

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS DE ENERGIA

FAUSTO BATISTA FELIX SILVA

**AUTOMATIZAÇÃO DA CAPTAÇÃO DE RAIOS SOLARES PARA  
SISTEMAS FOTOVOLTAICOS ATRAVÉS DO MAPEAMENTO DA  
TRAJETÓRIA DO SOL**

DISSERTAÇÃO

CURITIBA

2019

FAUSTO BATISTA FELIX SILVA

**AUTOMATIZAÇÃO DA CAPTAÇÃO DE RAIOS SOLARES PARA  
SISTEMAS FOTOVOLTAICOS ATRAVÉS DO MAPEAMENTO DA  
TRAJETÓRIA DO SOL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Energia da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do título de “Mestre em Engenharia Elétrica” – Área de Concentração: Automação e Sistemas de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Jair Urbanetz Junior

CURITIBA  
2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

---

Silva, Fausto Batista Felix

Automatização da captação de raios solares para sistemas fotovoltaicos através do mapeamento da trajetória do sol [recurso eletrônico] / Fausto Batista Felix Silva. -- 2019.

1 arquivo texto (113 f.) : PDF ; 3,65 MB.

Modo de acesso: World Wide Web.

Título extraído da tela de título (visualizado em 18 nov. 2019).

Texto em português com resumo em inglês

Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Programa de Pós-graduação em Sistemas de Energia, Curitiba, 2019

Bibliografia: f. 87-90.

1. Sistemas de energia elétrica - Dissertações. 2. Energia solar térmica. 3. Energia - Fontes alternativas. 4. Energia solar. 5. Geração de energia fotovoltaica. 6. Coletores solares. I. Urbanetz Junior, Jair. II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Sistemas de Energia. III. Título.

CDD: Ed. 23 – 621.31

---

Biblioteca Central da UTFPR, Câmpus Curitiba

Bibliotecário: Adriano Lopes CRB-9/1429



Ministério da Educação  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação

## TERMO DE APROVAÇÃO DE DISSERTAÇÃO

A Dissertação de Mestrado intitulada “**Automatização da Captação de Raios Solares para Sistemas Fotovoltaicos Através do Mapeamento da Trajetória do Sol**”, defendida em sessão pública pelo candidato **Fausto Batista Felix Silva**, no dia 18 de novembro de 2019, foi julgada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, **área de concentração** Sistemas de Energia, **Linha de pesquisa** PROCESSAMENTO E ANÁLISE DE ENERGIA, e aprovada em sua forma final, pelo Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Energia.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Jair Urbanetz Junior – Presidente – UTFPR

Prof. Dr. Winderson Eugênio dos Santos – UTFPR

Prof. Dr. Fábio Alencar Schneider – UniBrasil

A via original deste documento encontra-se arquivada na Secretaria do Programa, contendo a assinatura da Coordenação após a entrega da versão corrigida do trabalho.

Curitiba, 18 de novembro de 2019.

Carimbo e Assinatura do(a) Coordenador(a) do Programa

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente à Deus pelo dom da vida e pela capacitação para a conclusão desse grande projeto. A minha esposa Denise e minha filha Cecília pela compreensão nos momentos de ausência, apoio e carinho ao longo dessa jornada. Ao professor Leon Péres, pelo empenho e dedicação no projeto e execução da estrutura mecânica. Pelos colegas de mestrado que sempre estiveram prontos a ajudar tirando dúvidas e ajudando em algumas etapas. Também ao professor Jair Urbanetz por todo apoio ao longo do projeto.

“Fascinante é olhar para o passado e constatar, quantos sacrifícios, quantos esforços, quantas preocupações e quantos obstáculos superados, mas é ainda mais fascinante olhar para o futuro com fé, sabendo que existe um só Deus, que sempre me acompanha mostrando que para ele todas as coisas são possíveis, basta apenas crer, por isso, dedico essa vitória primeiramente a Deus pela vida e durante toda a minha caminhada esteve sempre ao meu lado me carregando em seus braços e operando grandes milagres.”

## RESUMO

SILVA, Fausto B. F. **Automatização da captação de raios solares para sistemas fotovoltaicos através do mapeamento da trajetória do sol.** 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

Em função da crescente demanda na produção de energia elétrica em todo mundo é necessário, pensar em alternativas para suprir a necessidade desse crescimento. Atualmente em diversos países, estão sendo desenvolvidas fontes renováveis de energia, que ajudam a aumentar a produção de energia e em contrapartida colaboram para que essas energias sejam limpas, sem danificar o meio ambiente. Uma das alternativas de energia limpa é a energia solar fotovoltaica, que transforma energia solar em energia elétrica através de módulos fotovoltaicos. Esse trabalho teve como finalidade, desenvolver um seguidor solar que siga a trajetória do sol através do mapeamento do ângulo de inclinação e azimute solar em relação ao norte geográfico, em cada estação do ano. Também comparar seu desempenho em relação a um módulo solar fotovoltaico fixo. O trabalho apresenta um estado da arte mostrando diferentes tipos de seguidores, de um e dois eixos, mostrando seus desempenhos e técnicas de rastreamento. Por fim apresenta os resultados de desempenho do protótipo implementado em cada estação do ano, onde foram coletados os dados entre julho de 2018 e junho de 2019, mostrando o comportamento do seguidor solar de dois eixos onde os resultados mostram um considerável ganho em relação ao módulo fotovoltaico fixo em dias ensolarados chegando a uma média de 35% no verão. Também mostra o comportamento do seguidor solar em um dia nublado e chuvoso onde prevalece a radiação difusa, mostrando que mesmo nessas condições existe ganho na geração do módulo com rastreador.

**Palavras chave:** Energia Solar, Rastreamento automático do sol, mapeamento solar

## ABSTRACT

SILVA, Fausto B. F. **Automation of solar beam capture for photovoltaic systems by mapping the sun's trajectory.** 2019. Dissertation (Master in Electrical Engineering) - Federal Technological University of Parana. Curitiba, 2019.

Due to the growing demand in the production of electricity in the world, it is necessary to think about alternatives to meet the need for this growth. Currently in several countries, renewable energy sources are being developed, which help to increase energy production and on the other hand collaborate so that these energies are clean, without damaging the environment. One of the alternatives of clean energy is photovoltaic solar energy, which transforms solar energy into electrical energy through photovoltaic modules. The purpose of this work was to develop a solar follower that follows the trajectory of the sun through the mapping of the angle of inclination and solar azimuth in relation to the geographic north, in each season of the year. Also compare its performance in relation to a fixed photovoltaic solar module. The work presents a state of the art showing different types of followers, one and two axes, showing their performances and tracing techniques. Finally, it presents the performance results of the prototype implemented in each season of the year, where data were collected between July 2018 and June 2019, showing the behavior of the solar follower of two axes where the results show a considerable Gain in relation to the fixed photovoltaic module on sunny days reaching an average of 35% in the summer. also shows the behavior of the solar follower on a cloudy and rainy day where diffuse radiation prevails, showing that even in these conditions there is gain in the generation of the module with Tracer.

**Keywords:** Solar Energy, Automatic Sun Tracking. solar mapping

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Mapa de Irradiação e Produtividade para o Paraná e Europa - Valores Anuais .....	22
Figura 2 - Componentes da irradiância solar.....	25
Figura 3 - Total diário da irradiação global horizontal (média anual).....	25
Figura 4 - Total diário da irradiação direta normal (média anual) .....	26
Figura 5 - Total diário da irradiação no plano inclinado da latitude (média anual) .....	26
Figura 6 - Estrutura de uma célula fotovoltaica .....	27
Figura 7 - Célula de Silício Monocristalino .....	28
Figura 8 - Célula de Silício Policristalino .....	29
Figura 9 - Célula de Filmes Finos.....	30
Figura 10 - Curva I/V.....	32
Figura 11 - Componentes do SFVI.....	35
Figura 12 - Movimento da Terra ao redor do Sol e as estações do ano para o hemisfério Sul	37
Figura 13 - Órbita da Terra em torno do Sol, com seu eixo N-S inclinado de um ângulo de 23,45° .....	38
Figura 14 - Posição do sol em relação aos ângulos azimutal, zenital e da altura solar.....	39
Figura 15 - Ilustração dos ângulos $\theta_z$ , $\alpha$ e $\gamma_s$ .....	40
Figura 16 - Ilustração dos ângulos $\beta$ , $\gamma$ , $\gamma_s$ e $\theta$ .....	41
Figura 17 - (a) Irradiância direta incidente sobre uma superfície horizontal; (b) Irradiância direta incidente sobre uma superfície inclinada. ....	42
Figura 18 - Sistemas de seguimento solar de um (a, b) e dois (c) eixos .....	43
Figura 19 - Arquitetura de controle de rastreamento solar e diagrama de blocos .....	43
Figura 20 - Seguidor do ângulo de inclinação solar .....	45
Figura 21 - Seguidor solar no eixo vertical .....	45
Figura 22 - Exemplos de rastreadores de eixo polar usados em tecnologias de rastreamento solar .....	46
Figura 23 - Seguidor 2-eixos MPPT .....	46
Figura 24 - Comparativo de potência ao longo do dia.....	48
Figura 25 - Comparativo de potência entregue .....	49
Figura 26 - Radiação em um dia típico de verão.....	49
Figura 27 - Gráfico das curvas de tensão e potência dos conjuntos .....	50
Figura 28 - Diagrama de blocos do sistema .....	51
Figura 29 - Posicionamento dos sensores LDR.....	51

Figura 30 - Diagrama do Sistema .....	52
Figura 31 - Trajetória do Sol - 07h .....	54
Figura 32 - Trajetória do Sol - 10h .....	55
Figura 33 - Trajetória do Sol - 12h .....	55
Figura 34 - Trajetória do Sol - 15h .....	55
Figura 35 - Trajetória do Sol - 17h .....	56
Figura 36 - Diagrama Solar de Curitiba.....	56
Figura 37 - Movimento aparente do sol .....	57
Figura 38 - Estrutura mecânica do seguidor solar .....	58
Figura 39 - Estrutura Superior .....	58
Figura 40 - Estrutura Inferior .....	59
Figura 41 - Sistema de redução para movimentação .....	60
Figura 42 - Acoplamento da estrutura com o redutor .....	60
Figura 43 - Instalação da estrutura mecânica no solo .....	61
Figura 44 - Implementação do seguidor de 2 eixos .....	61
Figura 45 - Fuso para movimentação vertical .....	62
Figura 46 - Instalação do módulo fixo ao lado do seguidor.....	62
Figura 47 - Elementos para automatização do seguidor .....	63
Figura 48 - Esquema de ligação do motor, driver e Arduino .....	64
Figura 49 - Elementos para aquisição de dados – (a) RTC, (b) Módulo de relé, (c) SD card, (d) Resistor <i>shunt</i> .....	66
Figura 50 - Circuito de aquisição de dados .....	66
Figura 51 - Circuito de automatização e aquisição.....	67
Figura 52 - Ensaio do módulo fotovoltaico.....	68
Figura 53 - Curva I-V do módulo ensaiado.....	69
Figura 54 - Circuito complementar para aquisição de dados .....	70
Figura 55 - Trapézios para integração de uma curva de potência. ....	71
Figura 56 - Comparativo de Potência (17/07/18) .....	74
Figura 57 - Comparativo de Potência (14/08/18) .....	75
Figura 58 - Comparativo de Potência (25/09/18) .....	76
Figura 59 - Comparativo de potência (02/03/2019).....	77
Figura 60 - Comparativo de Potência (30/04/19) .....	78
Figura 61- Comparativo de Potência em dia nublado/chuvoso .....	79

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Característica Solar.....	36
Tabela 2 - Variação de ângulo x Horas do dia .....	65
Tabela 3 - Índices de mérito (17/07/18).....	74
Tabela 4 - Índices de mérito (14/08/18).....	75
Tabela 5 - Índices de mérito (25/09/2018).....	76
Tabela 6 - Índices de mérito (02/03/2019).....	77
Tabela 7 - Índices de mérito (30/04/19).....	78
Tabela 8 - Índices de mérito (dia nublado/chuvoso).....	80
Tabela 9 - Comparação do desempenho em diferentes estações.....	82
Tabela 10 - Comparação da potência consumida entre CLP e Arduino .....	83

## LISTA DE ABREVIATURAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
FV	Fotovoltaico
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
MME	<i>Maximum Power Point</i> (Ponto de Máxima Potência)
NBR	Norma Brasileira
NREL	<i>National Renewable Energy Laboratory</i> (Laboratório Nacional de Energia Renovável)
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
OPV	Células Solares Fotovoltaicas Orgânicas
RTC	<i>Real Time Clock</i>
SFVI	Sistema Fotovoltaico Isolado
SFVCR	Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica
SIN	Sistema Interligado Nacional
SWERA	<i>Solar and Wind Energy Resource Assessment</i> (Avaliação de recursos solares e eólicos)
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

## LISTA DE SÍMBOLOS

$G$	Irradiância solar
$G_{DIR}$	Irradiância direta
$G_{DIF}$	Irradiância difusa
$G_{HOR}$	Irradiância global
$G_{ALB}$	Albedo
$G_{TOT}$	Irradiância total
$I / H$	Irradiação solar
$I_{DIF}$	Irradiação difusa
$I_{DIR}$	Irradiação direta
$I_{HOR}$	Irradiação global
$I_{TOT}$	Irradiação total
$I_{SC}$	Corrente de curto circuito
$V_{oc}$	Tensão de circuito aberto
STC	Condições – padrão de referência para ensaio
AM	Massa de ar
$P_{mp}$	Potência máxima
$W_p$	Potência de pico
$H_{TOT}$	Irradiação solar incidente no plano dos módulos fotovoltaicos
kWh	Quilowatt - Hora
kWp	Quilowatt - Pico
MW	Megawatt
MWh	Megawatt - Hora
MWp	Megawatt - Pico
PFV	Potência do painel fotovoltaico
$\theta_Z$	Ângulo Zenital
$\alpha$	Altura Solar
$\gamma_s$	Ângulo Azimutal do Sol
$\gamma$	Ângulo Azimutal da Superfície
$\beta$	Inclinação da superfície de captação
$\theta$	Ângulo de incidência
$\delta$	Declinação solar

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
1.1 PROBLEMA .....	16
1.2 OBJETIVOS .....	17
<b>1.2.1 Objetivo Geral .....</b>	<b>17</b>
<b>1.2.2 Objetivos Específicos.....</b>	<b>17</b>
1.3 JUSTIFICATIVA.....	17
1.4 MATERIAIS E MÉTODOS .....	18
1.5 DELIMITAÇÃO DO ESTUDO .....	19
1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	20
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>21</b>
2.1 ENERGIA SOLAR .....	21
2.2 COMPARAÇÃO ENTRE POTENCIAIS SOLARES.....	21
2.3 RADIAÇÃO SOLAR.....	22
2.4 IRRADIÂNCIA .....	22
2.5 IRRADIAÇÃO.....	23
2.6 CÉLULAS FOTOVOLTAICAS.....	27
2.7 TIPOS DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS .....	28
<b>2.7.1 Célula de Silício Monocristalino .....</b>	<b>28</b>
<b>2.7.2 Célula de Silício Policristalino .....</b>	<b>29</b>
<b>2.7.3 Filmes Finos.....</b>	<b>29</b>
2.7.3.1 Silício Amorfo.....	30
2.7.3.2 Filme Fino de Silício Microcristalino .....	30
<b>2.7.4 Células de Telureto de Cadmio.....</b>	<b>30</b>
<b>2.7.5 Células de CIGS .....</b>	<b>31</b>
2.8 CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS .....	31
<b>2.8.1 Índices de Mérito para Avaliação do Desempenho de Sistemas Fotovoltaicos ..</b>	<b>32</b>
<b>2.8.2 Produtividade (<i>Final Yiel</i>).....</b>	<b>33</b>
<b>2.8.3 Fator de Capacidade .....</b>	<b>33</b>
<b>2.8.4 Desempenho Global (<i>Performance Ratio</i>).....</b>	<b>34</b>
2.9 SISTEMA FOTOVOLTAICO ISOLADO – SFVI.....	34
<b>2.9.1 Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica – SFVCR .....</b>	<b>35</b>
2.10 INVERSORES .....	35
2.11 TRAJETÓRIA SOLAR.....	36

