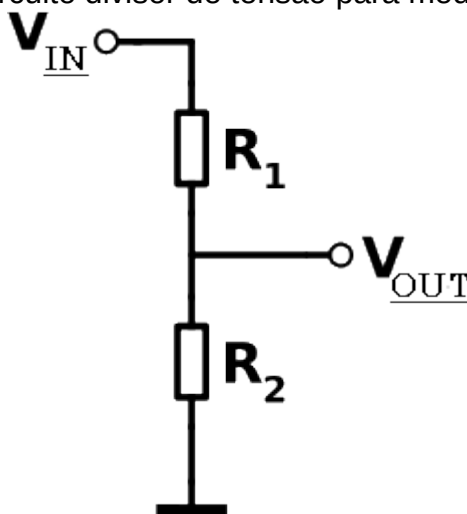
Fonte: Elaboração própria

O sensor pode medir correntes alternadas ou contínuas de até 30 A, e fornece uma tensão de saída proporcional à corrente medida. A proporção da saída analógica para este módulo sensor é de 66 mV/A.

3.3.2.2 Medição de Tensão

A medição de tensão é feita através de um circuito simples de divisor de tensão, ilustrado na Figura 31. A tensão de entrada V_{in} é a tensão gerada no módulo fotovoltaico. Para que o Arduino® seja capaz de fazer a leitura, o divisor de tensão diminuirá a tensão de saída V_{out} de modo que esta seja no máximo 5 V, referentes a tensão de operação de uma entrada do controlador, já tratado na seção 3.3.1.

Figura 31 – Circuito divisor de tensão para medição de tensão



Fonte: Elaboração própria

O sinal de tensão V_{out} será lido pelo controlador, e calculado o valor de tensão real dado pela Equação 8

$$V_{out} = \frac{V_{in} \times R_2}{R_1 + R_2} \quad (8)$$

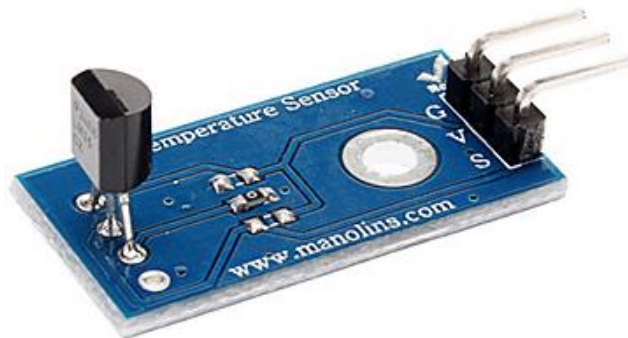
A tensão máxima de entrada V_{in} , corresponde à tensão de circuito aberto V_{oc} , para o módulo utilizado no projeto é de 21,4 V, e a tensão máxima V_{out} que a placa microcontrolada recebe é 5 V. Portanto, os resistores R_1 e R_2 devem ter valores respectivamente de 33 k Ω e 10 k Ω .

3.3.2.3 Medição de Temperatura dos Módulos

A temperatura dos módulos fotovoltaicos é um fator que pode influenciar a produção de energia elétrica nos painéis, portanto é uma variável que deve ser

monitorada. Para o caso do estudo em questão foi utilizado um sensor de temperatura LM35, ilustrado na Figura 32.

Figura 32 – Sensor de Temperatura LM35



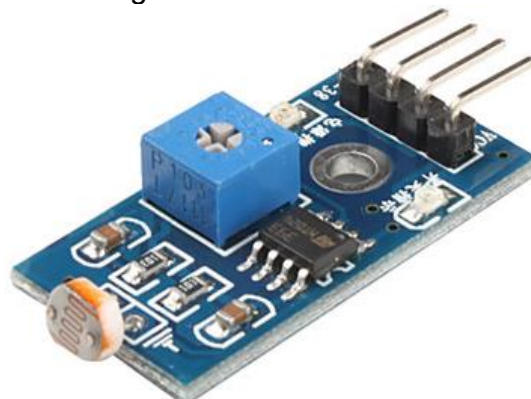
Fonte: Elaboração própria

O sensor envia um sinal de leitura, cuja tensão de saída é linearmente proporcional à temperatura em graus Celsius. O fator de escala é de 10 mV/°C, com precisão garantida de 0,5°C.

3.3.2.4 Medição de Radiação Solar

A medição de radiação solar foi feita baseado no medidor de radiação solar, desenvolvido por Santiago (2014). O sistema de medição de radiação solar utiliza a própria plataforma microcontrolada Arduino® Mega, empregando um sensor LDR (*Light dependent resistor*), ilustrado na Figura 33, também chamado de célula fotoresistiva, ou ainda fotoresistência.

Figura 33 – Sensor LDR



Fonte: Elaboração própria

É um dispositivo semiconductor, cuja resistência varia de forma linear com a intensidade luminosa incidente. Este dispositivo diminui sua resistência ao ser iluminado, e aumenta conforme decresça a iluminação.

Segundo o trabalho desenvolvido por Santiago (2014), a equação que converte o valor lido na porta do Arduino® para radiação solar em W/m² pode ser visualizada na Equação 9.

$$Rad = 4464,9 \times e^{-17,73 \times V_{saída}} \quad (9)$$

Em que:

Rad → Radiação Solar

V_{saída} → Tensão de saída lida pelo Arduino®

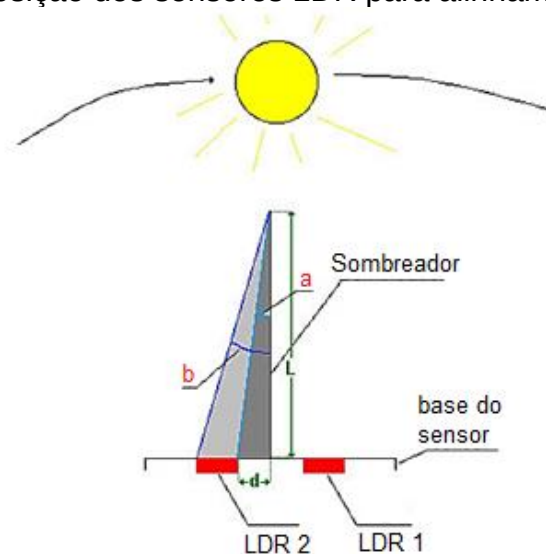
Foi utilizado um sensor LDR dedicado à medição de radiação solar, e a leitura realizada pelo sensor será enviada ao controlador, e a Equação 9, inserida nas linhas de comando do controlador, fará a conversão do valor lido para da radiação solar em W/m².

3.3.2.5 Medição de Intensidade Luminosa para Posicionamento

A orientação da posição do painel fotovoltaico do sistema estudado é feita através de um par de sensores LDR, anteriormente ilustrado e mencionado na subseção 3.3.2.4.

Os sensores LDR foram instalados aos pares, separados por um anteparo, semelhante ao ilustrado na Figura 34.

Figura 34 – Disposição dos sensores LDR para alinhamento da estrutura



Fonte: Monteiro, 2007

Conforme mostra a Figura 34, o sensor LDR 2 fica sombreado pelo anteparo sombreador, enquanto o LDR 1 permanece iluminado pelo sol. O circuito

de controle percebe essa condição e envia sinal de acionamento do motor de passo, até que ambos os LDR's estejam iluminados de maneira uniforme.

O ângulo "a" corresponde à posição em que os sensores estão igualmente iluminados, e depende da distância entre os LDR's e do comprimento do anteparo. Então tem-se o ângulo "a" é dado pela Equação 10, em que "d" é a distância entre o sensor e o sombreador, e L é a altura deste.

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{d}{L} \quad (10)$$

O ângulo "b" representado da Figura 34, corresponde ao ângulo em que o LDR 2 fica completamente sombreado.

O par de sensores para orientação utilizado na presente pesquisa está ilustrado na Figura 35. As dimensões do dispositivo são de 5 x 3 cm, estando o sombreador localizado exatamente no centro com altura de 5 cm. Os sensores foram devidamente instalados no módulo FV móvel, e protegidos envoltos numa caixa de acrílico, e por uma pequena lâmina do mesmo material na sua superfície.

Figura 35 – Sensor de posicionamento utilizado no painel FV móvel

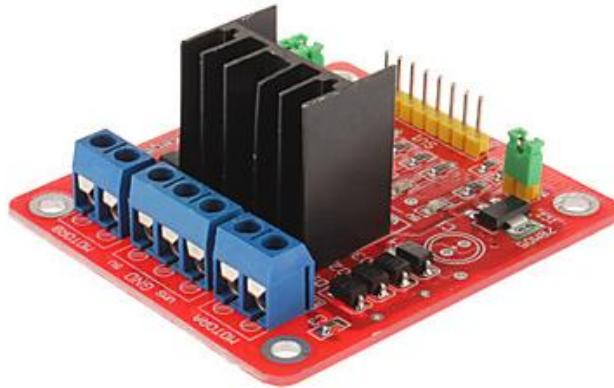


Fonte: Elaboração própria

3.3.3 Motor de Passo

O motor de passo utilizado no sistema é o HT23-397 do fabricante Kalatec Automação Ltda. As características básicas do equipamento são: ângulo de passo é de $1,8^\circ$; corrente máxima é de 2A; e torque máximo de 1,25 N.m. O acionamento do motor é feito por um *driver* L298N para motor de passo, ilustrado na Figura 36.

Figura 36 – *Driver* motor de passo



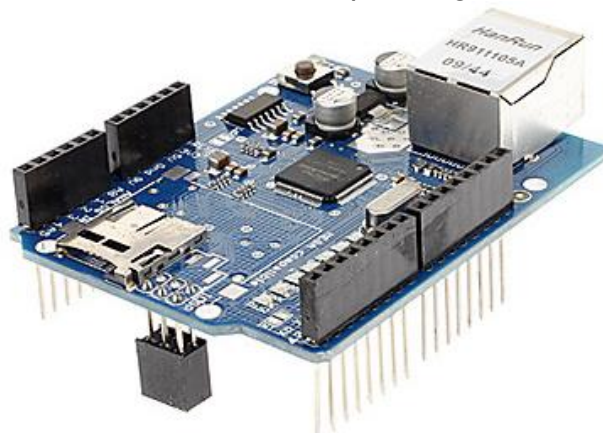
Fonte: Elaboração Própria

O *driver* recebe o sinal de acionamento do microcontrolador, e pode acionar até dois motores de passo de 5 a 35 V em tensão contínua, impulsionada por uma corrente de no máximo 2A, fornecendo um sinal de saída de 5 V.

3.3.4 Sistema de Registro de Dados

O registro dos dados coletados pelos sensores é realizado através de um *ethernet shield*, baseado no *chip* wiznet w5100, com suporte para cartão de memória, ilustrado na Figura 37.

Figura 37 – *Ethernet Shield* para registro de dados



Fonte: Elaboração Própria

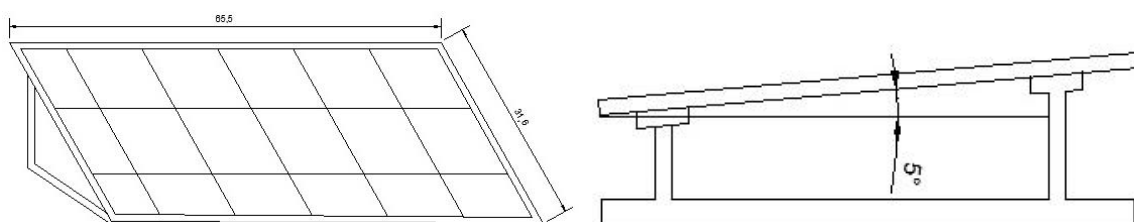
O *shield* mostrado na Figura 37 foi acoplado ao microcontrolador Arduino® Mega, registra os dados em cartão de memória para posterior análise, bem como permite o acesso do arquivo salvo no cartão via *ethernet*.

3.3.5 Estruturas

A estrutura utilizada para o sistema móvel, foi projetada para instalação em qualquer área do terreno, a fim de que nos dias de observação do experimento, encontre-se a melhor localização para instalação permanente do sistema. O projeto das estruturas encontra-se no ANEXO I. A estrutura foi confeccionada, de modo que haja mobilidade nos dois eixos, visando futuros estudos.

Com relação ao sistema estático, a estrutura foi projetada de forma mais simples e está ilustrada na Figura 38. Não há mobilidade, e obedece somente à inclinação mínima igual a latitude local, de 5°.

Figura 38 – Desenho de estrutura estática



Fonte: Elaboração própria

3.3.6 Módulo Fotovoltaico

O painel fotovoltaico utilizado nos dois sistemas analisados é o modelo STP020S-12/Cb do fabricante Suntech. As características elétricas do módulo estão descritas na Tabela 4.