2.11.1	Ângulo Azimutal.....	37
2.11.2	Altitude Solar.....	37
2.11.3	Ângulos da Trajetória Solar .....	38
2.11.4	Ângulo de Incidência Solar .....	41
2.12	SEGUIDORES SOLARES.....	42
2.12.1	Automatização de Seguidores Solares .....	43
2.12.2	Tipos de Seguidores solares.....	44
2.12.3	Desempenho de Seguidores Solares .....	47
<b>3.</b>	<b>DESENVOLVIMENTO .....</b>	<b>54</b>
3.1	TRAJETÓRIA SOLAR.....	54
3.2	TRAJETÓRIA SOLAR DURANTE O ANO .....	56
3.3	ESTRUTURA DO PROTÓTIPO .....	57
3.3.1	Estrutura Mecânica.....	57
3.3.2	Sistema de Movimentação com redutor .....	59
3.3.3	Implementação do Protótipo.....	60
3.3.4	Módulo Fotovoltaico Fixo .....	62
3.4	DESENVOLVIMENTO DA AUTOMATIZAÇÃO DE MOVIMENTAÇÃO .....	63
3.4.1	Aquisição de Dados .....	65
3.5	DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DOS MÓDULOS FOTVOLTAICOS .....	68
3.6	CIRCUITO COMPLEMENTAR PARA PARA AQUISIÇÃO DE DADOS .....	69
3.7	ENERGIA GERADA PELO MÓDULO FOTVOLTAICO.....	71
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>73</b>
4.1	ANÁLISE DE DESEMPENHO NO INVERNO.....	74
4.2	ANÁLISE DE DESEMPENHO NA PRIMAVERA .....	76
4.3	ANÁLISE DE DESEMPENHO NO VERÃO.....	77
4.4	ANÁLISE DE DESEMPENHO NO OUTONO.....	78
4.5	ANÁLISE DE DESEMPENHO EM DIA NUBLADO/CHUVOSO .....	79
4.6	COMPARAÇÃO DE GANHO ENTRE SEGUIDORES SOLARES .....	80
4.7	DESEMPENHO DO SISTEMA EM DIFERENTES ESTAÇÕES.....	81
4.8	DEMANDA DE POTÊNCIA CONSUMIDA POR SEGUIDOR SOLAR .....	82
4.9	CONSIDERAÇÕES PARA APLICAÇÃO DE SEGUIDOR SOLAR.....	83
4.10	INDICAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	84
<b>5.</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>85</b>

<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>87</b>
<b>ANEXO A - Folha de dados técnicos do módulo fotovoltaico KYOCERA KC130TM. ....</b>	<b>91</b>
<b>APÊNDICE A – Código de programação de movimentação do módulo fotovoltaico .....</b>	<b>93</b>
<b>APÊNDICE B – Fluxograma da lógica de programação da comutação dos relés .....</b>	<b>108</b>
<b>APÊNDICE C – Rotina de programação de aquisição de dados .....</b>	<b>109</b>
<b>APÊNDICE D – Levantamento da curva I-V .....</b>	<b>110</b>
<b>APÊNDICE E – Projeto mecânico do seguidor solar.....</b>	<b>111</b>
<b>APÊNDICE F – Circuito do arduino com rtc e sd <i>card</i> .....</b>	<b>112</b>
<b>APÊNDICE G – Circuito de aquisição de dados .....</b>	<b>113</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A energia elétrica desde o princípio teve como uma das principais missões fornecer energia para consumidores residenciais, comerciais e industriais através da geração centralizada e transmitida por longas distâncias e posteriormente ser distribuída. Diante de um cenário da crescente demanda de energia, as fontes renováveis de energia vêm como uma solução inovadora quando se trata de aspectos ambientais. Diante disso, os sistemas fotovoltaicos interligados à rede elétrica vêm crescendo em importância e aplicação em todo mundo como uma solução para produção de energia limpa (RÜTHER, 2004).

A energia solar pode ser aproveitada de duas formas, como energia fototérmica, que consiste na captação da irradiação solar e na conversão direta em calor com o objetivo de aquecer a água utilizando diretamente o calor do sol, sem a necessidade da utilização de outros recursos. Também outra forma de utilização é da energia solar fotovoltaica que consiste na conversão direta da luz em energia elétrica pelo efeito fotovoltaico. O que difere as duas formas de utilização de energia solar é que ao contrário do sistema fototérmico que é empregado para aquecimento, os sistemas fotovoltaicos têm a capacidade de captar diretamente a luz solar e produzir diferença de potencial através de módulos fotovoltaicos fixas em telhados e fachadas, processada por dispositivos controladores e conversores, podendo ser armazenada em baterias ou utilizada diretamente em sistemas conectados à rede elétrica. (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

### 1.1 PROBLEMA

As questões climáticas e energéticas têm ganhado cada vez mais destaque nas últimas décadas, por isso é importante estudar e desenvolver alternativas energéticas limpas e renováveis, que possam atender as necessidades atuais de forma rentável e economicamente competitiva (CORTEZ, 2013).

Hoje a energia produzida por esse sistema de captação, tem sua eficiência energética um tanto quanto limitada em função do quanto de luz cada módulo fotovoltaico é capaz de captar devida sua instalação ser de forma fixa. Em função do ângulo de inclinação do módulo em ser fixo não se consegue maximizar a captação dos raios solares em todos os dias ou meses do ano nem ao longo do dia, fazendo-se necessário adotar um ângulo que possibilite uma produção média de energia em todas as estações do ano, pois com a escolha incorreta da inclinação, reduz

a captação dos raios solares e compromete a produção de energia elétrica pelo módulo fotovoltaico. Diante desse cenário, empregando geradores fotovoltaicos que possuam sistemas de rastreamento da trajetória do sol podem ser utilizados para otimizar a captação da radiação solar por uma superfície. Esses sistemas são em sua maioria automáticos, com os mais diversos arranjos e estratégias (PINHO; GALDINO, 2014).

## 1.2 OBJETIVOS

Nesta seção são apresentados os objetivos geral e específicos do trabalho, relativos ao problema anteriormente apresentado.

### 1.2.1 Objetivo Geral

Este projeto tem como objetivo apresentar uma proposta de automatização do rastreamento da captação de raios solares através do melhor ângulo de incidência solar aumentando sua eficiência energética levantando as características necessárias para a automatização desse processo.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Mapear o ângulo de inclinação solar em diferentes dias e estações do ano;
- Comparar a eficiência energética de módulos fotovoltaicos que são instalados em ângulos fixos com os módulos que são instalados com rastreadores de dois eixos em quatro dias diferentes (um dia para cada estação);
- Projetar e implementar um protótipo de seguidor solar de dois eixos;

## 1.3 JUSTIFICATIVA

A maior parte dos sistemas fotovoltaicos são constituídos por módulos que possuem ângulo fixo de inclinação. Com os módulos em inclinação fixa não se consegue maximizar a captação dos raios solares em todos os dias ou meses do ano, fazendo-se necessário adotar um ângulo que possibilite uma razoável produção média de energia ao longo do ano e ao longo do dia. Sabe-se que a geometria solar em relação a determinada localização é tal que o sol sobe no

céu oriental e se põe no céu ocidental, seguindo um determinado caminho quando visto de uma determinada localização geográfica (posição GPS). Um mecanismo de rastreamento solar usa informações sobre a posição do sol naquele local direcionando os módulos fotovoltaicos para apontar para o sol. Para este propósito, a localização solar e sua trajetória de movimento de um determinado perspectiva geográfica precisa ser cuidadosamente estudada, analisada e compreendida (PRINSLOO; DOBSON, 2014).

Um sistema de automatização para a captação de raios solares para sistemas fotovoltaicos ou o rastreamento automático a partir do mapeamento da posição do sol pode otimizar o ângulo de incidência de raios solares automaticamente ao longo do dia e ao longo dos meses do ano levando em consideração que devido à existência do ângulo de declinação solar, o sol nasce e se põe em diferentes pontos do céu e descreve uma trajetória com inclinação diferente em cada dia do ano.

A automatização do processo aumentará a captação de energia nos módulos solares rastreando o movimento do sol tendo assim maior eficiência energética, pois fará com que os módulos fotovoltaicos estejam sempre recebendo os raios solares com melhor ângulo de incidência possível.

#### 1.4 MATERIAIS E MÉTODOS

Essa pesquisa é caracterizada como quantitativa onde Mattar (2001), apresenta que a pesquisa quantitativa busca a validação das hipóteses mediante a utilização de dados estruturados, estatísticos, com análise de um grande número de casos representativos, recomendando um curso final da ação. Ela quantifica os dados e generaliza os resultados da amostra para os interessados. Em termos de classificação do projeto, este é um trabalho que busca uma resposta ao problema objeto deste estudo, ou seja, o desenvolvimento desse trabalho será composto por algumas etapas que envolvem: a automatização do processo de captação de energia solar, o mapeamento da trajetória do sol em dias e estações diferentes do ano, a implementação do projeto e a medição de energia gerada por módulos fixos e com rastreador de 2 eixos.

Para o mapeamento da trajetória do sol, o estudo contará com um *software* em função de que para uma análise completa é necessária ter o mapeamento de todos os períodos e estações do ano. A implementação contará com 2 módulos fotovoltaicos (uma para ângulo fixo e outro para o seguidor de dois eixos), uma estrutura mecânica para montar ambos os sistemas, motor para movimentação do eixo horizontal do módulo fotovoltaico, um Arduino para inserir os

dados de quando os motores devem ser acionados movimentando o sistema e também um sistema para aquisição e armazenamento de sinais de tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ) e a corrente de curto-circuito ( $I_{sc}$ ) de ambos os módulos para que se possa a partir desses valores seja possível calcular a potência de cada um.

Através da trajetória do sol, é possível determinar as variações do ângulo de incidência, é possível controlar o ângulo dos módulos fotovoltaicos sem a necessidade de sensores. Será desenvolvido um rastreador solar de dois eixos onde será desenvolvida uma estrutura mecânica para instalação do módulo bem como também eixos acoplados em motores que farão a movimentação do módulo. Essa estrutura será instalada em um espaço livre de sombreamento e que durante todo período do dia possui uma boa incidência solar. O controle será feito a partir de um Arduino, onde sua programação se limitará em inserir as informações de tempo e variação de ângulo do módulo e enviar um sinal de saída para um motor em tempos pré-determinados correspondentes ao tempo da mudança do ângulo de incidência solar. Em função do controlador necessitar apenas de pulsos em intervalos programados, a maior parte do tempo a CPU de controle de controle estará no modo *sleep* o que faz ter um baixo consumo de energia. Para a programação do controlador utiliza-se um RTC (*Real Time Clock*) onde é possível ativar os pulsos programando horas, dias, meses e anos o que faz ficar inoperante quando não há a necessidade de enviar um sinal na saída.

O sistema de aquisição de dados também será através de um Arduino que diariamente coletará amostras de  $V_{oc}$  e  $I_{sc}$ , em um intervalo de tempo, para ambos os módulos, fixo e móvel. Esses dados serão armazenados em uma planilha, atualizada a cada nova medição em uma pasta compartilhada via internet, assim será possível calcular o valor de potência para que se possa comparar os dois sistemas.

## 1.5 DELIMITAÇÃO DO ESTUDO

Segundo Pinho e Galdino (2014) a potência máxima de geração de um módulo fotovoltaico, expressa em Wp (Watt-pico), é alcançada somente quando o mesmo é submetido a condições físicas ideais, denominadas STC (do inglês, *Standard Test Conditions*), incluindo irradiância solar de  $1000\text{W/m}^2$ .

O estudo objetiva focar automatizar esse processo buscando referências de soluções aplicadas para esse problema e dentro dessas referências apontar melhorias que possam ser feitas para que haja uma melhoria na captação de energia e como consequência ter uma melhor eficiência nesse sistema.

## 1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho terá a estrutura abaixo apresentada.

**Capítulo 1 - Introdução:** são apresentados o tema, as delimitações do estudo, o problema, os objetivos da pesquisa, a justificativa, os procedimentos metodológicos, as indicações para o embasamento teórico e a estrutura geral do trabalho.

**Capítulo 2 – Fundamentação Teórica:** são abordados os fundamentos de funcionamento, as diferentes tecnologias e os dispositivos utilizados na automatização do sistema, bem como também uma fundamentação sobre a trajetória solar.

**Capítulo 3 – Desenvolvimento:** mostra o mapeamento solar para determinar a trajetória solar, as características para o desenvolvimento do projeto como, a montagem mecânica dos sistemas que serão comparados a geração de energia (sistema fixo e seguidor de dois eixos), a instalação do motor de passo que fará a movimentação do módulo no sistema seguidor, também apresentará as etapas da programação para inserir no controlador as informações da trajetória solar e a aplicação de um sistema para aquisição de sinal para cálculo da geração de energia, tanto para o sistema fixo como para o seguidor de dois eixo para assim ser possível obter resultados.

**Capítulo 4 – Resultados e discussões:** são discutidos os resultados obtidos com o sistema de rastreamento automático de captação solar, com base nas especificações inicialmente propostas.

**Capítulo 5 – Considerações finais:** são retomados a pergunta de pesquisa e os seus objetivos e apontado como foram solucionados, respondidos, atingidos, por meio do trabalho realizado. Além disto, são sugeridos trabalhos futuros que podem ser realizados a partir do estudo realizado.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 ENERGIA SOLAR

Dentre as diversas aplicações da energia solar, a geração direta de eletricidade através do efeito fotovoltaico se apresenta como uma das mais eficientes formas de gerar potência elétrica para o consumo (RÜTHER, 2004).

Entretanto, além de sua aplicação na geração de energia elétrica através dos módulos fotovoltaicos, a energia solar pode ser aproveitada também para conversão térmica no aquecimento de água além de aproveitar também, para geração de energia elétrica através de usinas heliotérmicas, também chamada de geração solar térmica concentrada através do efeito fotovoltaico.

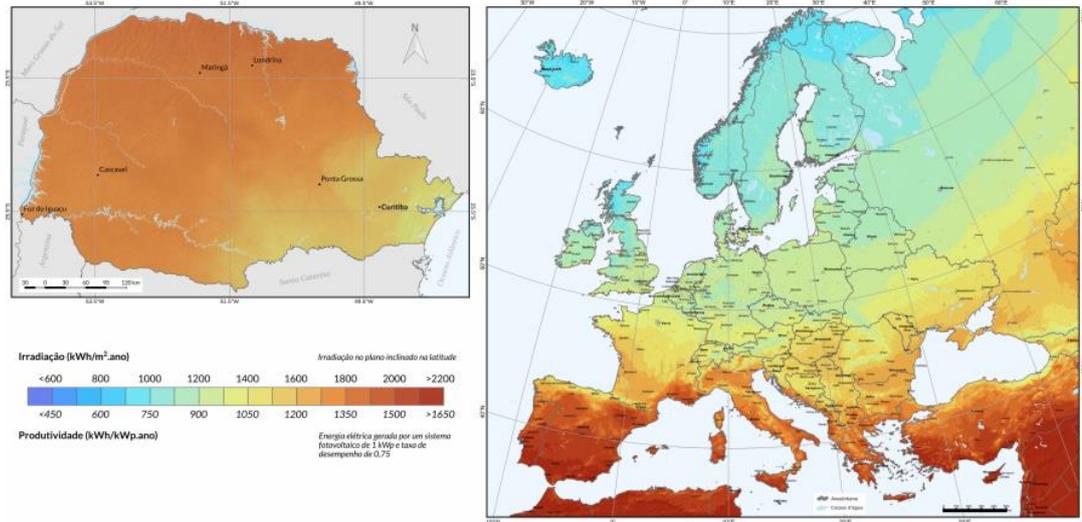
Porém de acordo com PEREIRA et al., 2017, a energia solar não é um recurso renovável devido sua energia ser consequência das reações de fusão nuclear dos átomos de Hidrogênio (representam cerca de 75% da composição do Sol) para formar Hélio (cerca de 25% da composição do Sol). Contudo, se for considerada a escala de tempo da vida no planeta Terra, pode-se considerar que a energia proveniente do Sol é inesgotável.