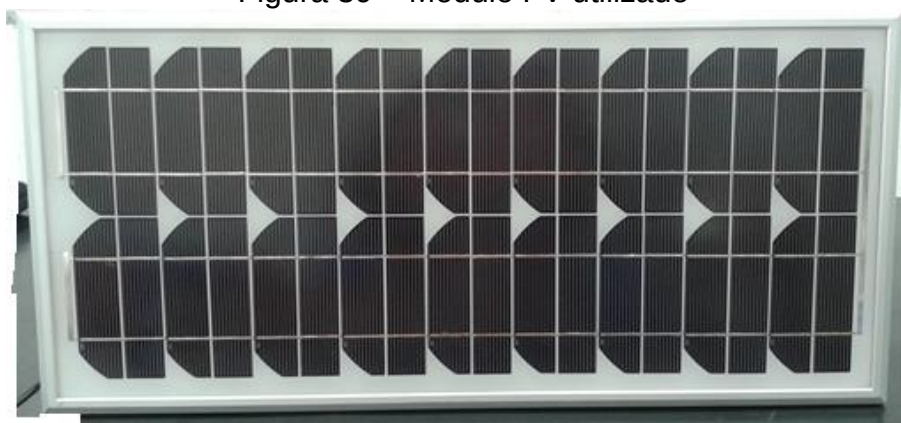
Tabela 4 – Características elétricas do módulo FV utilizado

Potência Máxima ($P_{\text{máx}}$)	20 Wp ¹
Corrente na Potência Máxima (I_{mp})	1,19 A
Tensão na Potência Máxima (V_{mp})	16,8 V
Corrente de Curto Circuito (I_{sc})	1,21 A
Tensão de Circuito Aberto (V_{oc})	21,4 V
Temperatura nominal de operação da célula	50 °C
Rendimento	10%

Fonte: Elaboração própria

A tecnologia das células que compõem o módulo é de silício monocristalino, com dimensões de 656x306x18 mm e massa de 2,5 kg, ilustrado na Figura 39.

Figura 39 – Módulo FV utilizado



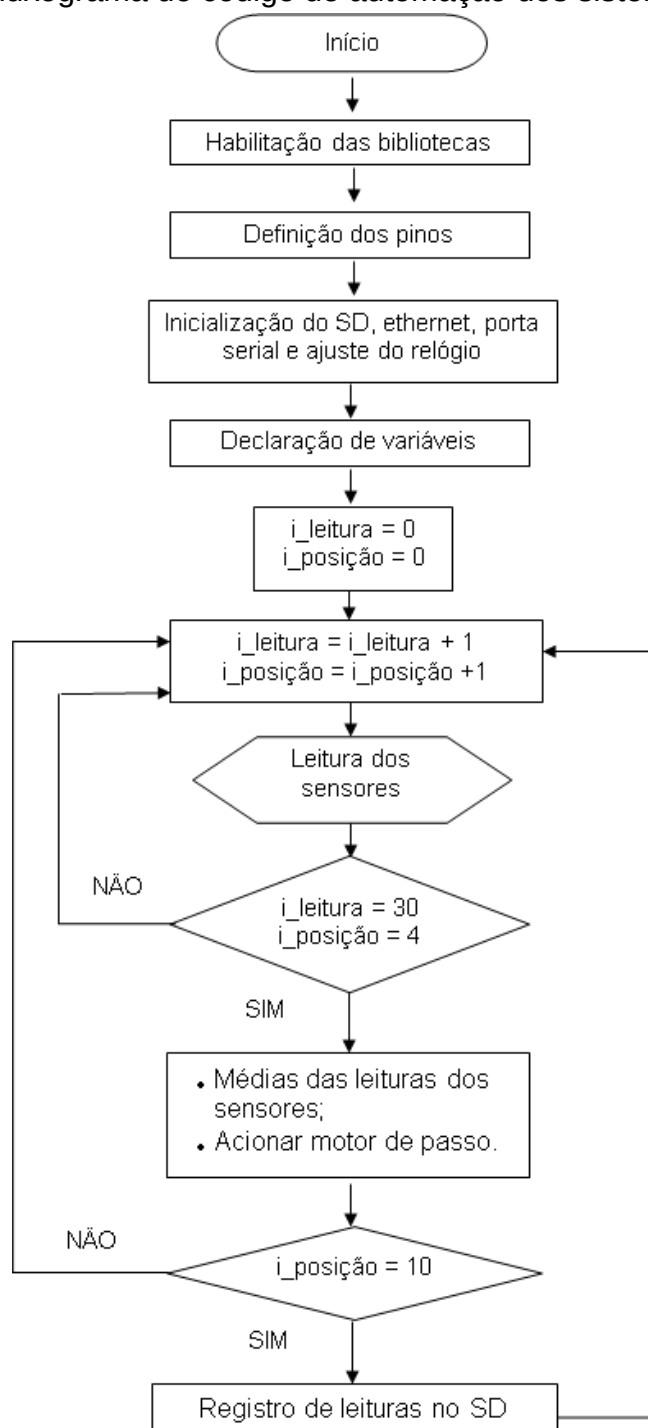
Fonte: Elaboração própria

¹ Watt pico (W_p) é a potência máxima gerada em um módulo fotovoltaico em condições ideais específicas, de 1000 W/m² de radiação solar de 25°C de temperatura ambiente.

3.3.7 Automação dos Sistemas

O fluxograma de automação dos sistemas está ilustrado na Figura 40. inicialmente são habilitadas as bibliotecas necessárias, seguido da definição dos pinos utilizados no Arduino®. Na sequência são inicializados o *ethernet shield*, o *slot* do cartão de memória, e ajustados data e hora.

Figura 40 – Fluxograma do código de automação dos sistemas FVs



Fonte: Elaboração Própria

Logo após são declaradas as variáveis do sistema, e então inicia-se o laço do programa. Dentro do código há dois contadores, sendo o primeiro utilizado na contagem das leituras dos sensores, e o segundo para contagem do tempo entre o acionamento do motor de passo, e o registro dos dados no cartão de memória.

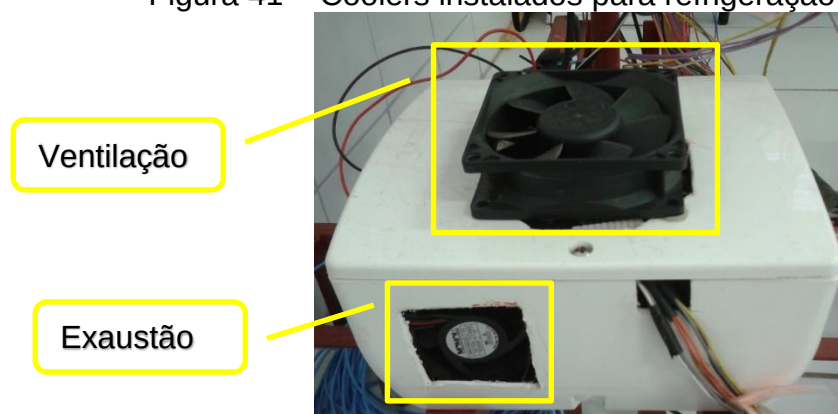
3.3.8 Montagem

A montagem dos sistemas FVs estático e móvel corresponde à uma etapa importante da pesquisa em questão, pois foram encontradas dificuldades relacionadas às estruturas e aos componentes dos sistemas que tiveram de ser corrigidas através de soluções que não interferissem no objetivo do estudo proposto.

Um dos problemas apresentados na montagem dos sistemas FVs foi o desligamento frequente no microcontrolador sem motivo aparente. Inicialmente levantou-se a hipótese de que a fonte de alimentação do Arduino® não estivesse fornecendo corrente suficiente para o funcionamento de todos os sensores e *shields*. Substituiu-se então a fonte de 12 V e 1 A por outra de 12 V e 2 A. A frequência dos desligamentos diminuiu, no entanto o problema não foi totalmente sanado.

Após a substituição da fonte de alimentação, identificou-se um superaquecimento no Arduino®, que estaria causando os desligamentos. Foram então instalados dois *coolers*, sendo um para ventilação e outro para exaustão do ar quente de dentro da caixa onde o Arduino® estava instalado. As ventoinhas instaladas estão ilustradas na Figura 41.

Figura 41 – Coolers instalados para refrigeração do Arduino®



Fonte: Elaboração própria

A instalação dos *coolers* reduziu a temperatura na placa do Arduino® de 80°C para 40°C, sanando o problema de desligamentos frequentes. Apesar de resolvido o superaquecimento, a caixa onde estava instalado o Arduino® ficou exposta a intempéries como poeira e chuva, fazendo-se necessária a instalação de uma capa protetora, ilustrada na Figura 42.

Figura 42 – Capa protetora da caixa do Arduino®



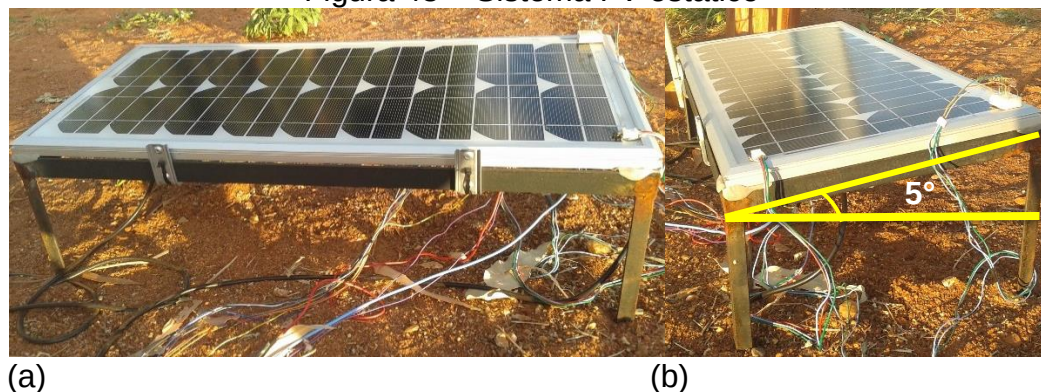
Fonte: Elaboração própria

Resolvidos os entraves da montagem do Arduino®, as dificuldades encontradas na montagem dos sistemas FVs, bem como o procedimento de execução da mesma, serão apontadas nas seções 3.3.8.1 e 3.3.8.2.

3.3.8.1 Painel FV Estático

A montagem do painel FV estático não apresentou complicações, e se deu assim como havia sido projetada. O sistema foi montado, e foram instalados sensores para monitoramento da tensão, corrente, temperatura, e radiação incidente dos módulos. Ainda foi instalada uma lâmpada incandescente de 32 V e 25 W de potência como carga para dissipar a potência produzida no módulo. O sistema estático está ilustrado na Figura 43.

Figura 43 – Sistema FV estático



Fonte: Elaboração Própria

A Figura 43 (b), evidencia a inclinação de 5° do módulo estático, igual à latitude do local, conforme mencionado na seção 3.2.

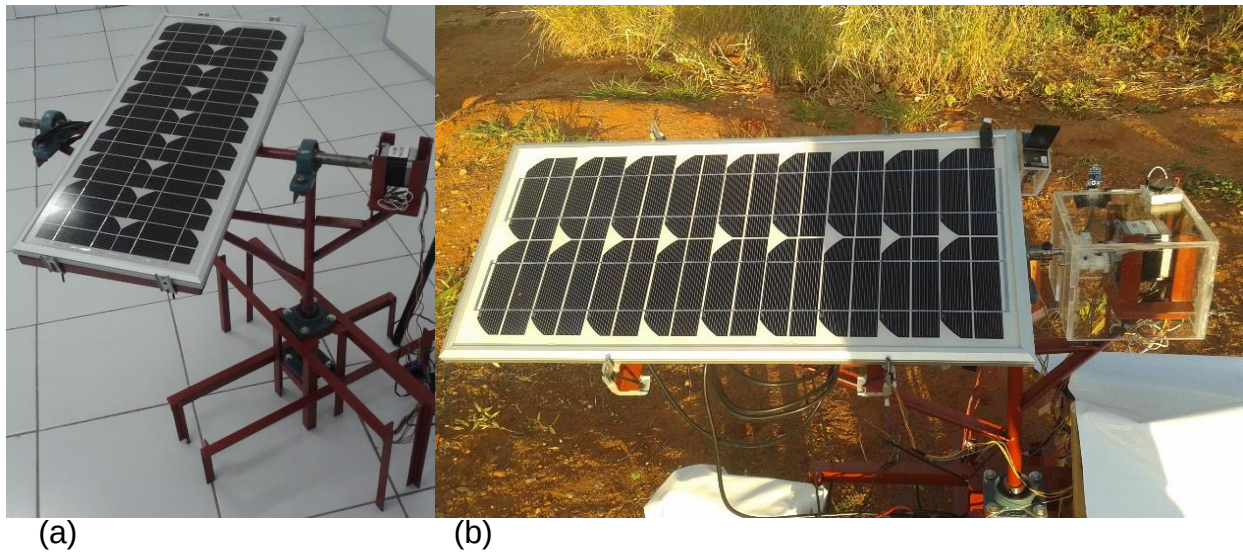
3.3.8.2 Painel FV Móvel

A montagem do sistema FV com mobilidade foi a que apresentou maiores dificuldades. A estrutura confeccionada tem mobilidade em dois eixos, e para a pesquisa em questão, foi utilizado o movimento leste-oeste, a fim de acompanhar o movimento do sol ao longo do dia.