### 2.2 COMPARAÇÃO ENTRE POTENCIAIS SOLARES

O potencial de geração de energia elétrica por fonte solar fotovoltaica no Estado do Paraná tem sido um tema bastante discutido no últimos ano onde é apontado e demonstrado em recentes pesquisas realizadas e diante desse cenário, essa fonte de energia foi amplamente impulsionada no estado (TIEPOLO, G. M. *et al.*, 2017).

Fazendo uma comparação com regiões da Europa que são referências na aplicação de geração solar fotovoltaica, como Alemanha, Itália, Reino Unido, França e Espanha que juntos, esses países representam, aproximadamente, 28% da capacidade instalada global em sistemas fotovoltaicos é possível evidenciar que no Estado do Paraná esse potencial é ainda mais evidente (TIEPOLO, G. M. *et al.*, 2017). A Figura 1 mostra uma comparação dos dados de irradiação e de produtividade estimada anual do Estado do Paraná com os da Europa.

Figura 1- Mapa de Irradiação e Produtividade para o Paraná e Europa - Valores Anuais



Fonte: TIEPOLO, G. M. *et al.*, 2017

## 2.3 RADIAÇÃO SOLAR

É a radiação que atinge a superfície horizontal do solo, composta pela radiação direta e pela radiação difusa. A radiação direta corresponde aos raios de sol que chegam diretamente na superfície, e, por sua vez, a radiação difusa corresponde aos raios de sol que chegam indiretamente à superfície devido à poeira, nuvens ou outros possíveis objetos (VILLALVA; GAZOLI, 2012). O espectro de radiação solar no qual se inclui ondas visíveis e não visíveis atinge a superfície terrestre atravessando centenas de milhares de quilômetros até chegar à terra (REIS; PHILIPPI, 2016).

## 2.4 IRRADIÂNCIA

A irradiância é uma grandeza que quantifica a densidade de radiação solar e, é expressa em W/m<sup>2</sup> (Potência por Área) (VILLALVA; GAZOLI, 2012). A potência solar por unidade de área e tempo radiante na camada acima da atmosfera é de 1.366 W/m<sup>2</sup> (denominada de constante solar). Em condições de céu limpo, a máxima irradiância medida na superfície terrestre é de 1000 W/m<sup>2</sup> (ALDABÓ, 2002).

## 2.5 IRRADIAÇÃO

A irradiação é a grandeza usada para medir a energia solar incidente sobre uma área por um determinado tempo ( $\text{Wh/m}^2$ ), que expressa energia por área. Esta medida é útil para fazer dimensionamentos dos sistemas fotovoltaicos, pois pode definir o recurso solar disponível em uma região específica (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

Com o intuito de padronizar e de definir os principais termos técnicos sobre energia solar no Brasil, foi elaborada a norma NBR 10899:2006 intitulada Terminologia sobre Energia Solar Fotovoltaica (ABNT, 2006).

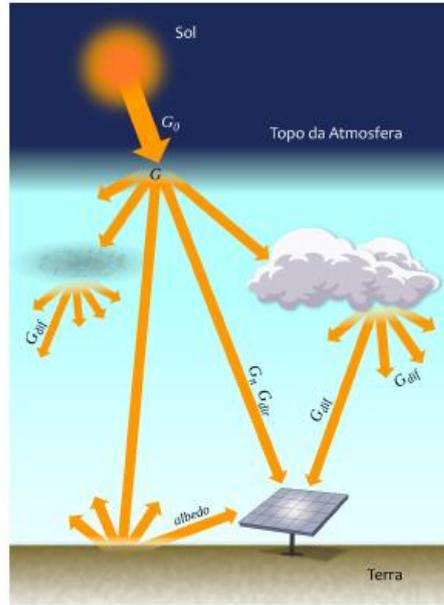
A partir dessa norma, são citados, a seguir, os termos mais relevantes para esse trabalho, bem como as respectivas definições.

- **Irradiância solar ( $G$ )** - Taxa na qual a radiação solar incide em uma superfície, por unidade de área, normalmente medida em watt por metro quadrado ( $\text{W/m}^2$ ).
- **Irradiância direta ( $G_{\text{DIR}}$ )** - Irradiância solar incidente em uma superfície, sem ter sido espalhada pela atmosfera, podendo ser horizontal ou normal ( $\text{W/m}^2$ ).
- **Irradiância difusa ( $G_{\text{DIF}}$ )** - Potência radiante do céu, recebida em uma unidade de área em uma superfície horizontal, excluída a irradiância direta ( $\text{W/m}^2$ ).
- **Irradiância global ( $G_{\text{HOR}}$ )** - Potência radiante solar, recebida em uma unidade de área em uma superfície horizontal, que é igual à irradiância direta mais a irradiância difusa ( $\text{W/m}^2$ ).
- **Albedo ( $G_{\text{ALB}}$ )** - Índice relativo à fração da energia radiante solar, recebida em uma unidade de área, devido à refletância dos arredores e do solo onde está instalado um dispositivo (%).
- **Irradiância total ( $G_{\text{TOT}}$ )** - Potência radiante solar total com as componentes direta, difusa e de albedo, recebida em uma unidade de área em uma superfície com inclinação qualquer ( $\text{W/m}^2$ ).
- **Irradiação solar ( $I$  ou  $H$ )** - Irradiância solar integrada durante um intervalo de tempo especificado, normalmente uma hora ou um dia, é medida em watt hora por metro quadrado ou Joule por metro quadrado ( $\text{Wh/m}^2$  ou  $\text{J/m}^2$ ). É simbolizada por “**I**”, quando integrada em uma hora e por “**H**”, quando integrada em um dia ( $\text{J/m}^2$ ).
- **Irradiação difusa ( $I_{\text{DIF}}$  ou  $H_{\text{DIF}}$ )** - Irradiância difusa integrada durante um intervalo de tempo especificado ( $\text{J/m}^2$ ).

- **Irradiação direta ( $I_{DIR}$  ou  $H_{DIR}$ )** - Irradiância direta integrada durante um intervalo de tempo especificado ( $J/m^2$ ).
- **Irradiação global ( $I_{HOR}$  ou  $H_{HOR}$ )** - Irradiância global integrada durante um intervalo de tempo especificado ( $J/m^2$ ).
- **Irradiação total ( $I_{TOT}$  ou  $H_{TOT}$ )** - Irradiância total integrada durante um intervalo de tempo especificado ( $J/m^2$ ).
- **Corrente de curto – circuito ( $I_{sc}$ )** - Corrente de saída de um conversor fotovoltaico, na condição de curto-circuito e para valores preestabelecidos de temperatura e irradiância total (A).
- **Tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ )** - Tensão gerada através de um conversor fotovoltaico sem carga (aberto), para valores preestabelecidos de temperatura e irradiância total (V).
- **Condições – padrão de referência para ensaio (STC)** - Temperatura de junção da célula em  $25^{\circ}C$ , irradiância total de  $1.000 W/m^2$  normal à superfície de ensaio com espectro de massa de ar 1,5.
- **Massa de ar (AM)** – Espessura da camada atmosférica a ser atravessada pela energia radiante do sol.
- **Potência máxima ( $P_{mp}$ )** - Potência em um ponto da curva característica de um conversor fotovoltaico, onde o produto da corrente ( $I$ ) pela tensão ( $V$ ) é máximo, no quadrante de geração (W).
- **Potência de pico ( $W_p$ )** - Potência nominal de saída de um conversor fotovoltaico, sob as condições padrão de referência para ensaio (W).

Parte da radiação solar que entra na atmosfera da Terra é absorvida e espalhada, sendo que a radiação direta vem em uma linha direta do sol, enquanto que a radiação difusa é espalhada para fora do feixe direto por moléculas, aerossóis e nuvens (NREL, 2016). A Figura 2 ilustra a irradiância assim que atinge a atmosfera e seu espalhamento.

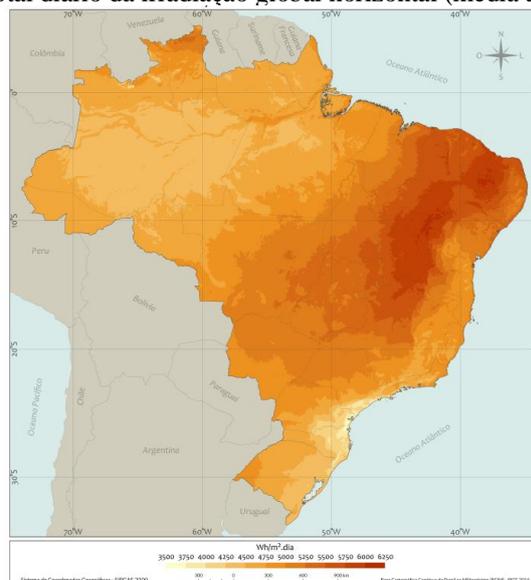
Figura 2 - Componentes da irradiância solar



Fonte: ABREU, S. L *et al.*, 2017

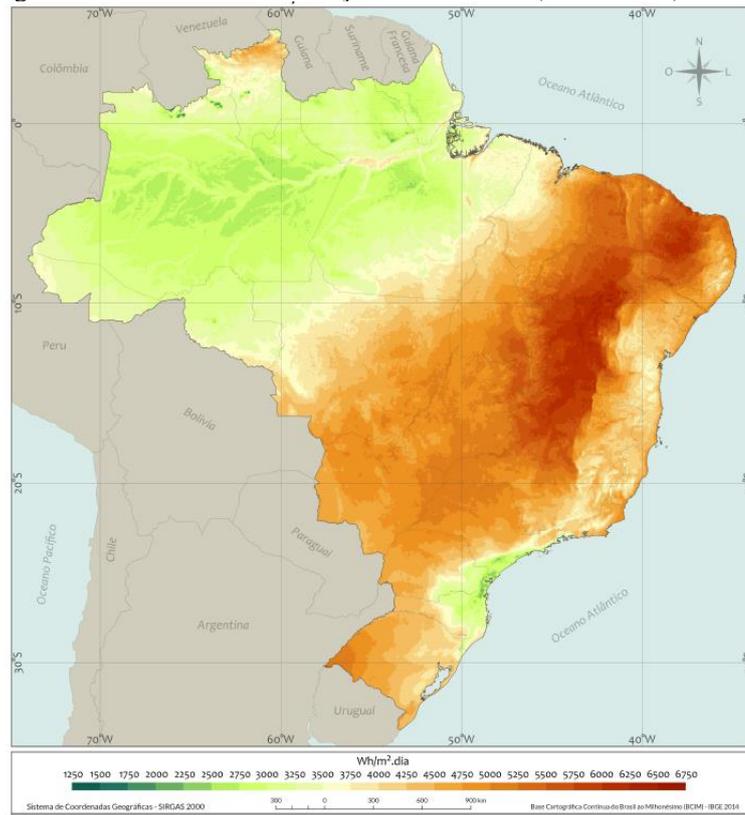
Foi publicado no ano de 2017 a segunda edição do Atlas Brasileiro de Energia Solar que mostra algumas componentes de irradiação solar com as estimativas obtidas pelo modelo BRASIL-SR, sendo estas o total diário da irradiação global horizontal ( $H$ ), o total diário da irradiação direta normal ( $H_n$ ) e o total diário da irradiação no plano inclinado na latitude ( $H_i$ ), conforme mostram as Figuras 3, 4 e 5.

Figura 3 - Total diário da irradiação global horizontal (média anual)



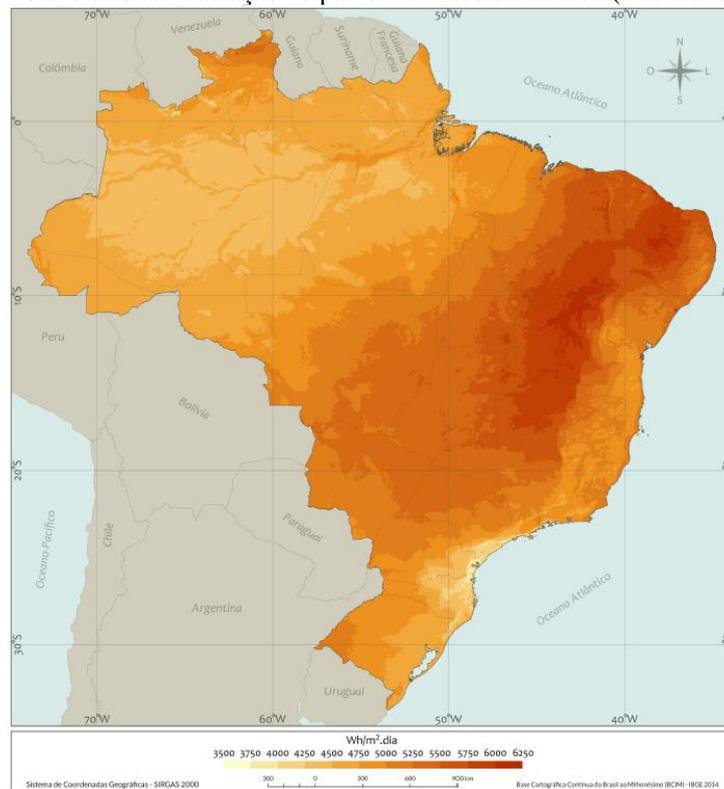
Fonte: ABREU, S. L *et al.*, 2017

Figura 4 - Total diário da irradiação direta normal (média anual)



Fonte: ABREU, S. L *et al.*, 2017

Figura 5 - Total diário da irradiação no plano inclinado da latitude (média anual)



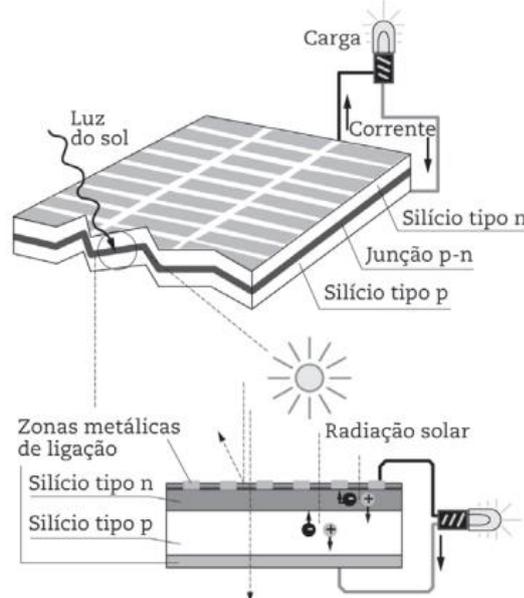
Fonte: ABREU, S. L *et al.*, 2017

## 2.6 CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

O Efeito Fotovoltaico é um fenômeno físico no qual a luz solar é convertida em eletricidade que ocorre quando, a luz ou radiação eletromagnética do sol que é composta de fótons que possui grande quantidade de energia incide em uma célula que possui em sua composição materiais semicondutores. Os materiais semicondutores da célula geralmente de silício são do tipo N e o tipo P, embora ambos os materiais sejam eletricamente neutros, o silício tipo N tem elétrons (-) em excesso e o tipo P (+) tem lacunas em excesso. Intercalando estes, cria-se uma junção P-N e um campo elétrico. Quando estes dois semicondutores são intercalados, os elétrons em excesso do tipo N fluem para o semicondutor do tipo P, e os elétrons que deixaram o tipo N criam então lacunas no mesmo. Pelo fluxo de elétrons e lacunas, os dois semicondutores agem como uma bateria e criam um campo elétrico na junção P-N. É este campo que faz com que os elétrons fiquem disponíveis para o circuito elétrico. No mesmo instante, as lacunas se movem para a direção oposta, para a superfície positiva onde elas esperam elétrons livres (ZILLES et al., 2012).

A Figura 6 mostra a Estrutura de uma célula fotovoltaica composta por um material semicondutor com camadas P e N.

Figura 6 - Estrutura de uma célula fotovoltaica



Fonte: ZILLES *et al.*, 2012

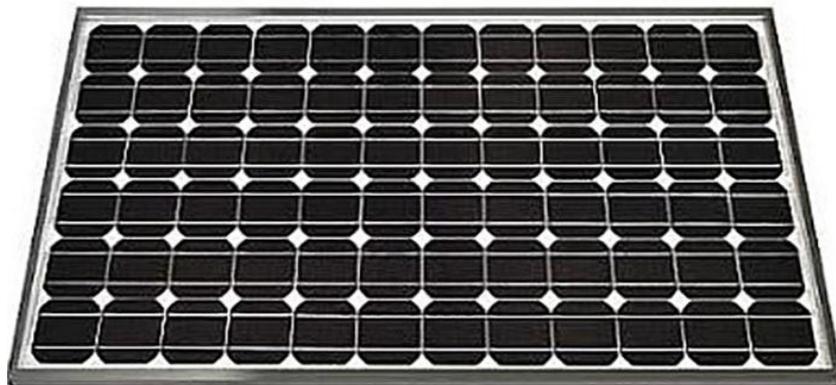
## 2.7 TIPOS DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

Atualmente existem diversas tecnologias e materiais para a fabricação de células e módulos fotovoltaicos, sendo as mais comuns as células de silício, filme fino e também como uma solução para propiciar melhor versatilidade na captação de energia as células feitas a partir de material orgânico. A seguir serão apresentadas características dessas diferentes tecnologias.

### 2.7.1 Célula de Silício Monocristalino

As células de silício monocristalino são concebidas com a utilização de blocos de silício com elevado grau de pureza aquecidos em altas temperaturas e submetidos a um processo de formação de cristal chamado método de Czochralski, que resulta no produto denominado lingote de silício monocristalino, constituído de uma única estrutura cristalina possuindo uma organização molecular homogênea. O lingote formado é fatiado produzindo *wafers* e só depois são submetidos a processos químicos recebendo impurezas em ambas faces, formando assim as camadas P e N constituindo assim a base para o funcionamento da célula fotovoltaica. Somente após a conclusão desses processos, o módulo recebe uma película metálica em uma das faces, uma grade metálica na outra face e uma camada de material antireflexivo que irá receber a luz, obtendo o produto final da célula de silício monocristalino como mostra a Figura 7 (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

Figura 7 - Célula de Silício Monocristalino



Fonte: LANSOLAR, 2018

Embora tenha um custo de produção mais elevado em relação a outras células fotovoltaicas, as células de silício monocristalino são as mais eficientes encontradas comercialmente devido obter uma melhor eficiência energética entre 15 e 18%.

### 2.7.2 Célula de Silício Policristalino

O processo de produção dessa célula é obtido por lingotes que formados por um aglomerado de pequenos cristais com tamanhos e orientações diferentes. Assim como as células de silício monocristalino, essas células também são cortadas para produzir *wafers* que serão transformadas em células fotovoltaicas que tem como cor predominante o azul, mas pode mudar em função material antireflexivo como mostra a Figura 8. A vantagem de se usar uma célula de silício policristalino é por obter um menor custo de fabricação do que a de monocristalino entretanto tem uma menor eficiência comercial que gira em torno de 13 e 15% (ABREU *et al*, 2010) (PINHO; GALDINO, 2014).

Figura 8 - Célula de Silício Policristalino



Fonte: LANSOLAR, 2018

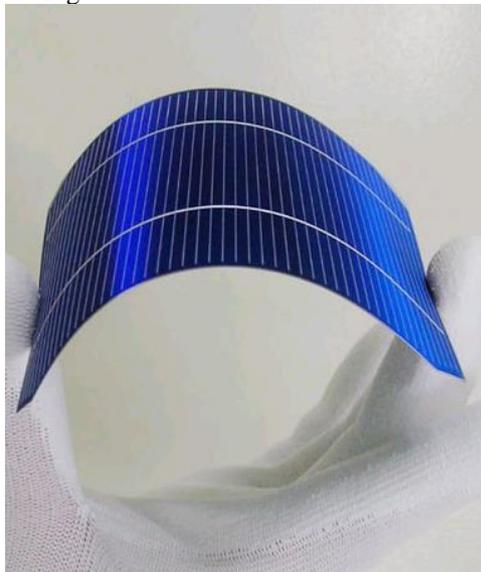
### 2.7.3 Filmes Finos

Entre as tecnologias recentes para produção de células fotovoltaicas, estão os filmes finos, que diferente das tecnologias utilizando silício de cristal, utiliza também outros materiais que podem ser aplicados sobre uma base rígida ou flexível. A vantagem da produção desse tipo de célula é a pequena quantidade de matéria prima utilizada e o processo de deposição, que pode ser por vaporização ou outro método, reduzindo assim desperdícios que ocorrem em outros métodos, como a de serragem para criação de *wafers* e também a temperatura de fabricação é bastante inferior, sendo entre 200 e 500°C, em relação às temperaturas de até 1500°C, utilizadas na fabricação de células cristalinas. Como na fabricação dos filmes finos tem um grau de complexidade menor e sua matéria prima consome pouca energia, seu custo também é menor, sendo assim possível uma produção em larga escala e em diversas dimensões.

Outra característica dessa tecnologia é a facilidade de instalação por se tratar de um material flexível, assim se torna uma opção bastante viável em termos arquitetônicos, pois é

possível otimizar ao máximo os espaços em edificações (PICOLLI, 2015). A Figura 9 mostra uma célula de filme fino sobre uma base flexível.

Figura 9 - Célula de Filmes Finos



Fonte: ALMAKS, 2015

### 2.7.3.1 Silício Amorfo

Foi a primeira tecnologia de filme fino desenvolvida, tem uma eficiência energética entre 5 e 9% o que é muito baixa se comparada com células cristalinas onde essa porcentagem fica ainda menor, pois devido sua degradação induzida pela luz após 12 meses sua eficiência fica menor até se tornar estável (ABREU *et al*, 2010).

### 2.7.3.2 Filme Fino de Silício Microcristalino

Essa tecnologia une as vantagens do silício cristalino e a tecnologia de fabricação dos filmes finos o que faz com que possa ser produzida em larga escala, tenha um menor custo, menor desperdício e maior eficiência que é em torno de 8,5%. Sua fabricação é feita em duas etapas sendo uma em alta temperatura e outra em baixa temperatura através da pulverização de finas camadas de silício sobre uma base feita de material rígido ou flexível. (TONIN, 2017).

### 2.7.4 Células de Telureto de Cadmio

As células de Telureto de Cadmio (CdTe) embora sejam eficientes dentro da família dos filmes finos atingindo entre 9-12% de eficiência, não é possível produzi-las em larga escala devido o cadmio (Cd) ser um matéria tóxica e o telúrio (Te) ser uma material difícil de ser

encontrado. As desvantagens dessa tecnologia são a relativa alta toxicidade e a baixa disponibilidade dos elementos envolvidos. (ABREU *et al*, 2010).

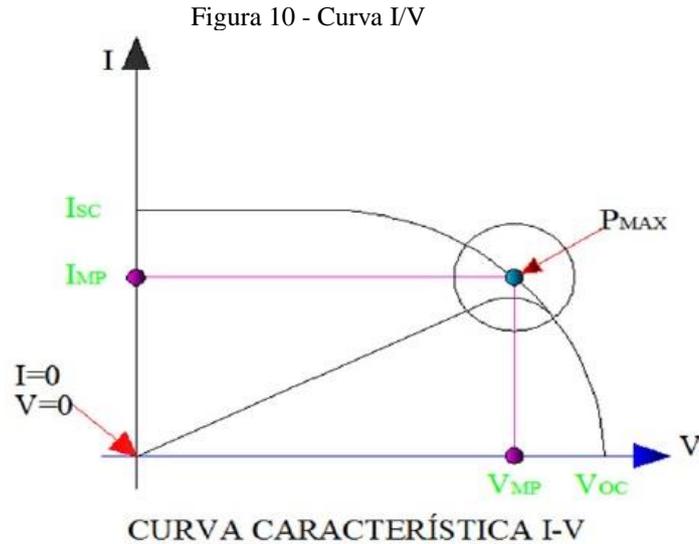
#### 2.7.5 Células de CIGS

A célula de CIGS (Cobre, Índio, Gálio e Seleneto) ainda é pouco utilizada comercialmente devido seu custo seja bastante elevado embora seu aspecto construtivo não empregar materiais tóxicos e sua eficiência energética alcance até 14% (VILLALVA, GAZOLI, 2012).

### 2.8 CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Dentre os parâmetros elétricos mais significativos do módulo fotovoltaico, está a potência nominal do módulo, cuja unidade é o Watt-pico (Wp) e é fornecida pelos fabricantes onde é válida sob as condições padrão de teste (ou STC, do inglês *Standard Test Conditions*), que correspondem a 1000 W/m<sup>2</sup> de irradiância, 25°C de temperatura da célula e AM = 1,5 para a massa de ar, entretanto para levantar o valor da potência nominal em condições de instalação em campo, é necessário levantar algumas grandezas que também fazem parte do módulo como, tensão de circuito aberto ( $V_{OC}$ ) que é a máxima tensão que uma célula fotovoltaica pode produzir sem a presença de corrente elétrica circulando, também a corrente de curto-circuito ( $I_{SC}$ ) que é a máxima corrente que se pode obter e é medida na célula fotovoltaica, quando a tensão elétrica em seus terminais é igual a zero, o fator de forma (FF) que é definido como sendo a razão entre a máxima potência da célula e o produto de curto circuito com a tensão de circuito aberto, e também outro parâmetro importante é a eficiência ( $\eta$ ) que mostra a efetividade do processo de conversão de energia solar em energia elétrica (ZILLES *et al.*, 2012).

Os parâmetros de tensão de circuito aberto, corrente de curto-circuito, fator de forma e eficiência podem ser obtidos a partir da curva  $I-V$ , onde é possível observar os pontos de operação do módulo fotovoltaico que determinam tais parâmetros como é possível observar na Figura 10.



Fonte: ELEKTRA, 2014

A partir do ponto de máxima potência ( $P_M$ ) é possível encontrar os pontos de  $V_{MP}$  e  $I_{MP}$  do módulo fotovoltaico onde, a partir deles é possível estabelecer um coeficiente da razão entre o  $V_{MP}$  e  $V_{OC}$  para os valores de tensão e  $I_{MP}$  e  $I_{SC}$  para os valores de correntes, conforme mostram as equações (1) e (2).

$$CoefV = \frac{V_{MP}}{V_{OC}} \quad (1)$$

$$CoefI = \frac{I_{MP}}{I_{SC}} \quad (2)$$

### 2.8.1 Índices de Mérito para Avaliação do Desempenho de Sistemas Fotovoltaicos

Os índices de mérito permitem fazer um diagnóstico ao longo do tempo de como foi o desempenho do sistema fotovoltaico, comparando o realizado com o esperado. Esses índices são obtidos por meio de equações matemáticas que envolvem, basicamente, potência e energia. BENEDITO (2009) destaca, três índices que são utilizados para definir a eficiência global do sistema fotovoltaico conectado à rede, no que se refere ao aproveitamento da radiação solar, produção de energia e perdas do sistema. Com os índices calculados também é possível comparar o sistema em análise com outros sistemas que apresentem esses cálculos.

### 2.8.2 Produtividade (*Final Yiel*)

O índice de produtividade representa a produção do sistema, em um determinado intervalo de tempo, em função da potência instalada. BENEDITO (2009) apresenta uma equação (3) que calcula este índice por meio de uma divisão entre a energia gerada dividida, pela potência instalada do sistema fotovoltaico, porém também é possível obter a produtividade dividindo-se o total de energia gerada pela potência total do sistema, simplificando a equação (3) para a equação (4).

$$Yf = \frac{\int_0^T P(t)dt}{Pn} \quad (3)$$

$$Yf = \frac{\text{Energia gerada}}{\text{Potência instalada}} \quad (4)$$

### 2.8.3 Fator de Capacidade

O fator de capacidade representa a razão entre energia entregue pelo sistema e a energia que seria entregue se o sistema operasse o tempo inteiro com potência nominal. Este índice é calculado para um dia, porém seria a energia entregue dividida pela energia caso o sistema operasse as 24 horas em potência nominal. A equação (5) apresenta como é calculado este índice e suas variáveis, que são as mesmas citadas na equação (3), porém em termos práticos o fator de capacidade pode ser calculado dividindo a energia gerada pela potência nominal, vezes 24 horas do dia, vezes a quantidade de dias como mostra a equação (6) (BENEDITO, 2009).

$$FC = \frac{\int_0^T P(t)dt}{\int_0^T Pn(t)dt} \quad (5)$$

$$FC = \frac{\text{Energia gerada}}{\text{Potência nominal} * 24 * \text{dias}} \quad (6)$$

#### 2.8.4 Desempenho Global (*Performance Ratio*)

O Desempenho Global é responsável por determinar se o sistema está operando conforme o desejado, indicando o efeito das possíveis perdas na saída. Analisando o sistema é possível diagnosticar no sistema defeitos em alguns de seus componentes, sujeira ou a própria degradação do sistema caso o valor de desempenho esteja abaixo do esperado. Segundo BENEDITO (2009), valores acima de 75% são os esperados, tomando por base os sistemas já estudados. A equação (7) apresenta o cálculo que simboliza, em porcentagem, a capacidade do sistema em converter a energia solar disponível em energia elétrica (MARION *et al.*, 2005), em outras palavras é a relação entre produtividade e a quantidade de horas de Sol a 1000 W/m<sup>2</sup>.

$$Pr = \frac{Y_f}{H(t)/G_{ref}} = \frac{Y_f}{H(t)/1000} \quad (7)$$

#### 2.9 SISTEMA FOTOVOLTAICO ISOLADO – SFVI

Em geral, o sistema isolado é uma solução para atender a um propósito específico, a energia gerada pelos painéis de captação de luz solar é direcionada à alimentação dos aparelhos elétricos da propriedade e armazenada em baterias. Quando o sistema fotovoltaico não é conectado à rede de distribuição elétrica convencional, a existência de baterias para armazenamento é indispensável, pois são elas que garantem a autonomia do sistema (URBANETZ JUNIOR, 2010).

Esse sistema podem ser individual ou em mini redes e aplicados em comunidades isoladas da rede elétrica, alimentação de baterias de veículos elétricos, postes de iluminação, bombas d'água, geladeiras para armazenar vacinas, entre outros.

Os SFVI são compostos basicamente pelo módulo fotovoltaico que transforma a radiação solar em corrente elétrica contínua, o controlador de carga, equipamento eletrônico destinado a controlar e monitorar a carga e/ou descarga do banco de baterias, evitando sobrecargas e descargas profundas e, aumentando assim, a vida útil do banco de baterias, o inversor que converte a tensão contínua, proveniente do módulo ou do banco de baterias, em tensão alternada e a bateria que tem a função de armazenar a energia elétrica para ser utilizada em momentos em que o sol não esteja presente e não haja outra fonte de energia (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2012) (URBANETZ JUNIOR, 2010).