Segundo o desenho a estrutura, *vide* ANEXO I, a bandeja a qual será instalado o painel FV está na posição radial. A priori, o painel foi instalado assim como estava proposto no projeto, no entanto, o motor de passo utilizado mostrou não ter torque suficiente para vencer a força peso do painel, e o momento de inércia criado pelo raio da bandeja.

A fim de resolver o problema da falta de torque do motor, o painel FV foi instalado no sentido axial ao eixo do motor, e o excesso da bandeja foi aparado, na tentativa de diminuir a força peso e momento de inércia. Além disso, foi necessária instalação de engrenagens que transferem o movimento do eixo do motor ao eixo da estrutura, a fim de diminuir a velocidade e aumentar o torque do motor, visto que o movimento de rastreamento não necessita de velocidade alta. A estrutura de rastreamento antes e após as modificações pode ser observada na Figura 44 respectivamente em (a) e (b).

Figura 44 – Sistema com rastreo antes (a) e após (b) as modificações



Fonte: Elaboração própria

Resolvida a movimentação correta do painel, foram conectados os sensores de temperatura, radiação, tensão e corrente. Ainda foram instalados dois botões, um em cada lado da trajetória do painel, com o objetivo de indicar o fim de curso do rastreo, e uma lâmpada incandescente, idêntica à instalada no sistema estático, como carga para consumo da potência gerada no painel FV.

Após a montagem dos sistemas estático e móvel, iniciou-se a coleta de dados para posterior análise de desempenho, descrita no Capítulo 4.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O presente Capítulo analisa os resultados obtidos na coleta de dados dos dois sistemas instalados, e discute o desempenho apresentado pelos painéis FV estático e com mobilidade em um eixo.

Para ambos os sistemas, foram realizados oito dias de coleta de dados, do dia 13 ao dia 20 de Julho de 2014. O desempenho dos sistemas foi observado das 8:00 às 17:30h, com intervalos de medição diários de dez minutos a cada leitura. Não foi possível observar o desempenho do sistema ao amanhecer do dia devido à limitações técnicas como o sombreamento dos módulos logo nas primeiras horas da manhã.

4.1 DESEMPENHO DO SISTEMA ESTÁTICO

O desempenho do sistema estático está apresentado na Tabela 5, onde se pode observar que a energia média gerada ao longo dos dias de análise foi de aproximadamente 146 Wh, variando significativamente de acordo com a condição meteorológica.

Tabela 5 – Desempenho do sistema estático

Dia	Energia (Wh)	Temperatura (°C)	Radiação (W/m²)	Condição Meteorológica
13/jul	68,2	36,1	750,3	Nublado
14/jul	162,7	42,8	888,6	Nuvens esparsas
15/jul	166,7	43,1	1261,3	Ensolarado
16/jul	149,3	41,3	1060,6	Ensolarado
17/jul	174,1	44,1	1037,7	Ensolarado
18/jul	159,2	41,7	958,7	Nuvens esparsas
19/jul	100,5	38,2	748,3	Nublado
20/jul	189,8	43,1	1011,9	Ensolarado
Média	146,3	41,3	964,7	-

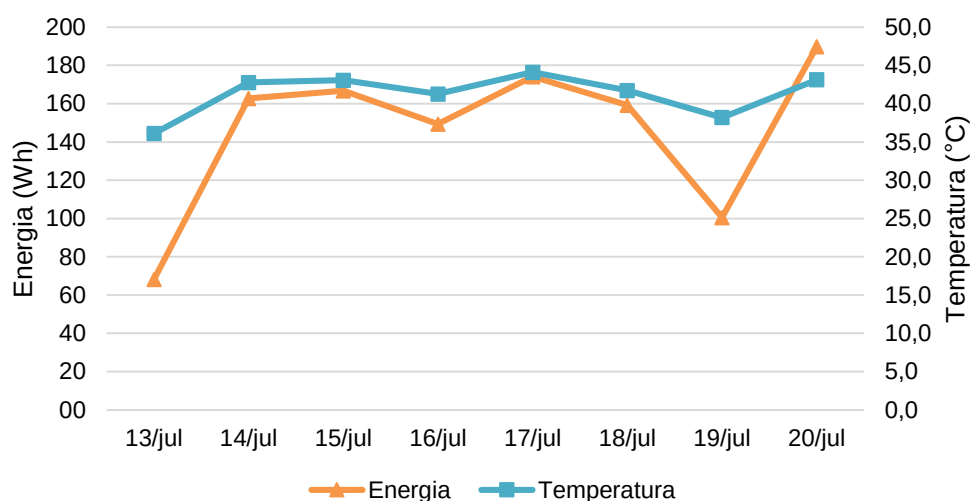
Fonte: Elaboração Própria

A coluna de Temperatura na Tabela 5 refere-se as médias diárias de temperatura na superfície do painel. Segundo a pesquisa desenvolvida por Ribeiro (2004), apontou influência negativa das altas temperaturas da região na geração

de energia elétrica dos módulos, chegando a trincar o vidro da superfície módulo, devido à temperatura de operação das células ser de 25°C. Tal fato não foi observado para o sistema montado neste trabalho, pois a temperatura de operação das células utilizadas é de 50°C, conforme a Tabela 4.

As médias de temperaturas de superfície do painel FV estático apresentadas na Tabela 5 não ultrapassam a temperatura de operação das células. A Figura 45 ilustra a curva de temperatura média no painel e a energia gerada ao longo dos dias observados. Pode-se perceber o aumento da geração de energia acompanhado pelo aumento da temperatura média durante os dias de experimento.

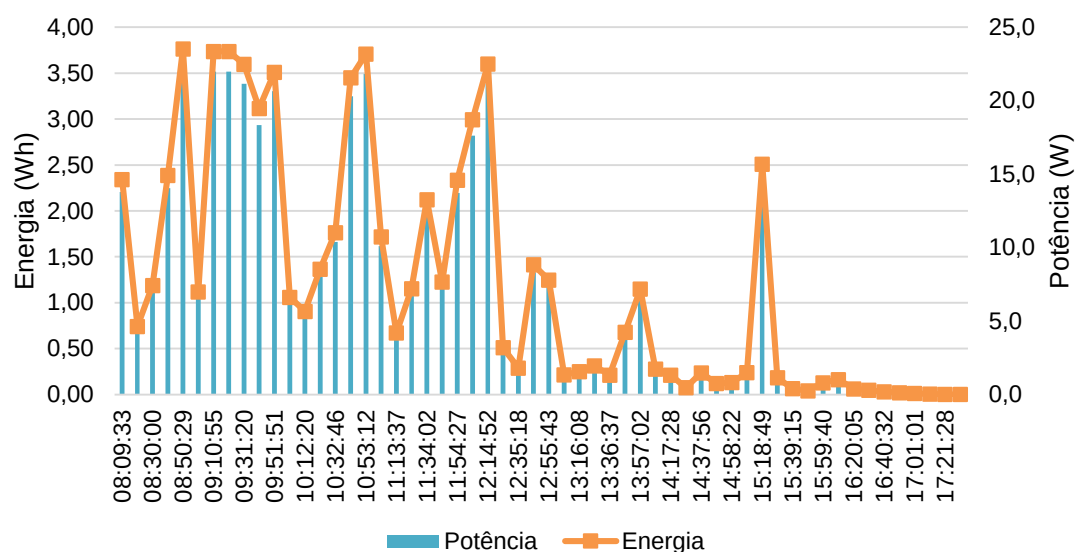
Figura 45 – Comportamento da energia gerada e temperatura para o sistema estático



Fonte: Elaboração Própria

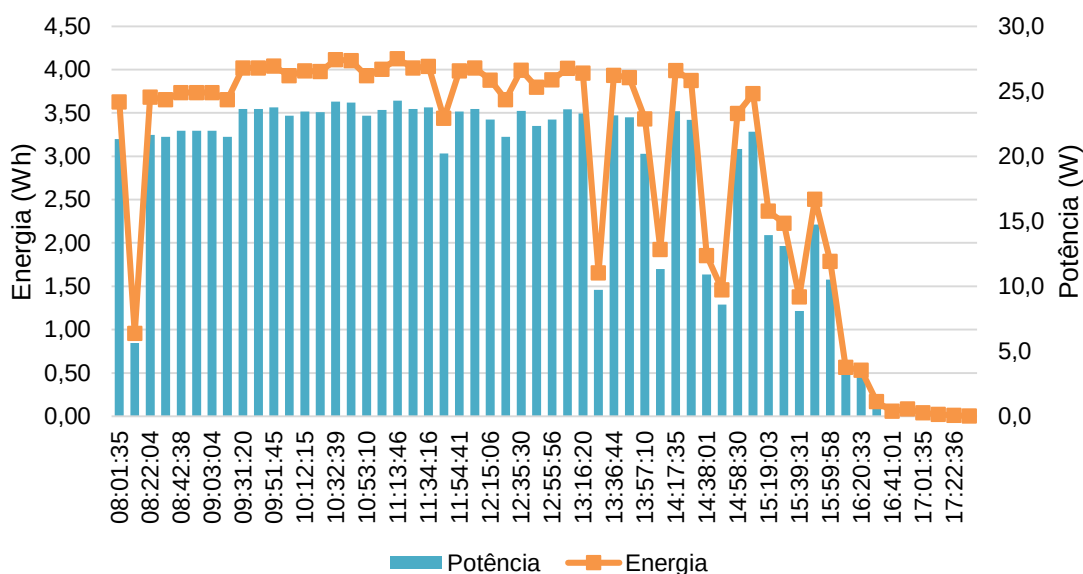
O desempenho da potência e energia gerada pelo módulo do sistema estático pode ser observado nas Figura 46 e 47, sabendo que o primeiro gráfico foi gerado em um dia nublado e o segundo em um dia ensolarado.

Figura 46 – Curva de potência e energia gerada (dia nublado)



Fonte: Elaboração Própria

Figura 47 - Curva e potência e energia gerada (dia ensolarado)



Fonte: Elaboração Própria

Analisando as Figura 46 e 47, observa-se que o sistema fixo, em ambas as situações, gera potência acima da nominal do módulo que é de $20W_p$. Este comportamento foi constante em todos os dias de observação, e também pode ser justificado pelos altos índices de radiação solar registrado nos dias de medição, como mostram os valores apresentados na Tabela 5.

Ainda analisando o comportamento da geração de energia, pode-se observar pontos onde a potência e energia geradas decrescem de forma abrupta. Estes instantes de perda de rendimento se devem à nebulosidade do local, pois mesmo em dias ensolarados, ainda há presença constante de nuvens. As demais

curvas do comportamento da potência e energia gerada encontram-se no ANEXO II.

4.2 DESEMPENHO DO SISTEMA COM MOBILIDADE EM UM EIXO

O desempenho do sistema móvel está apresentado na Tabela 6, que mostra a energia média gerada ao longo dos dias observados, atingindo algo em torno de 163 Wh, também variando significativamente de acordo com as condições meteorológicas.