A Figura 11 mostra os quatro principais componentes do sistema fotovoltaico isolado.

Figura 11 - Componentes do SFVI



Fonte: Energia Tecsolar, 2018

### 2.9.1 Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica – SFVCR

Os sistemas conectados à rede tem como característica a integração junto ao sistema público de fornecimento de energia elétrica. Diferentemente dos sistemas SFVI eles não possuem elementos para armazenar a energia elétrica, porém, durante os momentos, nos quais não existe geração de energia elétrica vinda dos módulos fotovoltaicos, é utilizada a energia proveniente da rede da concessionária. O SFVCR é constituído basicamente pelos módulos fotovoltaicos, pelo inversor, o qual disponibiliza energia elétrica em corrente alternada para a instalação e, pelo fato desse equipamento ser conectado em paralelo com a rede elétrica, ele injeta o excedente de energia gerado e, pelo medidor bidirecional, o qual contabiliza a energia injetada na rede da concessionária elétrica (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2012) (URBANETZ JUNIOR, 2010).

### 2.10 INVERSORES

O inversor é um dispositivo responsável pela conversão da energia de corrente contínua (CC) dos módulos fotovoltaicos em energia de corrente alternada (CA) responsável em alimentar as cargas. A tensão CA de saída deve ter amplitude, frequência e conteúdo harmônico adequado às cargas a serem alimentadas e, a tensão de saída do inversor deve ser sincronizada com a tensão da rede, no caso de sistemas conectados à rede elétrica. De acordo com tipo do

sistema fotovoltaico, conectado à rede elétrica ou isolado, escolhe-se o inversor a ser usado, pois os inversores para SFVCR possuem características específicas para atender às exigências das concessionárias de distribuição em termos de segurança e qualidade de energia a ser injetada na rede (URBANETZ, 2010).

Em residências, o inversor solar é tipicamente instalado perto do quadro de luz, em um local abrigado do sol, do calor e da água. O tipo de inversor solar mais utilizado é conhecido como "*inversor grid tie*", esses são os inversores utilizados para conectar o sistema fotovoltaico de energia solar na rede elétrica. A potência (kW) necessária para esse tipo de inversor depende da demanda da potência das placas fotovoltaicas instaladas no sistema de geração de energia, mas é importante também observar se o projeto prevê o aumento de demanda, pois se existir essa previsão o inversor deve ser dimensionado para que suporte o aumento da demanda. Geralmente projetos de SFVCR onde os inversores utilizados são de até 5kW tem saída monofásica, e, a partir dessa potência é mais comum a utilização de inversores com saída trifásica (TONIN, 2017).

## 2.11 TRAJETÓRIA SOLAR

Devido à existência do ângulo de declinação solar, o sol nasce e se põe em diferentes pontos do céu e descreve uma trajetória com inclinação diferente em cada dia do ano. No movimento de rotação a terra gira ao redor de um eixo Leste-Oeste caracterizada pelo ângulo azimutal, que passa por seus polos, originando o dia e a noite. O movimento de translação da terra é feito no eixo Norte-Sul determinando as quatro diferentes estações do ano onde para cada uma o sol tem uma movimentação característica como o solstício que é a época em que o sol passa pela sua maior declinação boreal ou austral, e durante a qual cessa de afastar-se do equador e também o Equinócio que é o ponto da órbita da terra em que se registra uma igual duração do dia e da noite (PINHO; GALDINO, 2014). Esses eventos ocorrem em função das estações do ano conforme a Tabela 1.

Tabela 1 - Característica Solar

Data	Denominação
21 de março	Equinócio de outono
21 de setembro	Equinócio de primavera
21 de junho	Solstício de inverno
21 de dezembro	Solstício de verão

Fonte: PINHO; GALDINO, 2014

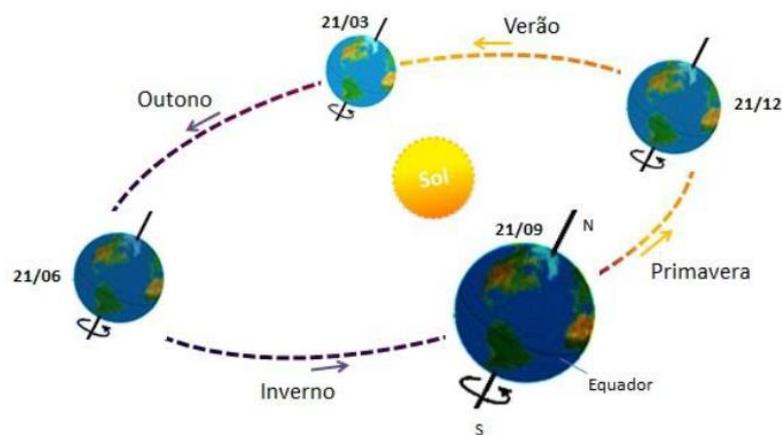
### 2.11.1 Ângulo Azimutal

O ângulo azimutal ou zimute solar é o ângulo de orientação dos raios solares em função do norte geográfico, onde apresenta um eixo vertical, perpendicular ao solo, acoplado à superfície de instalação dos módulos e reproduz o seguimento Leste-Oeste. (LIRA, 2014). Assim e um observador estiver localizado no hemisfério sul, dependendo da hora do dia o sol estará em uma posição diferente, na esquerda ou à direita do observador e ao meio dia o sol estará exatamente a sua frente o que significa que o ângulo azimutal é nulo.

### 2.11.2 Altitude Solar

A cada dia do ano o sol nasce e se põe em diferentes pontos no céu descrevendo assim trajetórias com inclinações diferentes, isso devido a existência dos ângulos de declinação solar. A Figura 12 ilustra o movimento da Terra ao redor do Sol e as estações do ano para o hemisfério Sul, mostra o movimento aparente do Sol, ao meio dia solar, ao longo do ano, onde é possível observar a declinação solar ( $\delta$ ) que é a variação de ângulo entre os raios e o plano do Equador que é de  $+23,45^\circ$  em torno do dia 21 de junho, e  $-23,45^\circ$  em 21 de dezembro. Essa declinação é positiva ao Norte e negativo ao Sul do Equador. Já no equinócio de primavera e verão, que ocorrem nos dias 21 de setembro e 21 de março respectivamente, os raios solares estão alinhados com o plano do Equador onde a declinação solar é igual a zero (PINHO; GALDINO, 2014).

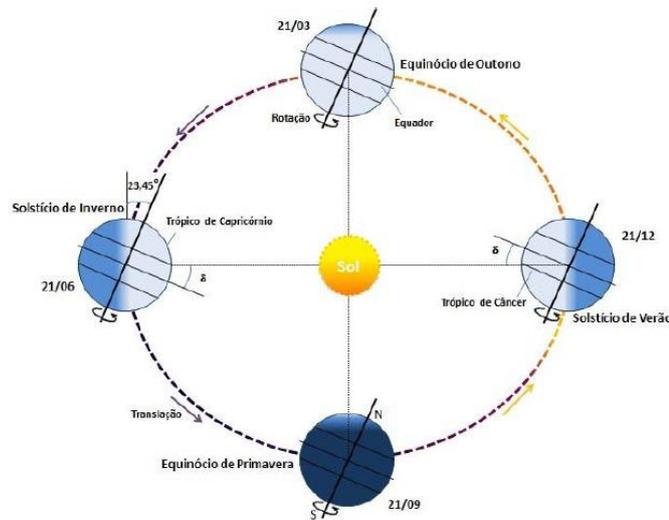
Figura 12 - Movimento da Terra ao redor do Sol e as estações do ano para o hemisfério Sul



Fonte: PINHO; GALDINO, 2014

A Figura 13 mostra a órbita da Terra em torno do Sol, com seu eixo N-S inclinado de um ângulo de  $23,45^\circ$ , indicando as estações do ano no hemisfério Sul. Em função da inclinação do eixo da terra, é possível observar que os dias são mais longos no solstício de verão e os dias são mais curtos no solstício de inverno. Nos equinócios, as durações dos dias são as mesmas em qualquer localidade.

Figura 13 - Órbita da Terra em torno do Sol, com seu eixo N-S inclinado de um ângulo de  $23,45^\circ$



Fonte: PINHO; GALDINO, 2014

É possível determinar a trajetória do movimento do Sol para um determinado dia em uma localidade da Terra, a partir da diferença entre a declinação solar e a latitude (positiva ao Norte e negativa ao Sul do Equador). Para tanto é possível calcular a declinação solar ( $\delta$ ) a partir da equação 8.

$$\text{sen}(\delta) = \text{sen}(23,45)\cos\left[\left(\frac{360}{365,25}\right)(n + 10)\right] \quad (8)$$

Onde  $n$  representa o dia juliano, contado de 1 a 365 a partir de 1 de janeiro (i.e 01/jan  $\rightarrow n = 1$ ; 02/jan  $\rightarrow n = 2$ ; 31/dez  $\rightarrow n = 365$ ) (PINHO; GALDINO, 2014).

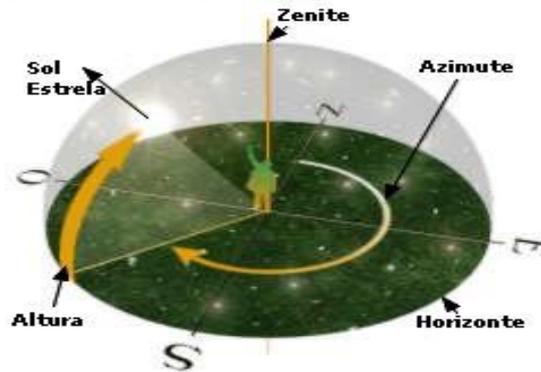
### 2.11.3 Ângulos da Trajetória Solar

Em uma posição estando ao norte geográfico, é possível observar que em dias de verão o ângulo azimutal é menor, em dias de inverno a altura solar no céu é menor o que faz com que se observe o sol mais baixo perto da linha do horizonte, com isso o ângulo azimutal e a massa

de ar percorrida pelos raios solares são maiores do que no verão. O ângulo da altura solar ( $\gamma_s$ ) depende da localização geográfica do observador e também do ângulo da declinação solar, ou seja, se o observador estiver próximo à linha do equador, enxergará alturas solares maiores e se estiver próximos dos polos terrestres enxergam alturas menores.

Contudo para uma análise da trajetória do sol é necessário considerar o movimento de rotação da terra no eixo leste-oeste, caracterizado pelo ângulo azimutal ( $\theta_a$ ) e o movimento de translação no eixo norte-sul, caracterizado pelo ângulo da altura solar ( $\gamma_s$ ) conforme mostra a Figura 14. Essa variação angular tem um impacto na geração de energia elétrica por um módulo fotovoltaico causando muitas vezes baixa eficiência energética dependendo de vários fatores como horário do dia, mês e até mesmo estação do ano (TREVELIN, 2014).

Figura 14 - Posição do sol em relação aos ângulos azimutal, zenital e da altura solar.



Fonte: ELECTRÓNICA, 2015

Os ângulos relacionados a geometria solar descrevem uma relação geométrica entre os raios solares, nos quais apresentam uma variação de acordo com o movimento aparente Solar e a superfície terrestre. Os ângulos que definem essa relação são:

- **Ângulo Zenital ( $\theta_z$ )** - ângulo formado entre os raios do Sol e a vertical local (Zênite);
- **Altura Solar ( $\alpha$ )** - ângulo compreendido entre os raios do Sol e a projeção dos mesmos sobre o plano horizontal;
- **Ângulo Azimutal do Sol ( $\gamma_s$ )** - ângulo entre a projeção dos raios solares no plano horizontal e a direção Norte-Sul (horizonte do observador);
- **Ângulo Azimutal da superfície ( $\gamma$ )** - ângulo entre a projeção da normal à superfície no plano horizontal e a direção Norte-Sul;

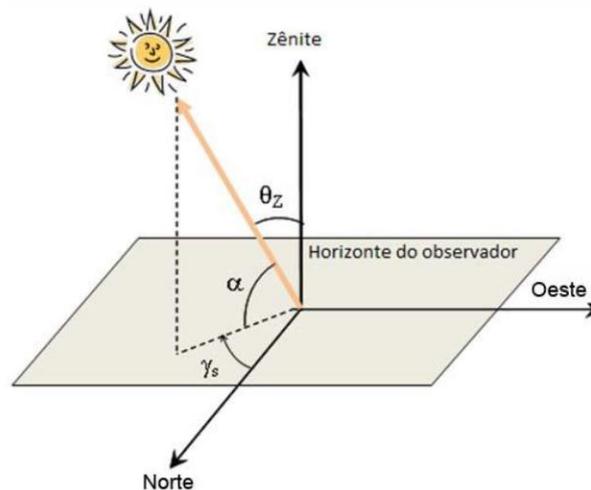
- **Inclinação da superfície de captação ( $\beta$ )** - ângulo entre o plano da superfície em questão e o plano horizontal [ $0^\circ$   $90^\circ$ ];
- **Ângulo de incidência ( $\theta$ )** - ângulo formado entre os raios do Sol e a normal à superfície de captação.

De acordo com Pinho e Galdino (2014), o ângulo Zenital Altura Solar, são ângulos complementares, ou seja, ( $\theta_z + \alpha = 90^\circ$ ). O deslocamento do Ângulo Azimutal do Sol ( $\gamma_s$ ) é tomado a partir do Norte ( $0^\circ$ ) geográfico, sendo que por convenção ele é positivo quando sua projeção se encontra á direita do Sul (a Leste) e negativo quando se encontrar à esquerda (a Oeste).

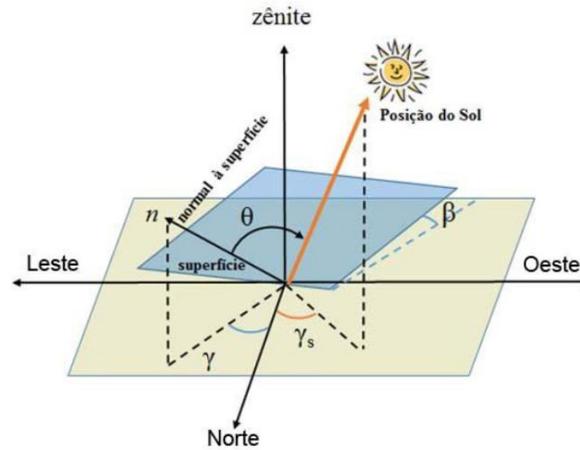
$$-180 \leq \gamma_s \leq 180^\circ$$

A Figura 15 representa a posição do Sol em relação ao plano horizontal mostrando os ângulos Zenital e Azimutal bem como também a altitude solar descrita acima. A Figura 16 apresenta a orientação de uma superfície inclinada em relação ao mesmo plano com os ângulos  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\gamma_s$  e  $\theta$  (PINHO; GALDINO, 2014).

Figura 15 - Ilustração dos ângulos  $\theta_z$ ,  $\alpha$  e  $\gamma_s$



Fonte: PINHO; GALDINO, 2014

Figura 16 - Ilustração dos ângulos  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\gamma_s$  e  $\theta$ 

Fonte: PINHO; GALDINO, 2014

#### 2.11.4 Ângulo de Incidência Solar

O ângulo de incidência solar ( $\theta$ ) é um importante componente para que o módulo fotovoltaico possa captar a máxima incidência solar possível. O ângulo ( $\theta$ ) é obtido através dos raios do Sol e uma superfície com orientação ( $\gamma$ ) e inclinação ( $\beta$ ) através da equação (9) (PINHO; GALDINO, 2014).

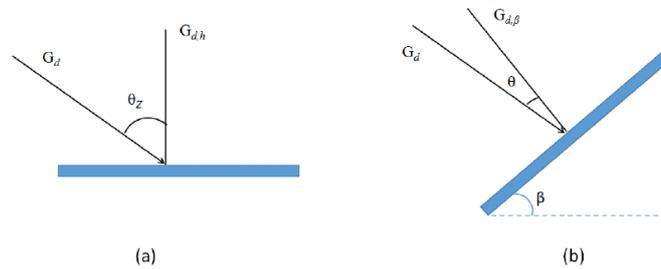
$$\begin{aligned} \cos\theta &= \cos\beta \cdot \cos\delta \cdot \cos\omega \cdot \cos\phi + \cos\beta \cdot \text{sen}\delta \cdot \text{sen}\phi \\ &+ \text{sen}\beta \cdot \text{sen}\gamma \cdot \cos\delta \cdot \text{sen}\omega + \text{sen}\beta \cdot \cos\gamma \cdot \cos\delta \cdot \cos\omega \cdot \text{sen}\phi \\ &- \text{sen}\beta \cdot \cos\gamma \cdot \text{sen}\delta \cdot \cos\phi \end{aligned} \quad (9)$$

No caso de obter os valores das componentes direta da irradiância incidente sobre uma superfície, é possível calcular através da equação (10), a componente direta da irradiância que incide normalmente a um plano horizontal ( $G_{d,h}$ ) ou a qualquer superfície inclinada ( $G_{d,\beta}$ ) (PINHO; GALDINO, 2014).

$$\frac{G_{d\beta}}{G_{dh}} = \frac{G_d \cdot \cos\theta}{G_d \cdot \cos\theta_z} = \frac{\cos\theta}{\cos\theta_z} \quad (10)$$

A Figura 17 ilustra o ângulo de incidência da irradiância solar direta sobre uma superfície horizontal e sobre uma superfície inclinada.

Figura 17 - (a) Irradiância direta incidente sobre uma superfície horizontal; (b) Irradiância direta incidente sobre uma superfície inclinada



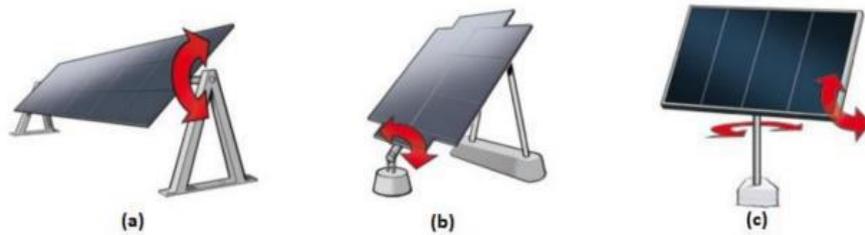
Fonte: PINHO; GALDINO, 2014

## 2.12 SEGUIDORES SOLARES

A potência produzida por um sistema fotovoltaico está diretamente relacionada com o nível de radiação solar incidente sobre o módulo fotovoltaico. Assim, uma das formas mais usuais de aperfeiçoar o recurso solar e maximizar o aproveitamento da radiação solar com consequente maior geração energética e redução de custos por MWh gerado, é através da orientação dos painéis fotovoltaicos (ALVES, 2008). O efeito dessa inclinação torna-se mais relevante quanto maior for a latitude, ou seja, quanto maior for a distância da linha do Equador. Tem-se como ângulo usualmente ótimo de inclinação o ângulo igual à latitude do local, orientado ao norte no hemisfério sul, pois, desta forma, a superfície receptora permanece perpendicular aos raios solares na média anual, com atenuação das variações da irradiação ao longo do ano e maior quantidade de energia incidente sobre tal superfície nesse período.

Há ainda outra maneira de maximizar a irradiação solar sobre uma superfície, a qual consiste em fazê-la seguir o movimento do Sol, através de mecanismos e estruturas de seguimento de um ou dois eixos, conforme ilustra a Figura 18. O princípio básico de um seguidor solar é permitir que o ângulo de incidência dos raios solares seja sempre perpendicular ao plano do módulo. Essa alternativa é mais usual em centrais fotovoltaicas, nas quais os módulos estão sobre o solo (TOLMASQUIM, 2016).

Figura 18 - Sistemas de seguimento solar de um (a, b) e dois (c) eixos

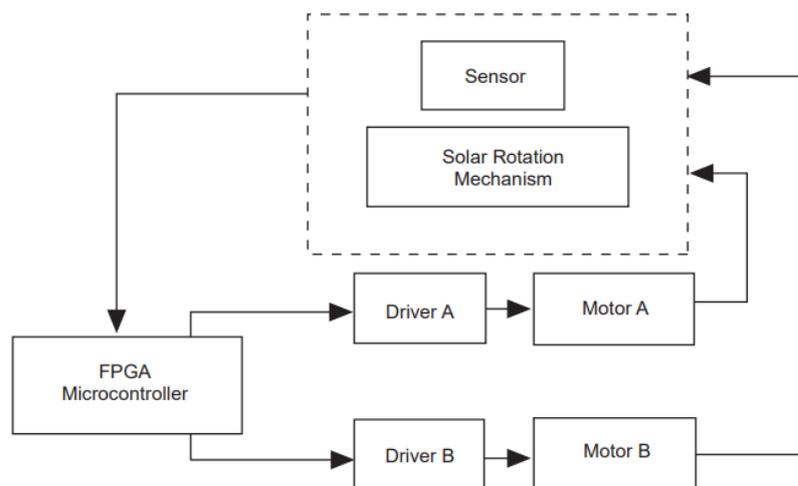


Fonte: TOLMASQUIM, 2016

### 2.12.1 Automatização de Seguidores Solares

A automatização de rastreadores solares refere-se ao processo de manobra de um painel fotovoltaico, seguir a trajetória do curso do movimento do sol durante todo o ciclo do dia. A Figura 19 mostra a arquitetura de controle de um sistema típico de controle de rastreamento solar no formato de diagrama de blocos. O diagrama de blocos ilustra como o sistema de rastreamento solar, usa dois motores como acionamentos mecânicos que conduzem um eixo duplo rotação para manobrar o módulo para enfrentar diretamente o sol. Essa rotação permite o sistema rastrear o sol em tempo real, permitindo que o módulo aproveite da melhor forma possível energia solar. Normalmente, os dois motores de acionamento são desacoplados, o que significa que a rotação um motor não influencia o outro, a fim de minimizar o consumo de energia durante Operação. (XINHONG *et al.*, 2007).

Figura 19 - Arquitetura de controle de rastreamento solar e diagrama de blocos



Fonte: XINHONG *et al.*, 2007

O projeto de automatização pode ser concebido com diferentes sensores de aquisição de dados, controladores e acionadores, porém todos seguem a mesma lógica de funcionamento, pois uma vez que o sistema de rastreamento solar está em operação, ele executa a seguinte sequência de operações dentro do contexto do fluxograma e procedimentos de *software*: Leitura de todos os sensores ou mapeamento referente a posição do sol, cálculo do próximo ponto de trajetória do caminho do sol feitas no controlador, ações referentes a entrada de dados dos sensores ou do controle feito através de mapeamento, acionamento de drivers para que os motores possam fazer a movimentação dos módulos fotovoltaicos e aquisição de dados para leitura de variáveis elétricas (PRINSLOO; DOBSON, 2014).

### 2.12.2 Tipos de Seguidores solares

Existem diferentes tipos de seguidores solares, sendo através de concentrador solar e rastreadores de módulos planos que podem ser, seguidor de um eixo movimentando-se no ângulo azimutal (leste-oeste) ou no ângulo de inclinação solar (norte-sul) como também seguidores de dois eixos que movimentam-se tanto no ângulo azimutal como também no ângulo de inclinação solar (AYABE, et al. 2017).

Ainda de acordo com AYABE, *et al.* (2017) os concentradores são constituídos basicamente de instrumentos ópticos - lentes, discos parabólicos e outros dispositivos, onde tem como objetivo concentrar a radiação solar direta normal, direcionando a energia para pequenas células fotovoltaicas.

O seguidor de eixo horizontal tem os módulos dispostos paralelamente ao eixo de rotação, e a base onde são apoiados os mancais é fixa. Ele segue a trajetória aparente do Sol durante o dia, acompanhando o ângulo horário solar, onde seu menor valor de inclinação durante o ponto de maior altitude solar. Por ser instalado no eixo horizontal, esse modelo de seguimento apresenta bom desempenho para regiões próximas à linha do Equador.

Seguidores do ângulo de inclinação solar com movimento norte-sul tem seu movimento paralelo à linha do Equador e ortogonal ao eixo polar terrestre, sendo assim, ele completa o ciclo de movimento a cada 365 dias. Com essa característica, sua implementação se torna mais simples (LIRA, 2014).

A Figura 20 mostra a aplicação de um seguidor do ângulo de inclinação solar onde é possível chegar a um ganho de 25% a mais de energia que as estruturas fixas (SOLAR MECA, 2017).

Figura 20 - Seguidor do ângulo de inclinação solar



Fonte: SOLAR MECA, 2017

O seguidor do ângulo azimutal, apresenta um eixo vertical, perpendicular ao solo, acoplado à superfície de instalação dos módulos (LIRA, 2014), e reproduz o seguimento Leste-Oeste. Tem como vantagem o ganho em geração de energia em locais tanto de baixa quanto de elevada latitude, além do que possuem em geral baixo custo relativo de montagem e manutenção (AYABE, *et al.* 2017). A Figura 21 apresenta uma aplicação de um seguidor vertical em um sistema de geração de energia.

Figura 21 - Seguidor solar no eixo vertical



Fonte: MORAES, 2012

Os seguidores do ângulo de inclinação solar, possuem um único eixo móvel orientado no sentido norte-sul, inclinado em relação à horizontal com um ângulo fixo, que correspondente à latitude local paralelo ao eixo polar terrestre. Nesse tipo de seguidor a inclinação é a mesma

adotada para a instalação de módulos fixos, voltados para o norte, quando instalados no hemisfério Sul. Assim, a direção dos raios solares poderá coincidir com a reta normal ao módulo acoplado à sua estrutura nos equinócios de primavera e outono e nos demais dias do ano os raios solares não estarão perpendiculares ao eixo móvel (AYABE, *et al.* 2017). A Figura 22 mostra uma série de exemplos de sistemas de rastreamento solar baseados no eixo polar no qual o rastreador usa um movimento de rolamento para seguir o sol de leste a oeste ao amanhecer ao pôr do sol.

Figura 22 - Exemplos de rastreadores de eixo polar usados em tecnologias de rastreamento solar



Fonte: PRINSLOO, DOBSON, 2014

Já os seguidores de dois eixos, acompanham a trajetória solar tanto no ângulo azimutal como também o ângulo de inclinação solar, pois possuem dois graus e liberdade, assim possuem maior precisão de rastreamento e conseqüentemente um maior ganho. Apesar de obter maior ganho na geração de energia, esse tipo de seguidor possui algumas desvantagens pois, sua estrutura mecânica é de maior complexidade, o que acarreta em uma vulnerabilidade a esforços mecânicos (AYABE, *et al.* 2017). A Figura 23 mostra a aplicação de um seguidor solar de dois eixos com potência instalada de 4320W na cidade de São Domingos em Portugal.

Figura 23 - Seguidor 2-eixos MPPT



Fonte: BRIGHT SOLAR, 2016

### 2.12.3 Desempenho de Seguidores Solares

A tecnologia de seguimento solar é ainda pouco utilizada no Brasil e necessita ser estudada para quantificar e validar seus ganhos significativos na produção de energia elétrica em relação a sistemas fixos. Diversos estudos foram publicados entre os anos de 2008 a 2016 buscando divulgar experiências e resultados envolvendo seguidores solares, inclusive comparando desempenho entre sistemas fotovoltaicos fixos e móveis.

Golveia, *et al.* (2017) apresentam um levantamento do estado da arte sobre energia solar fotovoltaica com foco no desempenho de seguidores solares, utilizando-se como fonte de dados trabalhos e artigos relacionados ao desempenho de seguidores solares dos principais bancos de dados (IEEE Xplore, Capes, Scopus, acervos de teses e dissertações de universidades, entre outros). Optou-se em avaliar o desempenho de sistemas fotovoltaicos com seguidores solares com base em dados de energia elétrica gerada.

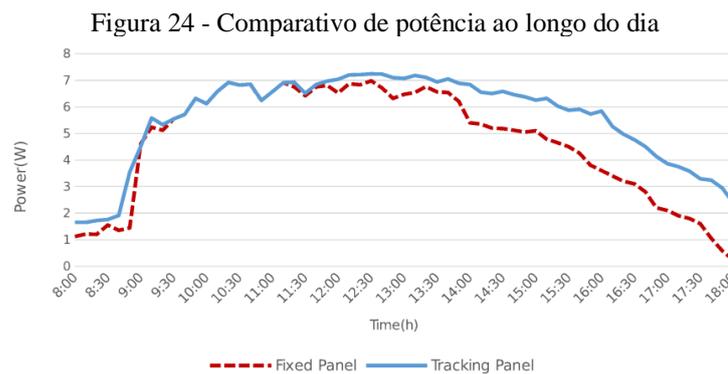
Roncolato, *et al.* (2016) apresentam uma avaliação de desempenho técnico e econômico, sob a ótica da energia produzida, de um arranjo de planta fotovoltaica com sistema móvel de um eixo comparativamente a um sistema fixo, em operação na Usina Solar Fotovoltaica Tanquinho da CPFL, na região de Campinas ( $-22,77^\circ$ ,  $-47,01^\circ$ ). Foram avaliados módulos fotovoltaicos com tecnologia de silício policristalino montado no solo em sistema com seguidor de um eixo horizontal norte-sul, operando ao lado de arranjos de mesma potência com exatamente o mesmo tipo de módulo fotovoltaico, porém montados no solo com estruturas fixas. No período avaliado, o ganho em energia do sistema móvel para o sistema fixo foi de 11% para as condições do local de instalação da usina. Entretanto, o estudo orienta que os ganhos em geração de energia e custos associados a cada opção de instalação devem ser estudados caso a caso quanto à viabilidade técnico x econômica.

Fátima Grah, Vanessa *et al.* (2015) apresentaram novo conceito de sistema de rastreamento solar de três passos de um eixo (Leste-Oeste) com operação manual, e avaliaram o incremento de energia FV produzida quando comparado com geradores FV estáticos em Piracicaba ( $-22,73^\circ$ ,  $-47,64^\circ$ ) no ano de 2012. O sistema rastreador manual de três passos consistiu no uso de cabos de aço presos a estrutura dos geradores FV de modo que na parte da manhã ficavam inclinados a  $50^\circ$  para o leste, entre os horários próximos ao meio dia ficavam inclinado para o norte ( $0^\circ$  em relação ao eixo Leste-Oeste) e na parte da tarde ficavam inclinados a  $50^\circ$  para o oeste. O incremento de energia variou entre 15 a 19%, conforme a condição diária do céu, demonstrando que o sistema rastreador de três passos em geradores FV com ângulo otimizado para a estação de irrigação foi mais eficiente que geradores fixos.

Lazaroiu, Longo, *et al.* (2015) avaliaram o desempenho de dois sistemas fotovoltaicos: um fixo e outro móvel de eixo vertical, com rotação de  $120^\circ$  em torno do eixo central ( $-60^\circ$  a  $+60^\circ$ ), ambos inclinados a  $30^\circ$ . O estudo ocorreu na Itália, durante os meses de maio e junho de 2014, por um período de 30 dias no intervalo do dia das 8h às 19h. Os valores de corrente elétrica e tensão foram adquiridos com uma taxa de amostragem de 15 min em um computador on-line e as potências de saída foram calculadas de acordo com os dados obtidos. O objetivo da pesquisa foi analisar o aumento da produção diária usando o sistema de rastreamento solar, levando em conta também o consumo de energia do seguidor solar. Cada sistema consiste de uma fonte fotovoltaica, um MPPT (Maximum Power Point Tracker) e uma bateria eletroquímica de 12V – 40Ah como carga elétrica. O sistema de rastreamento solar evidenciou um aumento na produção de energia entre 12 a 20%.