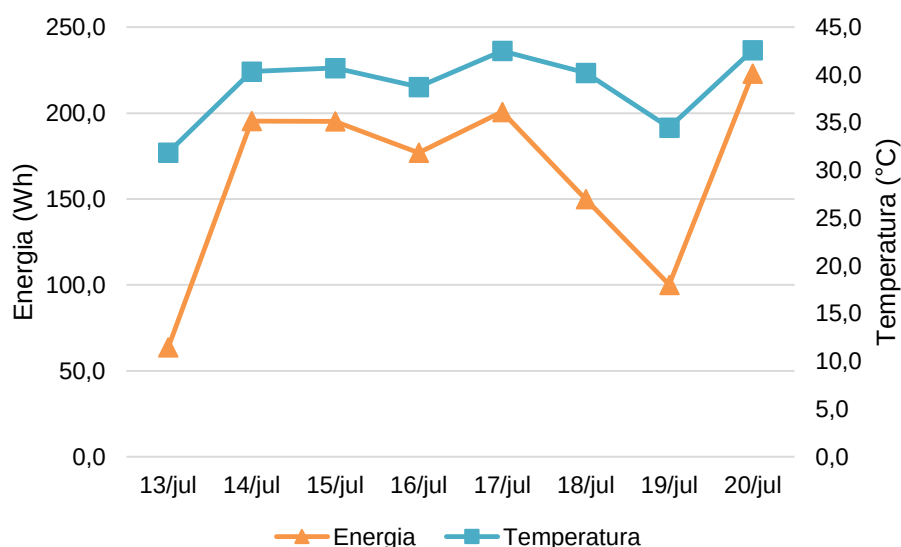
Tabela 6 – Desempenho do sistema móvel

Dia	Energia (Wh)	Temperatura (°C)	Radiação (W/m²)	Condição Meteorológica
13/jul	63,7	31,9	750,3	Nublado
14/jul	195,4	40,4	888,6	Nuvens esparsas
15/jul	195,2	40,7	1261,3	Ensolarado
16/jul	177,0	38,7	1060,6	Ensolarado
17/jul	200,7	42,5	1037,7	Ensolarado
18/jul	149,9	40,2	958,7	Nuvens esparsas
19/jul	100,1	34,5	748,3	Nublado
20/jul	223,1	42,6	1011,9	Ensolarado
Média	163,1	38,9	964,7	-

Fonte: Elaboração Própria

A Tabela 6 mostra que assim como aconteceu com o sistema estático, as médias de temperatura de superfície também não foram superiores à temperatura de operação do módulo FV utilizado. A Figura 48 ilustra as curvas de temperatura média do módulo e da energia gerada ao longo dos dias de experimento. Observa-se que as médias de temperatura acompanham as médias de geração de energia, ou seja, quando a temperatura de superfícies aumenta, a energia gerada também aumenta, assim como aconteceu para o painel estático.

Figura 48 – Comportamento da energia gerada e temperatura do sistema móvel

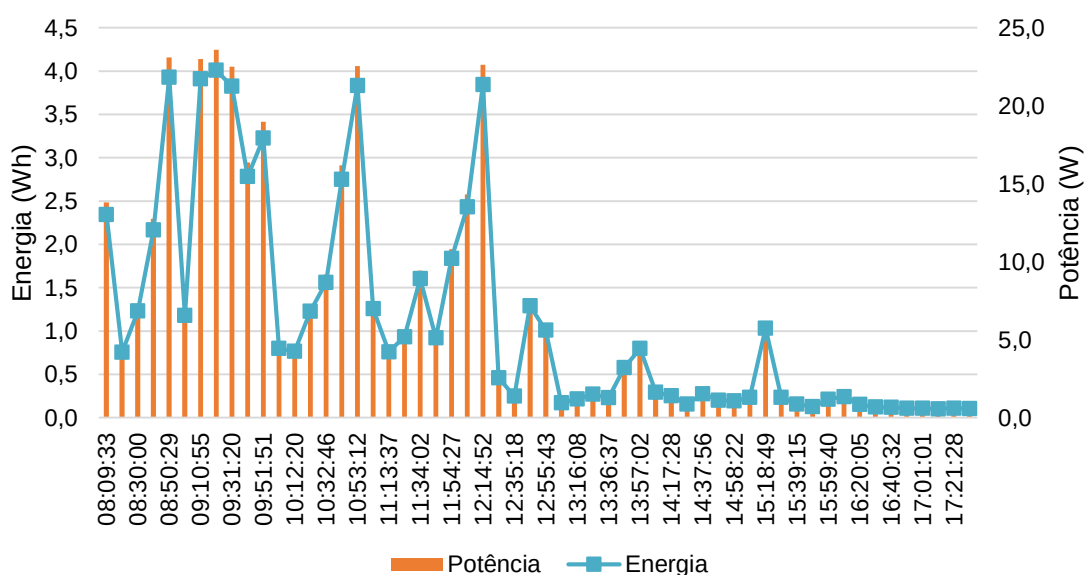


Fonte: Elaboração Própria

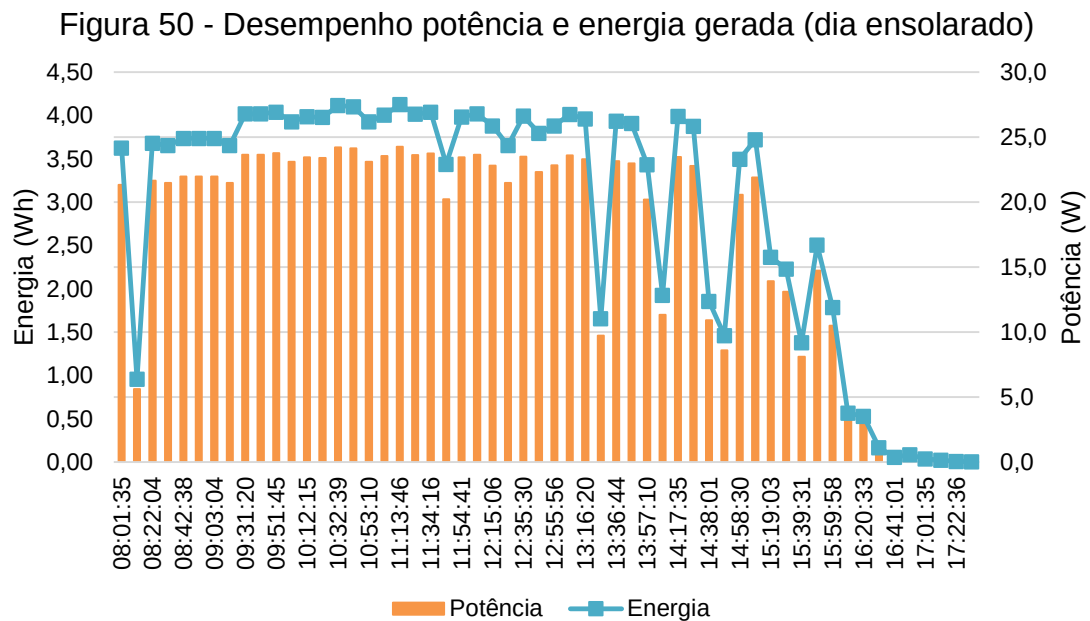
Como mostra a Figura 48 o comportamento da geração de energia em relação à temperatura foi semelhante ao do sistema estático, ou seja, a produção energética acompanha o aumento da temperatura, retificando a hipótese de que os altos índices de radiação compensam a perda por aumento da temperatura.

Tratando sobre o desempenho da potência e energia gerada no módulo, as Figura 49 e 50 ilustram estas curvas, sendo a primeira referente à um dia nublado e a segunda referente à um dia ensolarado.

Figura 49 – Desempenho potência e energia gerada (dia nublado)



Fonte: Elaboração Própria



Fonte: Elaboração Própria

As curvas apresentadas nas Figura 49 e 50 assemelham-se ao comportamento apresentado pelo sistema estático, sendo os valores de potência e energia gerados ligeiramente superiores. A potência gerada em vários momentos se apresenta acima da potência nominal do módulo, ou seja, $20 W_p$, assim como aconteceu no sistema estático, comportamento apresentado em todos os dias de observação, também podendo ser justificado pelos índices de radiação solar média de alguns dias de observação acima do padrão, no caso, acima de $1000 W/m^2$.

Outro comportamento comum do sistema móvel em relação ao sistema estático refere-se à diminuição brusca da potência gerada em alguns momentos do dia, também ocorrido devido à nebulosidade da região. As demais curvas de comportamento da energia e potência gerada estão ilustradas no ANEXO II.

Analizados os desempenhos dos sistemas estático e com mobilidade, a seção 4.3 tratará sobre a comparação entre os mesmos.

4.3 COMPARAÇÃO DE DESEMPENHO DOS SISTEMAS

A Tabela 7 apresenta o desempenho dos dois sistemas e onde é possível observar que o ganho percentual máximo obtido ao longo dos dias de medição foi de 20%, e a média de aumento do rendimento é de 11%.

Tabela 7 – Desempenho dos sistemas móvel e estático

Dia	Energia Sist. Móvel (Wh)	Energia Sist. Estático (Wh)	Ganho (%)	Condição Meteorológica
13/jul	63,7	68,2	-7%	Nublado
14/jul	195,4	162,7	20%	Nuvens esparsas
15/jul	195,2	166,7	17%	Ensolarado
16/jul	177,0	149,3	19%	Ensolarado
17/jul	200,7	174,1	15%	Ensolarado
18/jul	149,9	159,2	-6%	Nuvens esparsas
19/jul	100,1	100,5	0%	Nublado
20/jul	223,1	189,8	18%	Ensolarado
Média	163,1	146,3	11%	

Fonte: Elaboração Própria

Pode-se afirmar que a melhora no desempenho do módulo com rastreo, comparando ao sistema estático é baixa, considerando que na literatura registram-se aumentos de até 60%, como é o caso da pesquisa desenvolvida por Silva (2012).

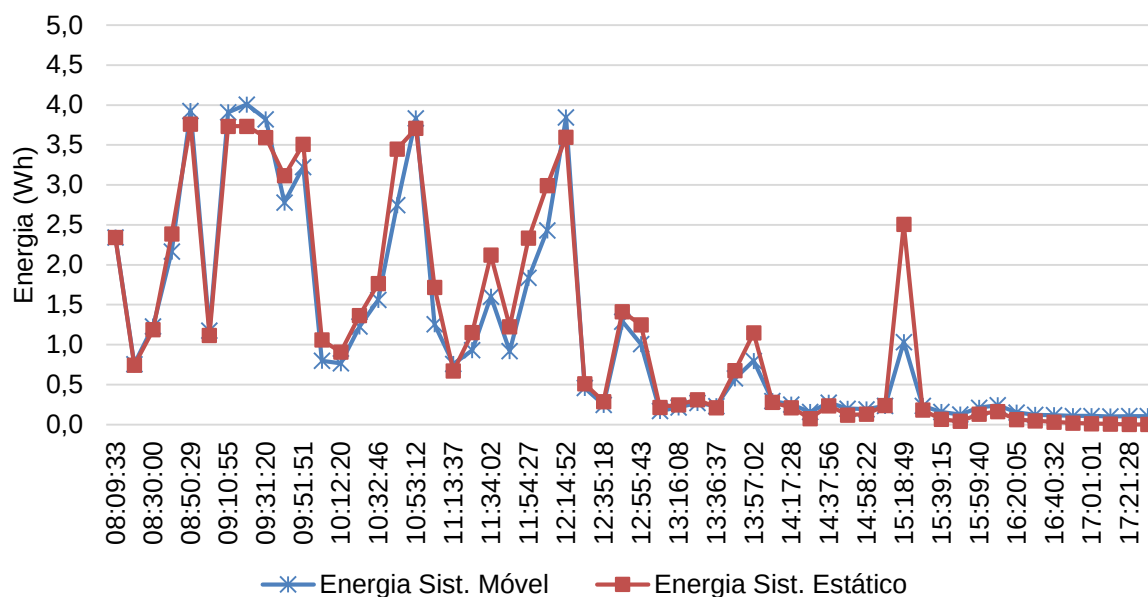
A baixa média de ganho pode ser justificada também pelos altos índices de radiação da região, pois observa-se pelos gráficos apresentados nas Figura 46 e 47, na seção 4.1, e Figura 49 e 49, na seção 4.2, além nos gráficos ilustrados no ANEXO II, que ao longo de quase todos os momentos do dia ambos os módulos operam em sua capacidade nominal, ou mesmo acima desta. Além disso, ainda deve-se considerar a linearidade do caminho traçado pelo sol ao longo do horizonte, devido à proximidade com a linha do equador.

Ainda analisando a Tabela 7, observa-se que em dias nublados, ou com muita nebulosidade, o ganho do sistema móvel em relação ao sistema estático é negativo ou nulo. Tal comportamento está relacionado ao fato de que em dias nublados com interferência de nuvens, a radiação incidente nos módulos é a radiação solar difusa e não a radiação solar direta. O sistema móvel aumenta seu rendimento devido à radiação solar incidir perpendicularmente ao módulo, o que não acontece com a radiação solar difusa.

Outro fator contribuinte para diminuição do rendimento em dias nublados se deve ao sistema de rastreo que perde orientação, por ser confundido pelas nuvens e pela radiação solar difusa.