Garcia, Diaz e Agudelo (2015) analisaram durante um dia típico um sistema seguidor solar fotovoltaico de eixo único em Fusagasugá, Colômbia ( $4,33^\circ\text{N}$ ;  $-74,35^\circ\text{O}$ ), e compararam a eficiência da conversão de energia com um sistema FV fixo inclinado a  $15^\circ$  orientação leste. O sistema mecânico foi baseado em um servomotor, movendo-se de  $-80^\circ$  a  $+80^\circ$  em relação ao eixo vertical.

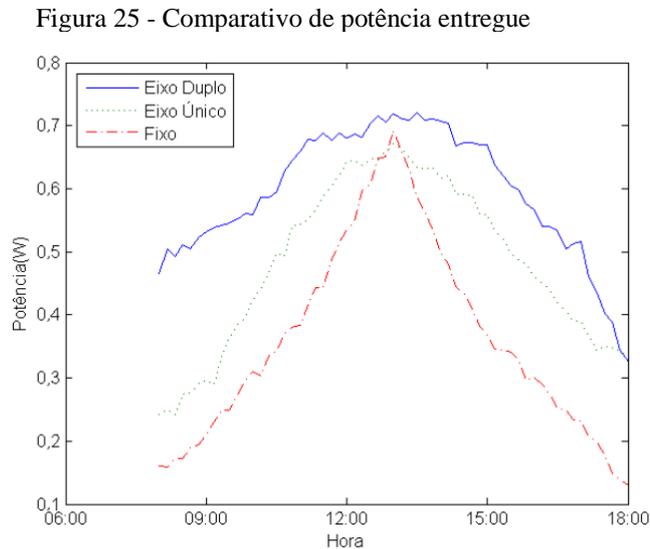
Os resultados apresentaram ganho de energia gerada em torno de 25% ao sistema fixo, partindo-se dos parâmetros de tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ) e corrente de curto circuito ( $I_{sc}$ ), conforme mostra a Figura 24.



Fonte: GARCIA, DIAZ E AGUDELO, 2015

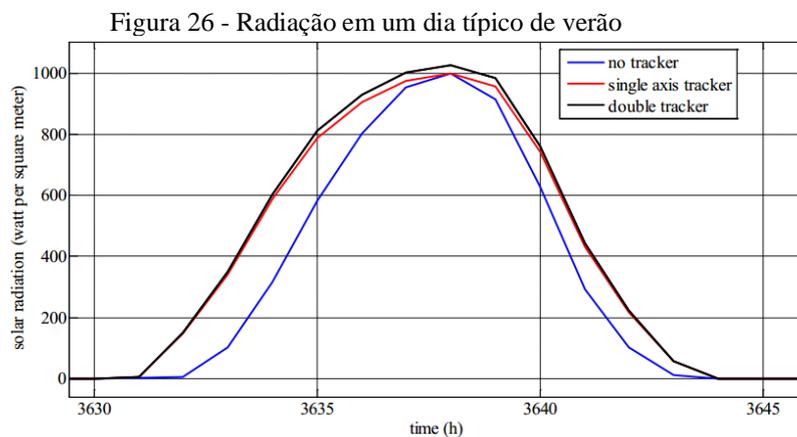
Observa-se que o aumento da eficiência para o módulo com seguidor de um eixo apresenta melhor desempenho a partir das 15:00 do dia. Para os demais instantes, a energia gerada apresenta valores semelhantes ao desempenho do painel fixo. Para este sistema, o ganho médio diário de energia gerada no painel móvel em relação ao painel fixo, observado para os dias de experimento, foi de 11%.

Trevelin (2014) avaliou os sistemas fixo, seguidor de eixo único e seguidor de eixo duplo por um período de 10 horas em um dia ensolarado na cidade de São Carlos (22°S;47°O). A Figura 25 ilustra os resultados da potência entregue ao longo do ensaio.



Fonte: TREVELIN, 2014

Observa-se que a presença do seguidor solar estende o período de máxima irradiação sobre o painel. Constatou-se aumento de potência entregue do seguidor de dois eixos de 18% e 39% frente aos sistemas de eixo único e fixo, respectivamente. Já o seguidor de eixo simples apresentou resultado 25% maior do que o sistema fixo em posição ótima. Bazyari, Farhangi, *et al* (2014) realizaram um estudo realizado na ilha de Qeshm no Irã (26°N; 56°O), no qual comparou-se o desempenho de três sistemas ao longo do ano naquele país. A Figura 26 mostra a radiação incidente em um dia típico de verão.



Fonte: Bazyari, Keypour, *et al.*, 2014

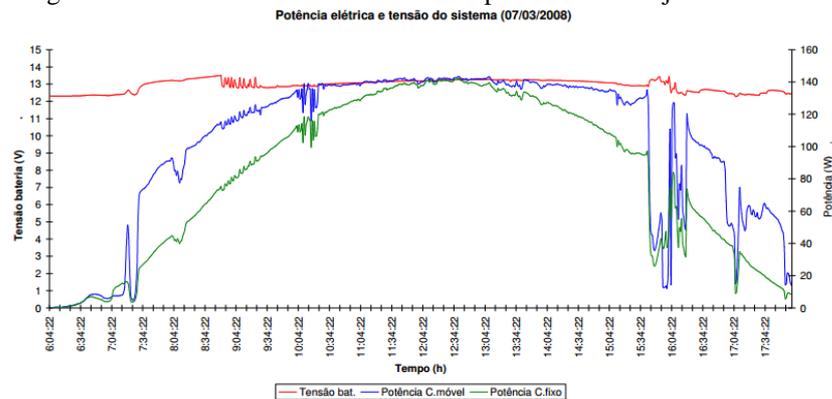
Suthar, *et al* (2014) apresentam uma simulação em Matlab do desempenho de sistemas fotovoltaicos com rastreamento solar ótimo para a cidade de Roorkee, Índia ( $29,87^{\circ}\text{N}$   $77,88^{\circ}\text{L}$ ). Foi comparado o desempenho do seguidor solar de eixo simples, eixo duplo e sistema fixo em um dia típico. O ganho anual de radiação obtido pelo seguidor de dois eixos foi de 3,7% e 47,3% em relação ao rastreamento de eixo único e sistema fixo.

Antônio e Pereira (2014) avaliaram o ganho de energia elétrica produzida por um painel com seguidor de eixo vertical quando comparado a um painel fixo. O estudo foi realizado em 10/12/2013 na cidade de Viçosa – MG, no período das 7h às 17h. Ambos os módulos FV foram inclinados a  $25^{\circ}$  orientados para o norte geográfico.

O estudo obteve como resultados que o seguidor solar unidirecional, mesmo em um dia parcialmente nublado, aumenta a potência média produzida por um painel fotovoltaico quando comparado com um painel estático. No dia em estudo o ganho chegou a 10,36%.

Oliveira (2008) analisou um seguidor de eixo simples e sistema estático na cidade de Porto Alegre ( $30^{\circ}\text{S}$ ;  $51^{\circ}\text{O}$ ). A Figura 27 apresenta o gráfico com as curvas de tensão da bateria, potência elétrica do sistema seguidor e do sistema fixo.

Figura 27 - Gráfico das curvas de tensão e potência dos conjuntos



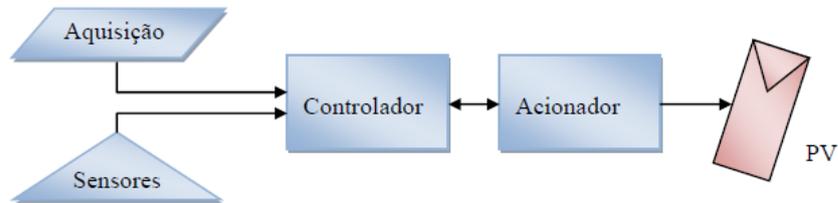
Fonte: OLIVEIRA, 2008

Para a medição no período de 20 dias, aproximadamente, a produção de energia do sistema seguidor foi 24% maior do que o sistema fixo.

No estudo realizado por Ribeiro *et al.* (2012), é proposto um sistema de rastreamento baseado na utilização de sensores de posicionamento baseado em fotoresistores, independente de consulta à valores de coordenadas solares. São utilizados dois motores de corrente contínua para o acionamento do sistema, sendo um para movimento azimutal e outra para movimento de inclinação do painel fotovoltaico. O sistema de aquisição de dados e acionamentos é realizado

através de um microcontrolador PIC. A Figura 28 apresenta o diagrama de blocos do sistema implementado.

Figura 28 - Diagrama de blocos do sistema

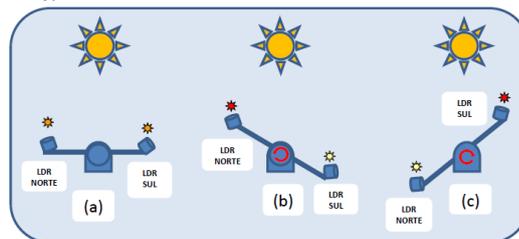


Fonte: RIBEIRO, 2012

O bloco de aquisição é responsável por fornecer as variáveis referentes à latitude e longitude do ponto de instalação do painel fotovoltaico, além das coordenadas solares e horário para inicialização da orientação do painel.

Sensores LDR (*Light Dependent Resistor*) tem como função enviar sinais elétricos ao microcontrolador, sem a necessidade da verificação dos dados das coordenadas solares e horário, o que torna o sistema independente destas informações. Neste caso, os dados de latitude e longitude bem como as coordenadas solares são úteis apenas para a posicionamento inicial do sistema. A Figura 29 apresenta a maneira como são instalados os sensores LDR.

Figura 29 - Posicionamento dos sensores LDR



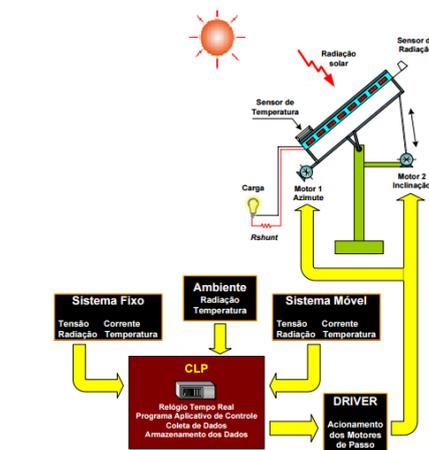
Fonte: RIBEIRO, 2012

Conforme indicado na Figura 28, utilizando como exemplo a inclinação do painel fotovoltaico, os sensores captam a incidência da irradiância sobre si, e conforme for a diferença dos raios recebidos, é realizado o ajuste do painel. As figuras (b) e (c) indicam o desequilíbrio nos sinais recebidos pelos LDRs, fazendo como que haja a movimentação do sistema procurando uma leitura de valores iguais por parte dos sensores. A figura (a) mostra o equilíbrio dos sinais recebidos por ambos LDRs, representando neste caso o ângulo ideal da incidência de irradiação, mantendo o painel na posição encontrada.

O controlador PIC utilizado é responsável por realizar todo o processamento das informações de entrada de dados adquiridos e envio das informações necessárias para os acionamentos corretos aos acionadores. Por fim, os acionadores são compostos pelos motores que farão os movimentos necessários de ajuste do módulo fotovoltaico em relação à trajetória do sol.

A Figura 30 apresenta o diagrama de uma estrutura, onde pode ser visto o painel fotovoltaico instalado sobre os seus suportes (fixo e móvel), os sensores de radiação, temperatura, os motores de movimentação do sistema móvel, o controlador lógico programável e as cargas resistivas do sistema (ALVES, 2008).

Figura 30 - Diagrama do Sistema



Fonte: ALVES, 2008

O trabalho apresentado por Alves (2008) mostra que o módulo Fotovoltaico instalado, é de silício monocristalino e está montado sobre um suporte que foi desenvolvido para a finalidade de movimentar o painel. Nos suportes foram adaptados os motores de movimentação que ajustam automaticamente o ângulo horário (Azimute) e a inclinação.

O Controlador Lógico Programável, tem a função de controlar o sistema móvel e também de coletar e armazenar os dados dos sensores instalados como os sensores de temperatura e radiação fixados no plano do painel, e também dos sensores de temperatura ambiente e de radiação medida no plano horizontal. As cargas instaladas são lâmpadas incandescentes de 12 V / 55 W.

O sistema de posicionamento para o rastreador solar é composto por um CLP, uma placa de acionamento dos motores de passo, motores e redutores.

O Controlador Lógico Programável executa o programa de controle gera o resultado das equações de posicionamento do Sol e dos dados inseridos no programa, como as coordenadas

geográficas do Laboratório de Campo e o horário da localidade, com esses dados, calcula-se a posição aparente do Sol no céu e gera os sinais de controle para os motores de passo. Estes sinais de controle são convertidos em pulsos que irão controlar a velocidade e o sentido de rotação dos motores, como consequência também os ângulos de posicionamento, de modo a colocar o painel fotovoltaico na posição desejada.

Os dispositivos atuadores são motores de passo de baixa potência acoplados a redutores mecânicos, para reduzir o consumo do motor e trabalhar com velocidades reduzidas e precisão no posicionamento.

As variáveis coletadas para análise foram: tensão e corrente em cada módulo (para posterior cálculo da potência e da energia geradas), temperatura e radiação solar. A medida de tensão do módulo é feita de maneira direta, medindo a tensão nos terminais do painel fotovoltaico em intervalos de 1 minuto. A medição da corrente fornecida pelo módulo fotovoltaico é medida através dos valores da tensão sobre um resistor conectado em série com cada uma das cargas resistivas (*shunt*), também em intervalos de 1 minuto.

O PT100, que é um sensor de temperatura com alta estabilidade térmica e mecânica, excelente linearidade e resistente a intempéries, estão instalados na superfície de ambos os painéis e também dentro do ambiente onde se encontram os equipamentos (armário de aço), para medida da temperatura nestes locais.

A medida de radiação solar é obtida a partir de dois sensores de radiação global colocados nos planos dos painéis e um terceiro sensor em posição horizontal em relação ao solo, para medida da radiação solar global incidente no ambiente. Além de controlar o movimento dos motores de passo, o CLP monitora todo o sistema, lendo e armazenando os dados (tensão, corrente, temperatura, radiação) utilizados para avaliar o comportamento do sistema. Os dados são obtidos a partir de sensores de radiação solar, sensores de temperatura, sensores de corrente e de tensão (ALVES, 2008).

De acordo com Alves, 2008 a utilização de um Controlador Lógico Programável para controle do movimento e coleta dos dados experimentais apresentou bom desempenho, pois este tipo de Controlador apresenta características importantes de flexibilidade, facilidade de programação e reprogramação, grande quantidade de portas de entrada e saída e robustez para operação em ambientes externos, sujeito a intempéries.

O retorno do investimento feito para instalação de um sistema fotovoltaico com posicionamento automático ocorre em um tempo inferior ao tempo necessário para recuperação do investimento realizado na instalação de um sistema fotovoltaico fixo, justificando sua viabilidade econômica uma vez que a média do ganho na geração (Móvel/Fixo) foi de 53,10%.