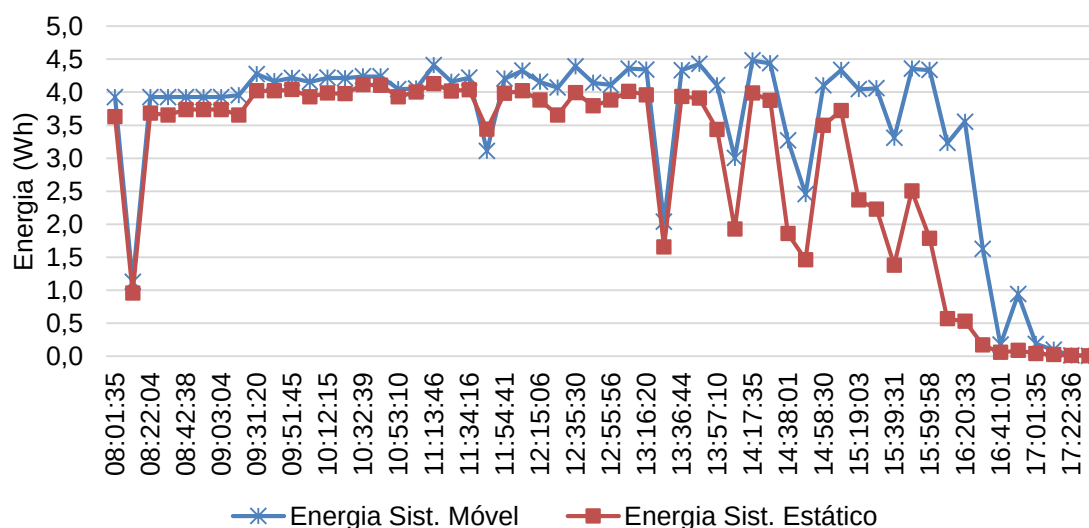
A energia produzida, por cada sistema, diariamente ao longo dos dias observados está ilustrada nas Figura 51 a 56.

Figura 51 – Comparação de desempenho dos sistemas estático e móvel (dia 1)



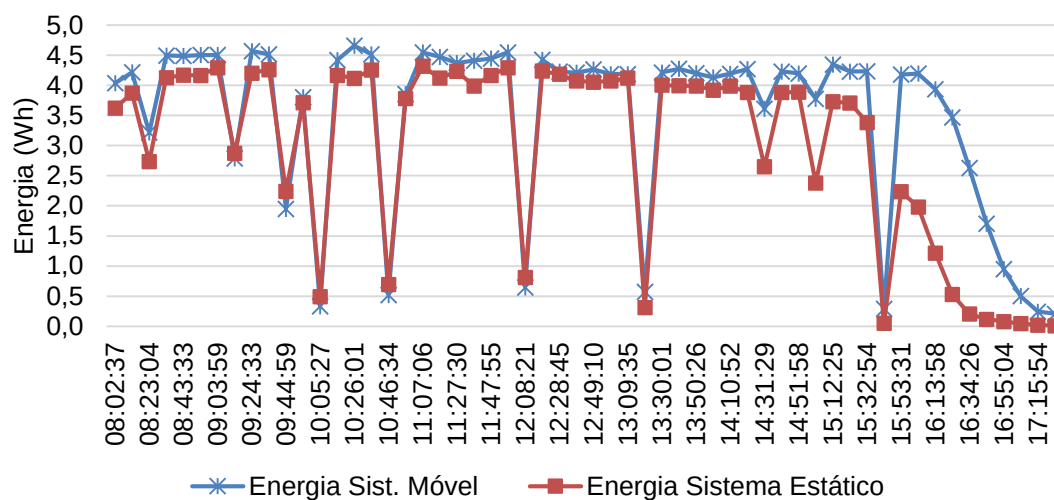
Fonte: Elaboração Própria

Figura 52 - Comparação de desempenho dos sistemas estático e móvel (dia 2)



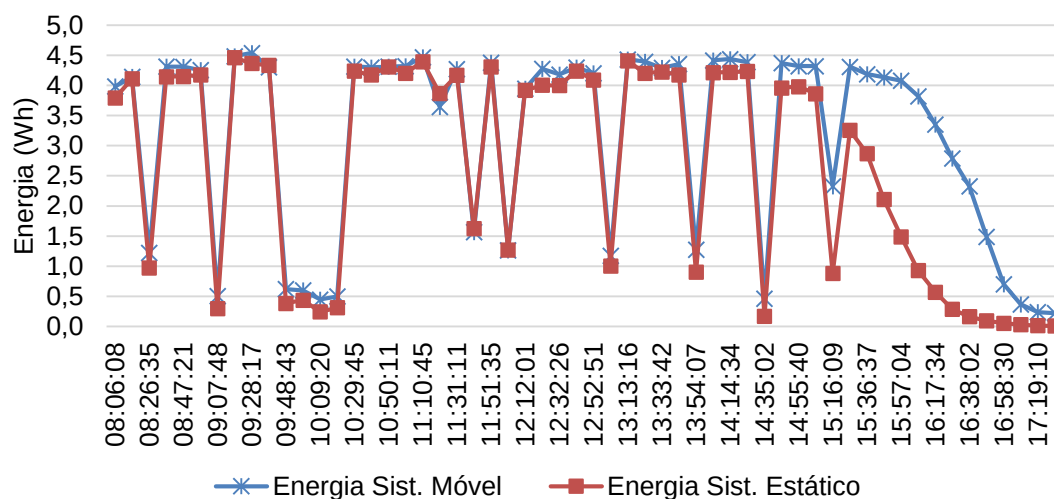
Fonte: Elaboração Própria

Figura 53 - Comparação de desempenho dos sistemas estático e móvel (dia 3)



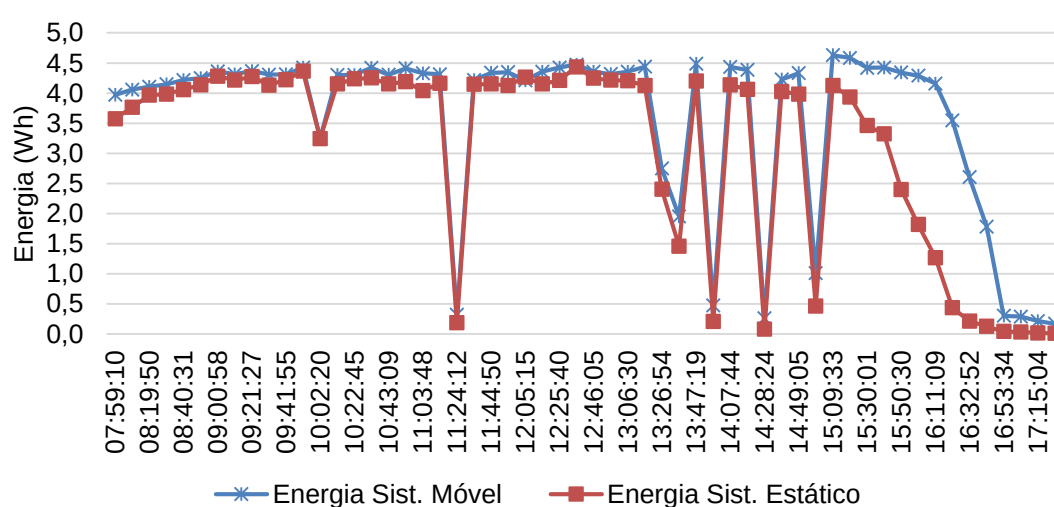
Fonte: Elaboração Própria

Figura 54 - Comparação de desempenho dos sistemas estático e móvel (dia 4)



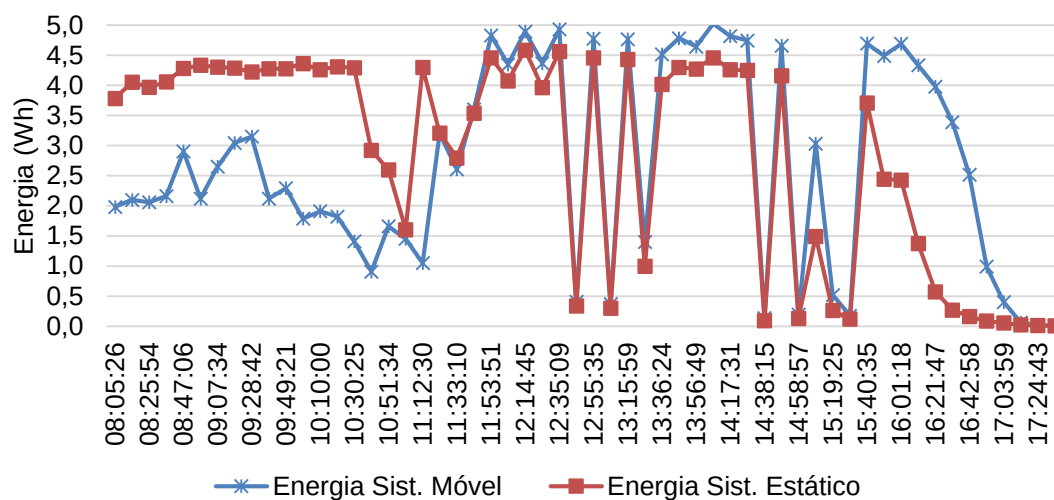
Fonte: Elaboração Própria

Figura 55 - Comparação de desempenho dos sistemas estático e móvel (dia 5)



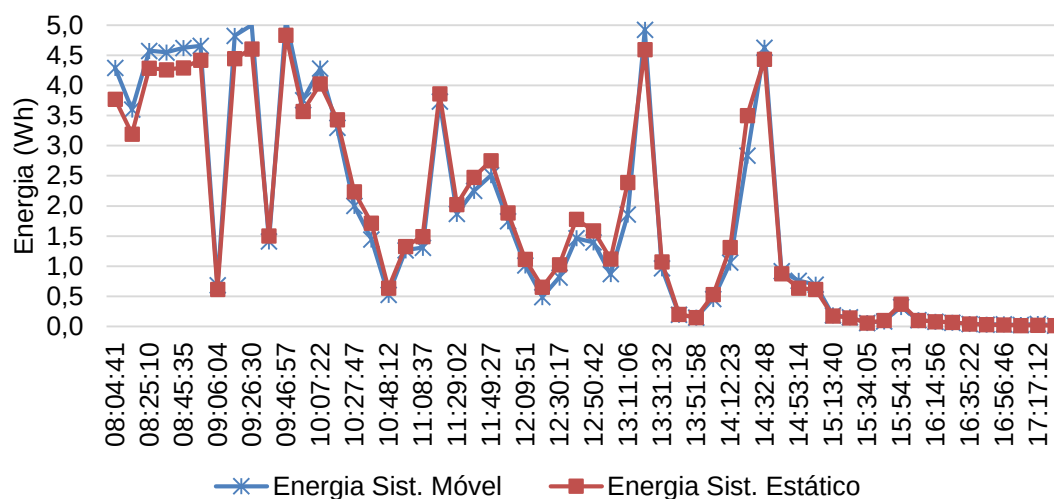
Fonte: Elaboração Própria

Figura 56 - Comparação de desempenho dos sistemas estático e móvel (dia 6)



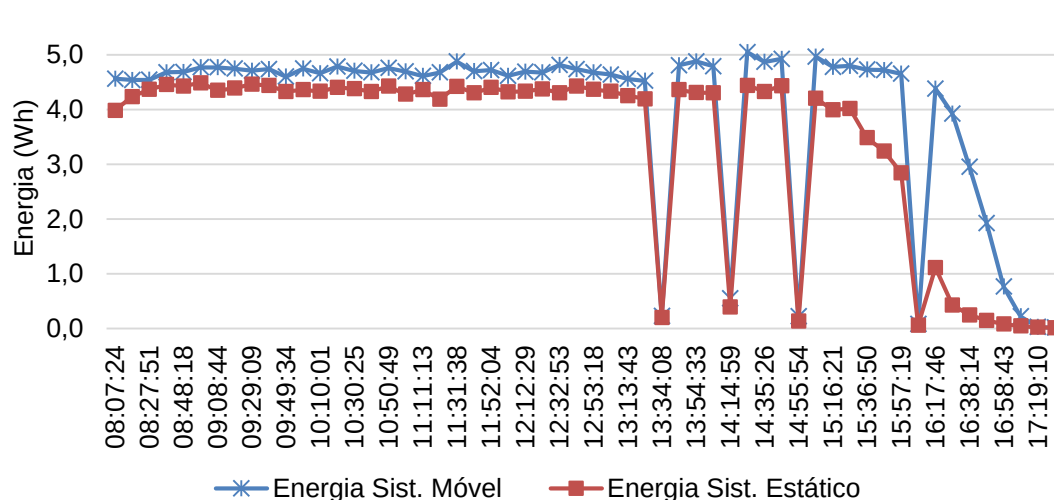
Fonte: Elaboração Própria

Figura 57 - Comparação de desempenho dos sistemas estático e móvel (dia 7)



Fonte: Elaboração Própria

Figura 58 - Comparação de desempenho dos sistemas estático e móvel (dia 8)



Fonte: Elaboração Própria

Em todos os dias observados, nas Figuras de 51 a 58, as curvas de geração de energia dos sistemas estático e móvel assemelham-se bastante, retificando o baixo ganho de rendimento apresentado no sistema móvel e em relação ao estático, para o local em questão. Observa-se também que são comuns à todos os dias, e em ambos os sistemas, as quedas bruscas de geração de energia em alguns momentos do dia, ocorrendo nos mesmo instantes. Tal comportamento se deve à nebulosidade, como já justificado nas seções 4.1 e 4.2.

Outra interferência natural observada na geração de energia, foi a deposição de poeira na superfície dos módulos, deixando o vidro opaco e consequentemente não absorvendo a radiação incidente no módulo. O problema da poeira no local de instalação é particularmente importante, devido à influência do deserto salino, uma faixa de terra de alta salinidade e pouca cobertura vegetal no litoral próximo à Mossoró (RIBEIRO, 2004). Na pesquisa realizada, não foi possível quantificar o impacto da poeira na geração de energia elétrica, pois apesar de identificado a presença de poeira nos módulos, os mesmos eram limpos diariamente.

A Figura 56 apresenta um comportamento atípico do sistema móvel, pois a energia gerada no período da manhã é menor que a energia gerada no painel estático. Este comportamento é foi apresentado devido à desorientação do painel móvel, por se tratar de um dia de nuvens esparsas no céu, que atrapalham o sistema de orientação.

Por fim, pode-se observar das Figuras 51 a 58, que a geração de energia no sistema móvel apresenta diferença significativa em relação ao sistema estático por volta das 15:00 horas. Este horário é o momento do dia quando se inicia o pôr do sol na região, diminuindo a radiação solar incidente e variando o ângulo de incidência dos raios solares nos módulos.

4.4 ESTIMATIVA DE RETORNO FINANCEIRO

O ganho médio do na geração de energia do painel móvel foi de 11% em relação ao painel estático, sem considerar a energia consumida pelo próprio sistema de rastreo. Uma análise simplificada de estimativa de retorno financeiro do investimento no sistema de rastreo pode então ser feita. A Tabela 8 apresenta

os preços dos componentes do sistema de rastreo, bem como o total investido de R\$ 488,00.

Tabela 8 – Preços dos componentes do sistema de rastreo

Item	Qtd.	Preço (R\$)
Estrutura móvel	1	300,00
Arduino® Mega	1	56,90
Motor de passo	1	110,00*
Sensor LDR	2	8,97
Drive motor de passo	1	12,13
Total		488,00

*Preço médio do mercado, pois o motor utilizado foi disponibilizado pela universidade
Fonte: Elaboração própria

Considerando o preço médio do KWh² no Rio Grande do Norte, para consumidores de baixa tensão, grupo de consumo B é de aproximadamente R\$0,30 desconsiderando impostos (COSERN, 2014), que a potência máxima de geração do módulo utilizado é de 20 W, e que a média de horas de insolação diária é de 7,42 horas (*vide* Tabela 2), a energia máxima gerada seria de aproximadamente 148 Wh no painel estático.

O ganho apresentado no painel móvel foi de 11%, gerando assim aproximadamente 164Wh, operando acima da capacidade nominal, como observou-se ser frequente na região. Supondo que a energia gerada fosse vendida à concessionária de energia local, tem-se um acréscimo de R\$ 5,00 por dia na geração de energia do painel móvel. Desta forma, o tempo estimado de retorno financeiro do investimento nos componentes de rastreo é de aproximadamente 100 dias.

É importante destacar que a estimativa de retorno realizada não considera interferências da nebulosidade do local, e deposição de poeira nos módulos, consumo de energia do sistema de rastreo, bem como outros custos como por exemplo instalação do sistema e depreciação dos componentes.

² Quilowatt hora

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considerando que as pesquisas feitas com o uso de dispositivos de rastreamento apontaram ganhos de até 60% na eficiência do painel, a pesquisa em questão propôs a comparação de desempenho de um sistema com seguimento em um eixo, no sentido leste-oeste, e um sistema estático na cidade de Mossoró-RN. O local de instalação registra altos índices de radiação solar, altas temperaturas durante o dia, baixo índice pluviométrico, com latitude de aproximadamente 5°, muito próximo à linha do equador.

O desempenho apresentado nos sistemas móvel e estático mostram que a temperatura média na superfície dos módulos não ultrapassou a condição de operação das células de 50°C, podendo ser observado o aumento da temperatura dos painéis acompanhado do aumento da energia gerada.

A potência gerada nos módulos em vários momentos do dia estava acima da potência nominal, tal fato pode ser justificado pela alta radiação incidente na região. Como consequência do aumento da potência de geração, a vida útil dos painéis, estimada em 25 anos para radiação máxima de 1000 W/m², pode ser reduzida.

Observou-se também que o rendimento dos painéis é bastante influenciado pela nebulosidade da região, pois mesmo em dias ensolarados, ainda há presença de nuvens no céu que eventualmente obstruem a radiação solar.

Na comparação do desempenho entre o sistema móvel em relação ao sistema estático, comprovou-se o pouco aumento do rendimento na geração de energia, sendo este em média de 11%. Diferenças significativas entre as potências geradas só puderam ser observadas em horários após as 15:00h.

Em dias nublados foram registrados ganhos negativos ou nulos do sistema móvel em relação ao estático, devido à radiação solar incidente nos módulos, neste caso, ser a radiação solar difusa. Assim, o raio solar não incide normalmente ao plano do módulo, justificando a diferença de rendimento, além do fato de que a radiação difusa desorienta o sistema de rastreo.

O baixo aumento na eficiência do painel móvel se deve à proximidade da região à linha do equador, pois não há grandes variações na posição do sol ao longo do dia ou do ano, e ainda recebe alta média de radiação solar.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir dos resultados obtidos, bem como os conhecimentos adquiridos ao longo desta pesquisa, pode-se sugerir alguns melhoramentos para trabalhos futuros, tais como:

- Adicionar mobilidade no segundo eixo, de forma a fazer o seguimento norte-sul ao longo do ano, e comparar o seu desempenho com o sistema com mobilidade em apenas um eixo e o sistema estático;
- Estimar a perda na vida útil dos módulos por trabalharem acima da sua capacidade nominal;
- Fazer análise do desempenho dos sistemas ao longo do ano inteiro;
- Estimar a perda na geração devido à nebulosidade momentânea que obstrui a radiação solar;
- Medir a energia necessária para o funcionamento do sistema de rastreamento.
- Estimar o impacto na geração de energia, causado pela deposição de poeira sobre as superfícies dos módulos;
- Melhorar a automação do painel móvel, de modo a não haver desorientação do sistema de rastreamento;
- Comparar o sistema em estudo com um sistema de refrigeração, permitindo avaliar a influência da temperatura na geração de energia.

REFERÊNCIAS

ALVES, Alceu Ferreira. Desenvolvimento de um Sistema de Posicionamento Automático para Painéis Fotovoltaicos. Botucatu, 2008. Disponível em: <www.pg.fca.unesp.br/Teses/PDFs/Arq0343.pdf>. Acesso em: 17 de agosto de 2013.

ARDUINO, Mega. Disponível em: < <http://arduino.cc/em/Main/arduinoBoardMega> >. Acesso em: 22 de novembro de 2013.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica Atlas de Energia Elétrica.. 2ª Edição. Brasília, 2005.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica Atlas de Energia Elétrica.. 3ª Edição. Brasília, 2009.

ARGESEANU, Alin. RITCHIE, Ewen. LEBAN, Krisztina. New Low Cost Structure for Dual Axis Mount Solar Tracking System Using Adaptive Solar Sensor. Dinamarca, 2010. Disponível em: <http://vbn.aau.dk/files/43730377/New_Low_Cost_Structure_For_Dual_Axis_Solar.pdf>. Acesso em: 21 de julho de 2013.

BOSE, Arindam. The Solar Tracking System. India, 2011. Disponível em:<<http://arindambose.webs.com/PDFs/HELIANTHUS.pdf>>. Acesso em: 20 de julho de 2013.

CASTAÑEDA, César Eduardo Figueroa. Desenvolvimento de um Rastreador Solar Passivo por Transferência de Massa. Curitiba, 2011.

CATARIUS, Adrian. CHRISTINER, Mario. Azimuth-Altitude Dual Axis Solar Tracker. Estados Unidos, 2010. Disponível em: <http://www.wpi.edu/Pubs/E-project/Available/E-project-121710-140419/unrestricted/Dual_Axis_Tracker_Final_Report.pdf>. Acesso em: 18 de agosto de 2013.

CORTEZ, Ramiro José Monteiro. Sistema de Seguimento Solar em Produção de Energia Fotovoltaica. Portugal, 2012. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia do Porto – FEUP.

COSERN, 2014. Disponível em: <file:///C:/Users/Rom%C3%A2nia/Downloads/Tarifas_de_Fornecimento_de_Baixa_Tensao.pdf>. Acesso em: 19 de agosto de 2014.

CRESESB, Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos.. Rio de Janeiro, 2004.

DHANABAL, R. BHARATHI, V. RANJITHA, R. PONNI, A. DEEPTHI, S. MAGESHKANNAN, P. Comparison of Efficiencies of Solar Tracker systems with static panel Single-Axis Tracking System and Dual-Axis Tracking System with Fixed Mount. India, 2013. Disponível em: <http://www.ijesit.com/Volume%202/Issue%202/IJESIT201302_66.pdf>. Acesso em: 18 de agosto de 2013.

DEEPTHI S., Ponni. A., Ranjitha. R., R Dhanabal. Comparison of Efficiencies of Single-Axis Tracking System and Dual-Axis Tracking System with Fixed Mount. India, 2013. Disponível em: <http://www.ijesit.com/Volume%202/Issue%202/IJESIT201302_66.pdf>. Acesso em: 21 de julho de 2013.

Energia Solar Princípios e Aplicações. CRESEB, Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. São Paulo, 2006.

EPIA, European Photovoltaic Industry Association. Global Market Outlook for Photovoltaics. Alemanha, 2014. Disponível em: <http://www.epia.org/index.php?eID=tx_nawsecuredl&u=0&file=/uploads/tx_epiapublications/EPIA_Global_Market_Outlook_for_Photovoltaics_2014-2018_-_Medium_Res.pdf&t=1406840298&hash=0ad342359e073d4875be061859267b1ba3ffd9fb>. Acesso em: 30 de julho de 2014.

MASTERS, Gilbert M. Renewable and efficient electric power systems. New Jersey: John Wiley & Sons, 2004. 677p.

MONTEIRO, Flávio Áureo Moura. Desenvolvimento de um Sistema de Controle de Baixo Custo para Rastreador Solar. Recife, 2007. Disponível em: <www.dominiopublico.gov.br/pesquisa/DetalheObraForm.do?select...>. Acesso em: 15 de agosto de 2013.

MOUSAZADEH, Hossein. KEYHANI, Alireza. JAVADI, Arzhang. MOBLI, Hossein. ABRINIA, Karen. SHARIFI, Ahmad. A Review of Principle and Sun-Tracking Methods for Maximizing Solar Systems Output. Índia, 2009. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032109000318>>. Acesso em: 17 de agosto de 2013.

NUNES, R. L. C. SOBRINHO, J. Espinola. SILVA, S. T. A. SANTOS, W. O. MANIÇOBA, R. M. Radiação Fotossinteticamente Ativa (RFA/PAR) versus Radiação Global em Mossoró, RN. Mossoró, 2012.

OLIVEIRA, Maurício Madeira. Análise do Desempenho de um Gerador Fotovoltaico com Seguidor Solar Azimutal. Rio Grande do Sul, 2008.

PINTO, Aimé. MACAGNAN, Mario. ZILLES, Roberto. LEHMANN, Jeremias. Descrição de Seguidores Solares e sua Aplicação em Centrais Fotovoltaicas Conectadas à Rede. III Congresso Brasileiro de Energia Solar – CEBENS. Pará, 2010. Disponível em: <<http://www.iee.usp.br/biblioteca/producao/2010/Trabalhos/pintonetodescricao.pdf>>. Acesso em: 20 de julho de 2013.

RIBEIRO, George Bezerra. Energia Solar Fotovoltaica: Estudo de Dimensionamento e Viabilidade de Sistemas Autônomos em Mossoró/RN. Dissertação. Universidade do Estado do Rio Grande do Norte – UERN. Mossoró, 2004.

SANTIAGO, Gregory Luid Souza. Desenvolvimento de um medidor de radiação solar de baixo custo. Monografia. Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA. Mossoró, 2014.

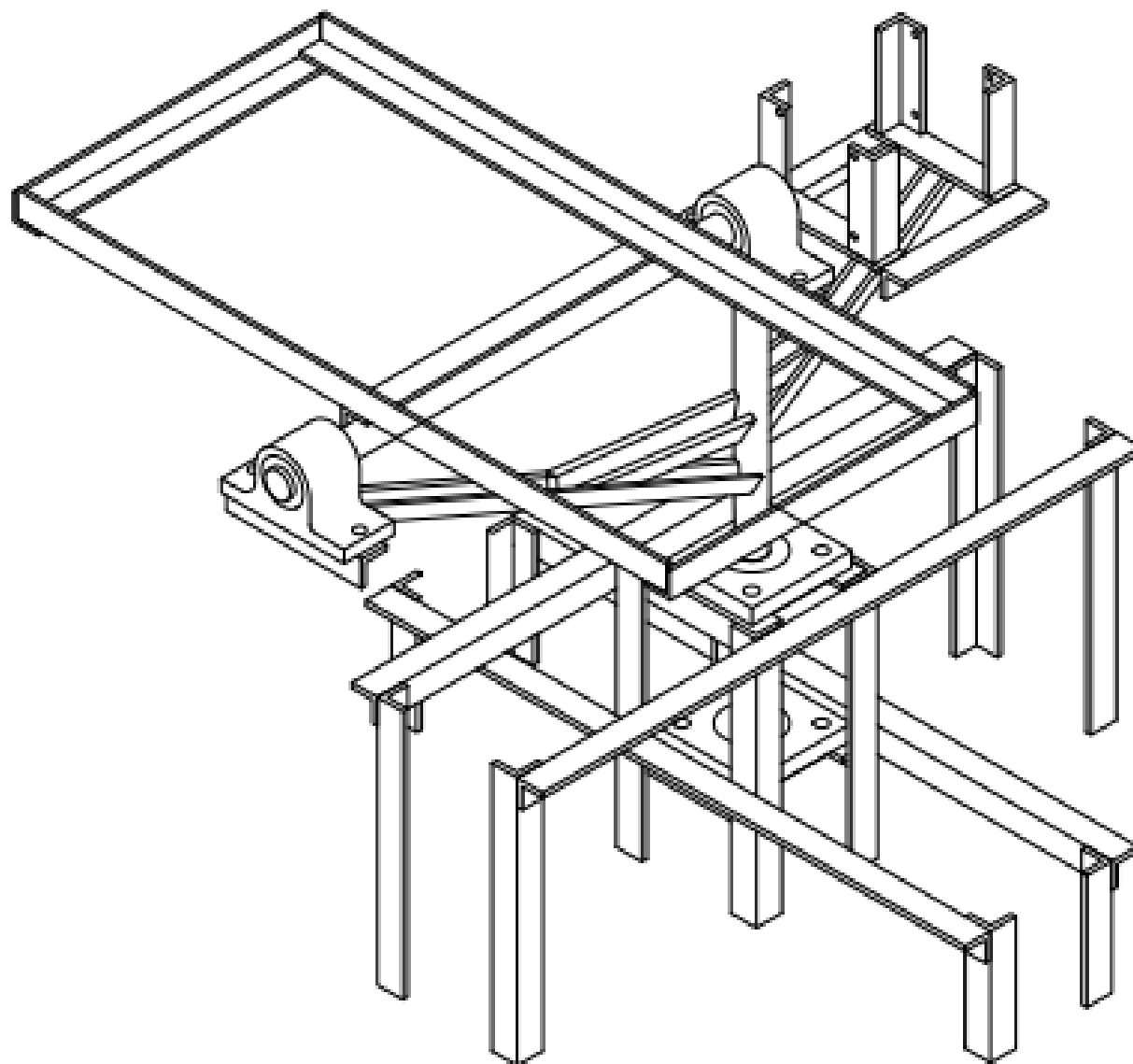
SILVA, Marta Cristina da Costa. Estudo Comparativo de um Paine Solar Fotovoltaico Fixo vs Móvel. Portugal, 2012. Dissertação de mestrado. Universidade no Minho. Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao Grau de Mestre em Engenharia Eletrônica Industrial e Computadores

SOLAR CHOICE, 2014. Disponível em: <<http://www.solarchoice.net.au/blog/solar-trackers/>>. Acesso em: 6 de agosto de 2014.

TESSARO, Alcione Rodrigo. SOUZA, Samuel N. Melegari. RICIERI, Reinaldo Prandini. FERRUZI, Yuri. Desempenho de um Paine Solar Fotovoltaico Acoplado a um Rastreador Solar. Cascavél, 2005. Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE.

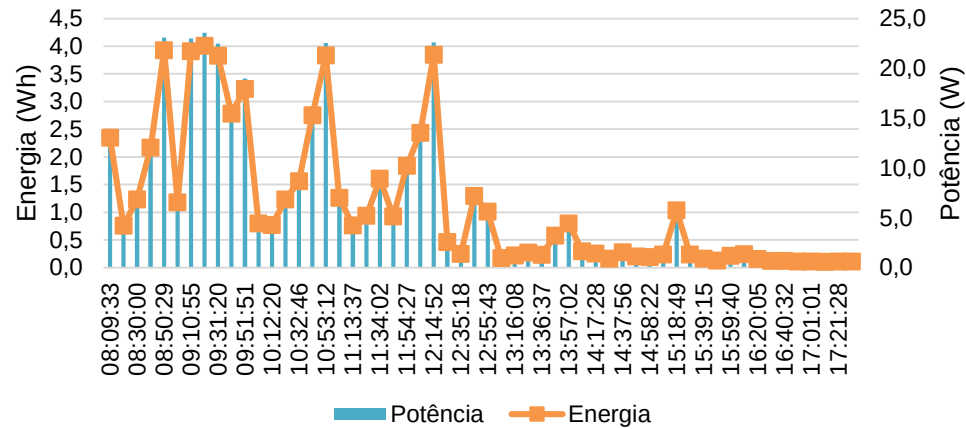
TIBA, Chigueru, *et al.* Atlas Solarimétrico do Brasil: Banco de Dados Solarimétricos. Recife, 2000. Ed. Universitária da UFPE.

ANEXO I

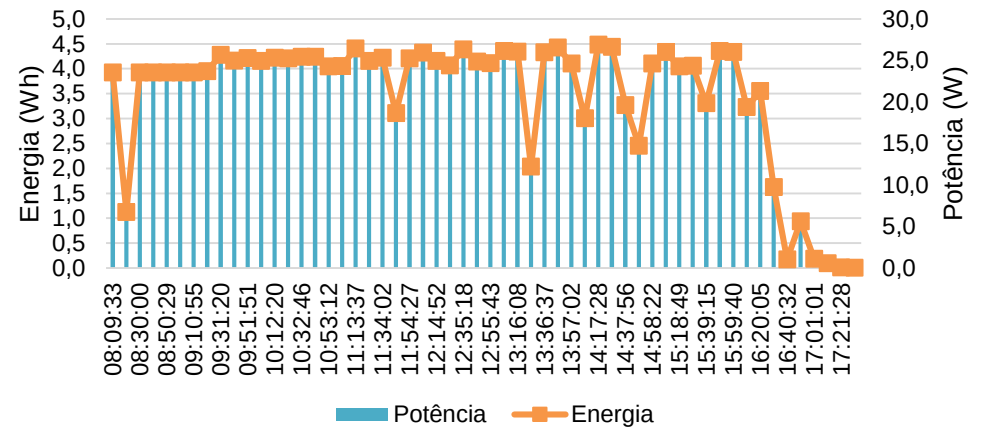


ANEXO II

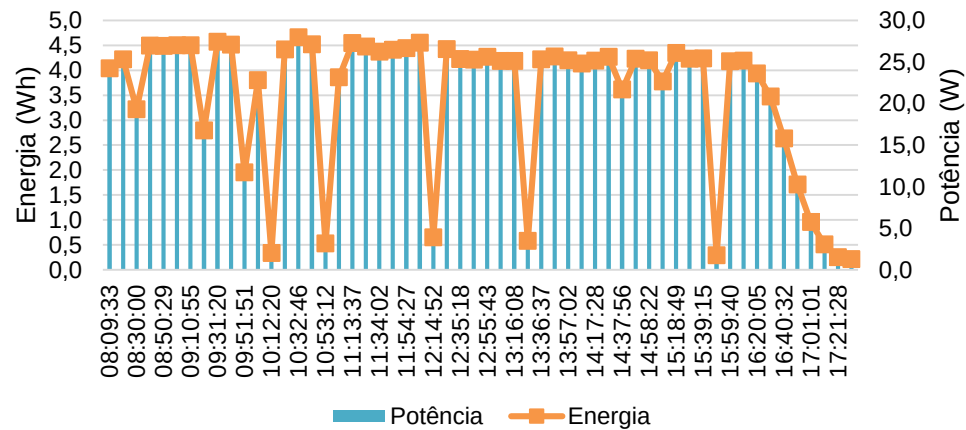
Dia 1 - Sistema móvel



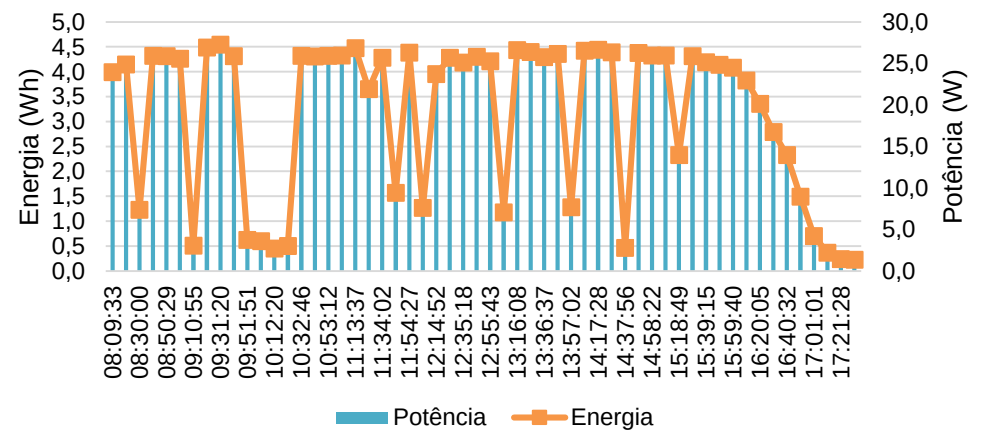
Dia 2 - Sistema móvel



Dia 3 - Sistema móvel

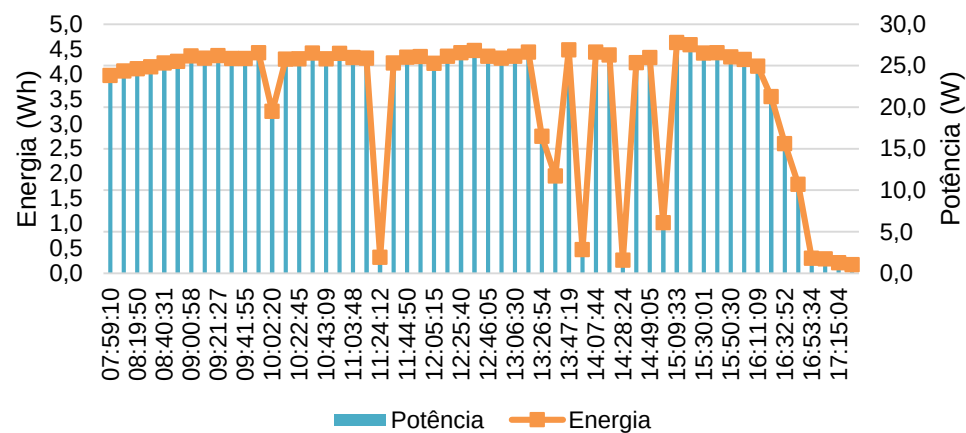


Dia 4 - Sistema móvel

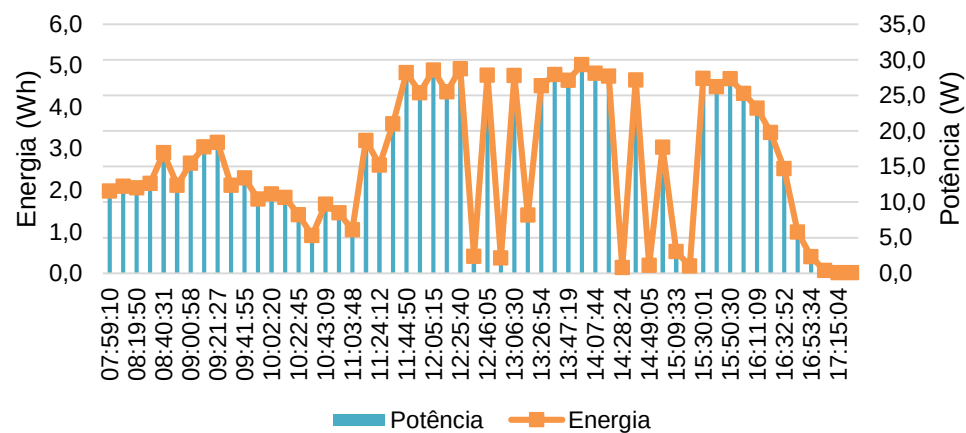


Fonte: Elaboração Própria

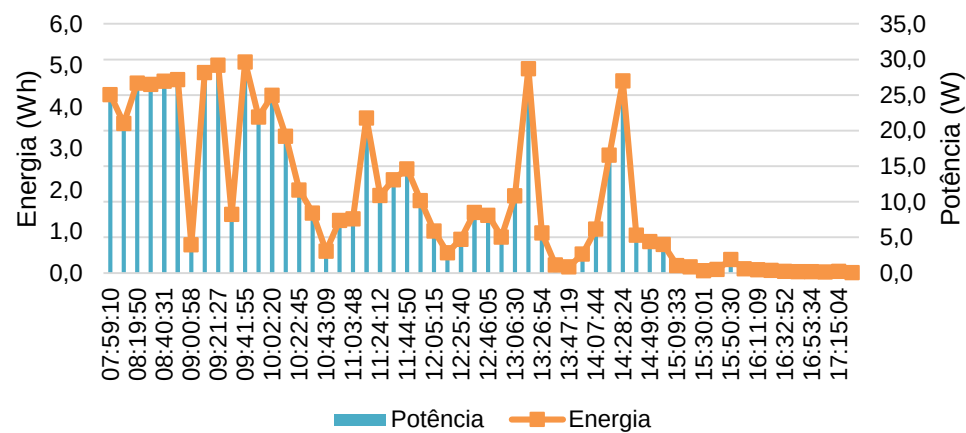
Dia 5 - Sistema móvel



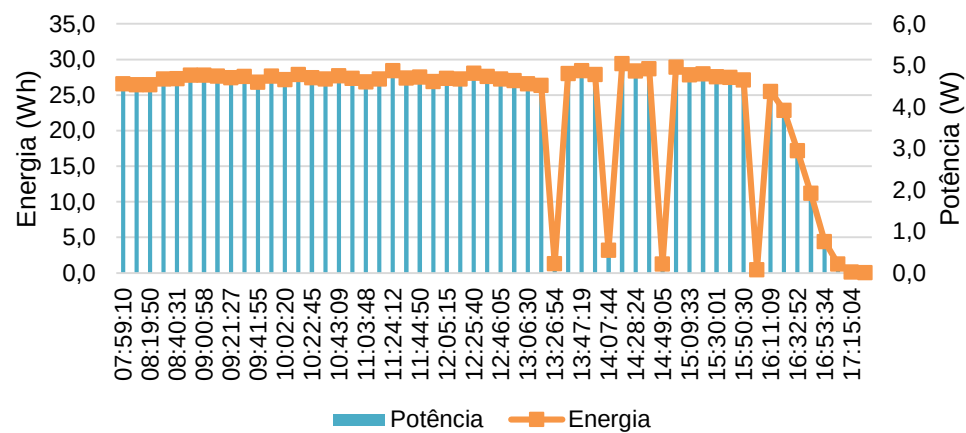
Dia 6 - Sistema móvel



Dia 7 - Sistema móvel

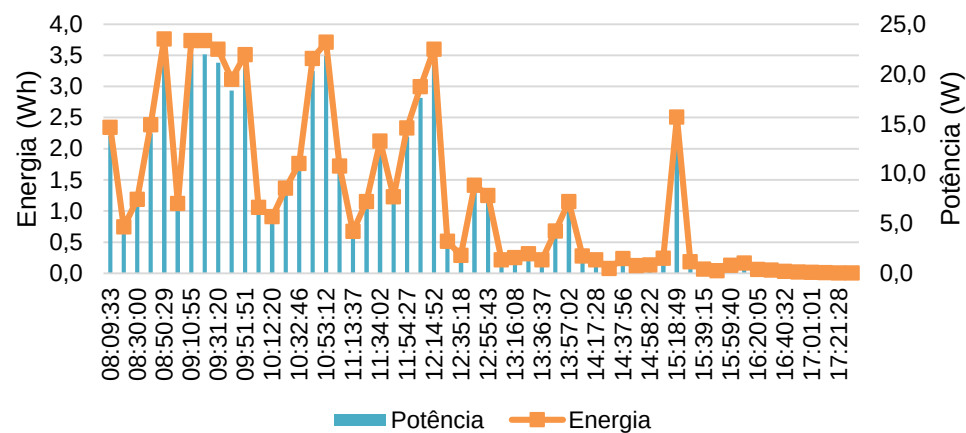


Dia 8 - Sistema móvel

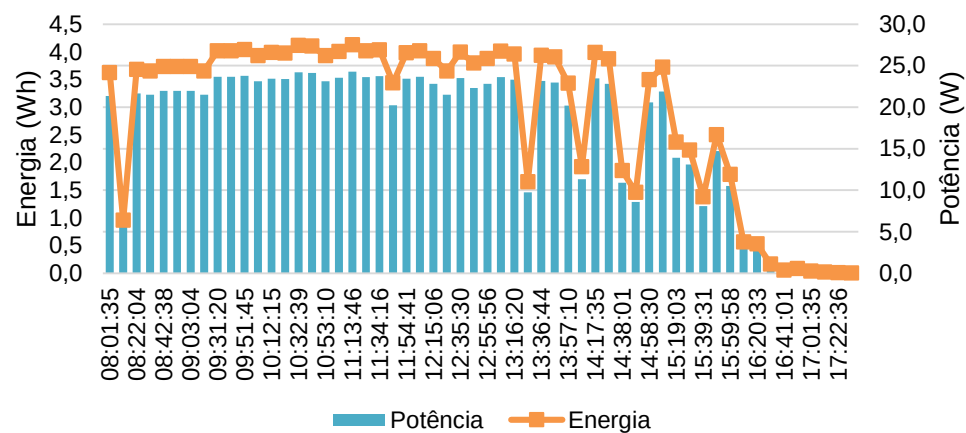


Fonte: Elaboração Própria

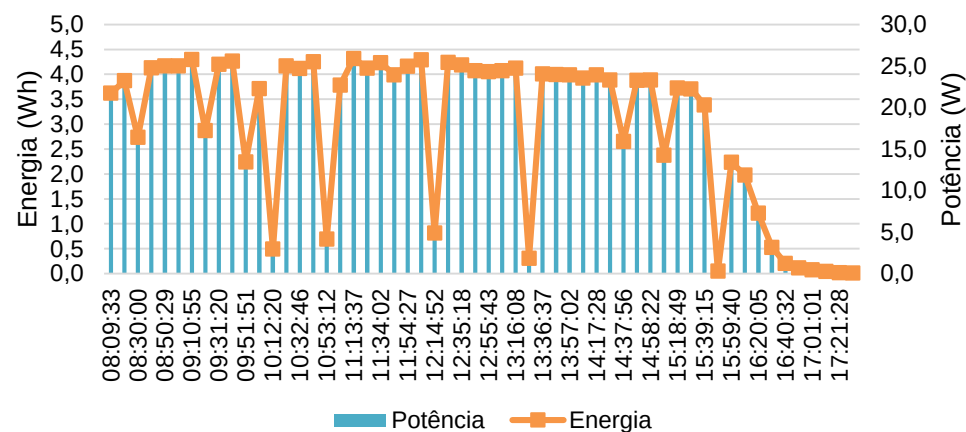
Dia 1 - Sistema estático



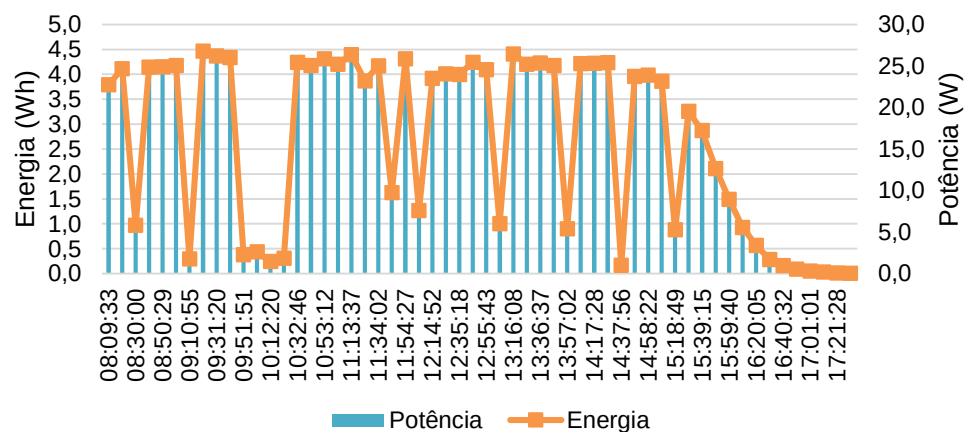
Dia 2 - Sistema estático



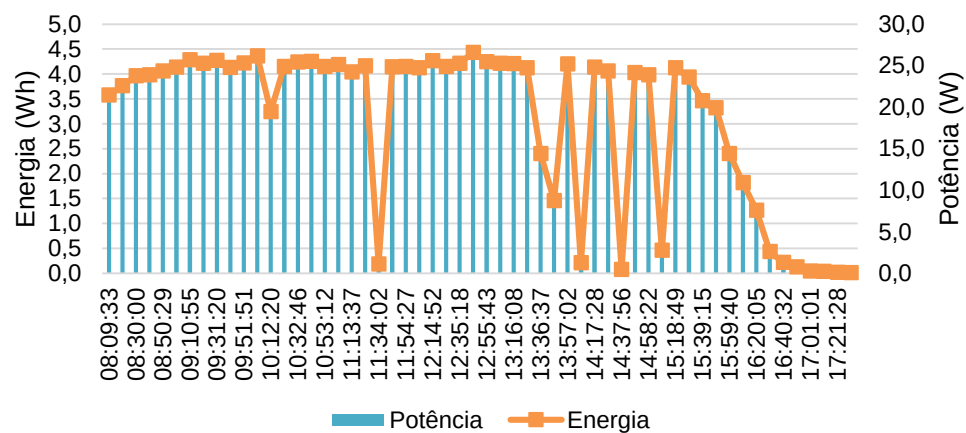
Dia 3 - Sistema estático



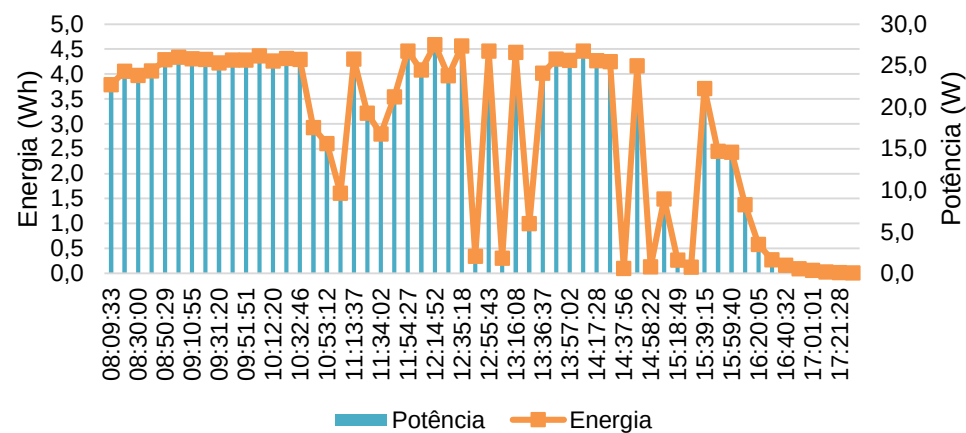
Dia 4 - Sistema estático



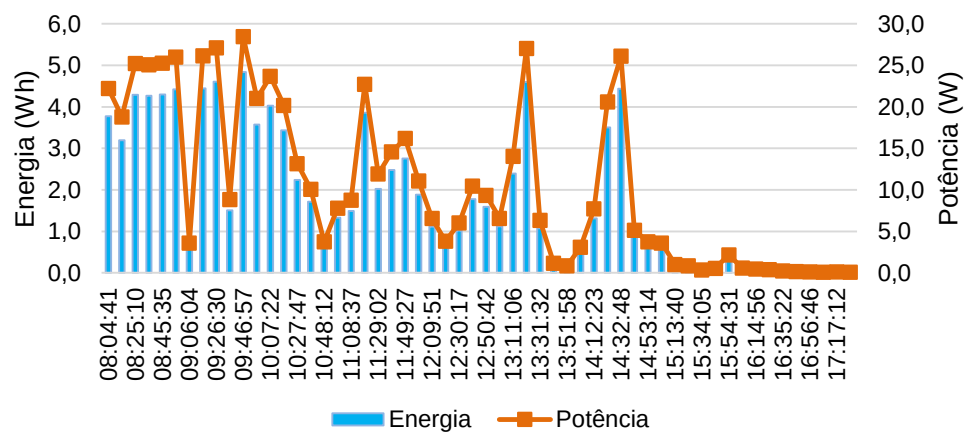
Dia 5 - Sistema estático



Dia 6 - Sistema estático



Dia 7 - Sistema estático



Dia 8 - Sistema estático