### 3. DESENVOLVIMENTO

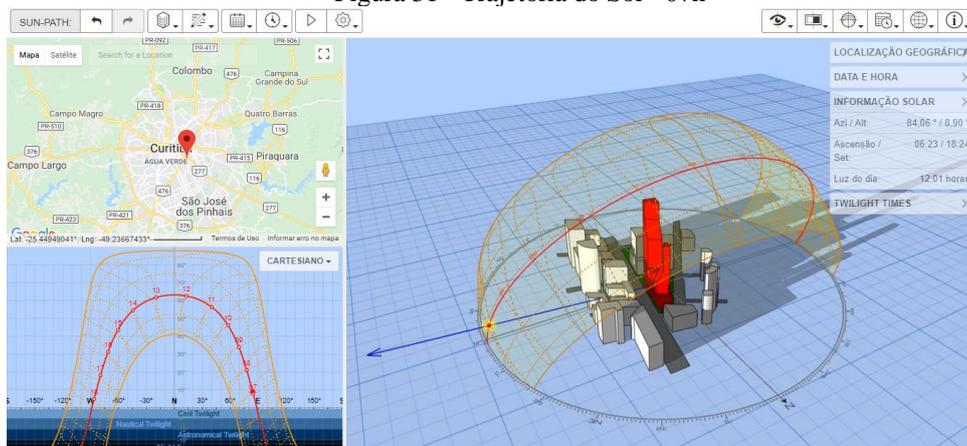
Este capítulo mostra o andamento do desenvolvimento do projeto como, o mapeamento solar para alimentar o programa de controle e os elementos já adquiridos para implementação de ambos os sistemas.

#### 3.1 TRAJETÓRIA SOLAR

Através de um simulador de projeção da trajetória solar, que explora as relações entre diferentes tipos de diagrama do caminho do Sol e suas projeções de altitude, foi possível simular a trajetória do sol inserindo a localidade da cidade de Curitiba (onde será instalado o seguidor solar) no mapa do simulador no qual é possível observar os ângulos de inclinação ao longo do dia e o sombreamento como mostram as Figuras 31, 32, 33, 34 e 35. O mapeamento foi feito para cada estação do ano para que o seguidor possa ajustar seu ângulo com maior exatidão de acordo com a estação.

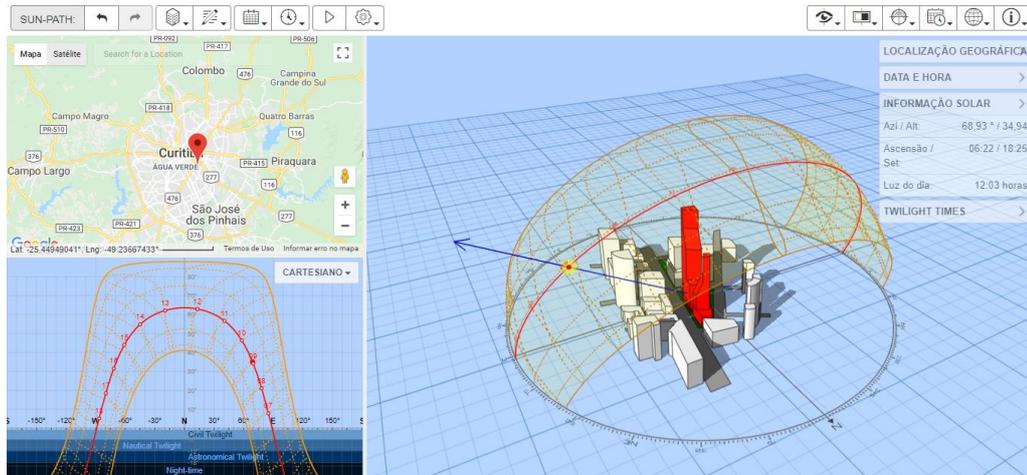
O simulador *Sun Path* foi projetado pelo Dr. Andrew Marsh, arquiteto, consultor de *design*, acadêmico e desenvolvedor de *software*. Andrew trabalhou em muitos projetos de construção orientados para o desempenho em todo o mundo e criou uma ampla gama de *softwares* de projeto técnico e analítico que agora são usados internacionalmente tanto na educação quanto na prática (MARSH, 2018).

Figura 31 - Trajetória do Sol - 07h



Fonte: 3D SunPath

Figura 32 - Trajetória do Sol - 10h



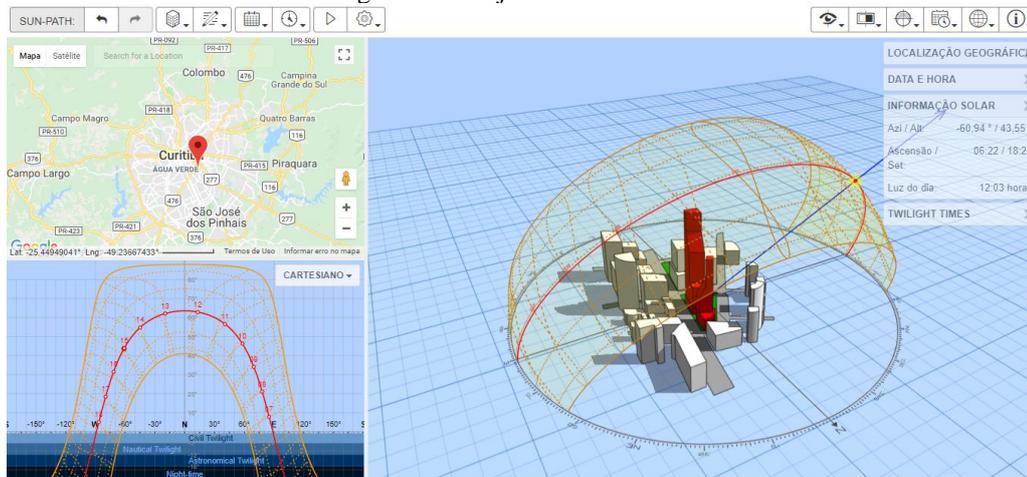
Fonte: 3D SunPath

Figura 33 - Trajetória do Sol - 12h



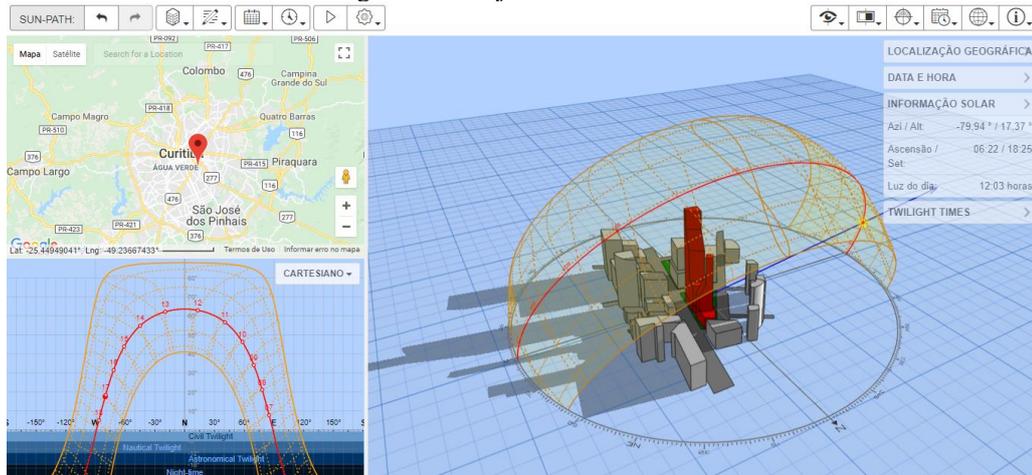
Fonte: 3D SunPath

Figura 34 - Trajetória do Sol - 15h



Fonte: 3D SunPath

Figura 35 - Trajetória do Sol - 17h

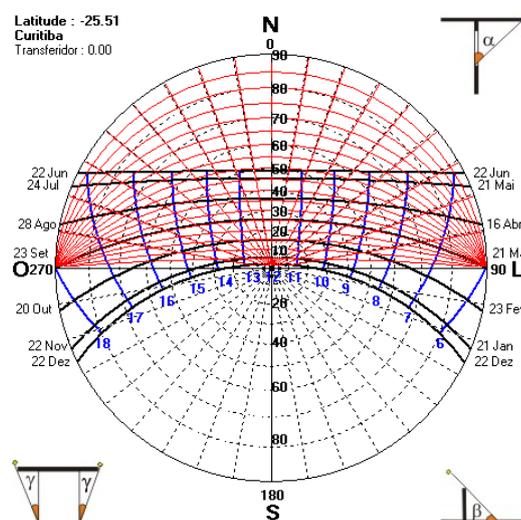


Fonte: 3D SunPath

### 3.2 TRAJETÓRIA SOLAR DURANTE O ANO

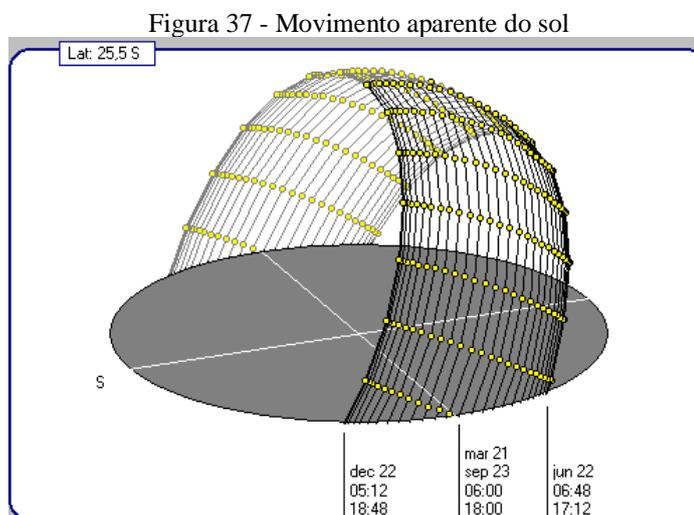
Assim como para o mapeamento da trajetória solar ao longo do dia, também foi utilizando um *software* para mapear a variação de ângulo da trajetória solar em função das estações do ano. Foi utilizado os *software Sunpath 1.0* para obter o movimento do sol aparente e o *software SOL-AR 6.2* para determinar o diagrama solar de Curitiba. Em ambos os *softwares* são inseridos os dados relacionados a região e também a latitude para se obter os diagramas como mostram as figuras abaixo. A Figura 36 mostra a carta solar da cidade de Curitiba indicando a latitude de 25,51° e as variações existentes em diferentes períodos.

Figura 36 - Diagrama Solar de Curitiba



Fonte: Software SOL-AR 6.2

Para uma melhor visualização da trajetória solar na cidade de Curitiba, a Figura 37 mostra um diagrama da movimentação aparente do sol com uma latitude de  $25,5^\circ$  obtida através da figura anterior.



Fonte: Software Sunpath 1.0

Com o diagrama e a determinação do movimento solar é possível visualizar a inclinação da trajetória do sol em diferentes épocas do ano.

### 3.3 ESTRUTURA DO PROTÓTIPO

#### 3.3.1 Estrutura Mecânica

Para implementação do protótipo do seguidor solar, foi desenvolvida uma estrutura para acoplar o módulo fotovoltaico tal que, o mesmo pudesse realizar a movimentação no eixo horizontal e vertical. O material utilizado foi um tubo de aço carbono comum e formato quadrado designado como Metalon. As aplicações do Metalon são variadas, uma vez que esse tubo pode ser utilizado tanto para estruturas leves quanto para aquelas de situações extremas, como o setor da indústria química, na fabricação de grades e portões, obras arquitetônicas, tubulações elétricas e hidráulicas e equipamentos para a área *fitness*.

Para o desenvolvimento da estrutura mecânica foram utilizadas quatro barras de 3 metros de metalon, onde foram divididas em estrutura superior referente a movimentação do eixo vertical e a estrutura inferior referente a movimentação do eixo horizontal e base de sustentação como mostra a Figura 38.

Figura 38 - Estrutura mecânica do seguidor solar



Fonte: O Autor

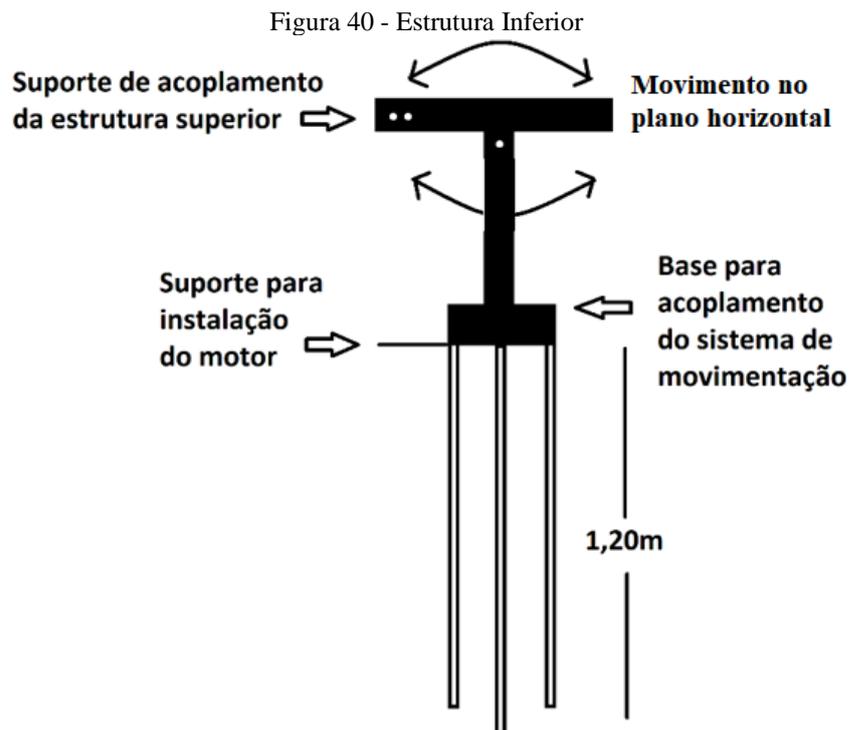
A primeira fase da implementação foi o desenvolvimento da estrutura superior, onde foi construída e testada a movimentação do eixo vertical. A Figura 39 mostra a estrutura do eixo superior onde será acoplado o módulo e fará a movimentação vertical.

Figura 39 - Estrutura Superior



Fonte: O Autor

A estrutura da parte inferior foi projetada tal que pudesse servir de base de sustentação como também acoplar o motor, a placa de controle de automatização do seguidor e todo mecanismo de movimentação do eixo horizontal. A Figura 40 mostra o projeto mecânico onde existem três hastes responsáveis em sustentar a estrutura. A altura das hastes é de 1,20 metros onde 60 cm serão enterrados no solo para uma melhor fixação. O projeto mecânico completo é apresentado no Apêndice E.



Fonte: O Autor

### 3.3.2 Sistema de Movimentação com redutor

Para a movimentação do motor foi necessário a implementação de um sistema de redução acoplado ao motor e a estrutura de movimentação horizontal. Em função do motor utilizado não ter um torque necessário para movimentar toda a estrutura mecânica além do módulo fotovoltaico, esse redutor auxiliou na distribuição de carga fazendo com que o motor faça toda a movimentação com maior facilidade. O redutor utilizado foi na proporção 14:1, ou seja, a cada 14 voltas do motor, a coroa do redutor onde é acoplada a estrutura superior da uma volta completa. O sistema de redução foi desenvolvido no curso de Técnico em Mecânica no SENAI – CIC onde os alunos fazem todos a execução do protótipo. A Figura 41 mostra o sistema de redução utilizada para movimentação do eixo horizontal.

Figura 41 - Sistema de redução para movimentação



Fonte: O Autor

### 3.3.3 Implementação do Protótipo

Com todas as estruturas montadas separadamente, foram unidas para a implementação completa do seguidor no local de realização do experimento. Para tanto, primeiramente foi acoplado o sistema de redução à estrutura inferior já com uma adaptação para instalar o eixo do motor de passo utilizado na movimentação como é possível observar na Figura 42.

Figura 42 - Acoplamento da estrutura com o redutor



Fonte: O Autor

Após esse acoplamento e com o motor já instalado, foi instalada a estrutura inferior no solo onde foi cavado 60 cm de profundidade para que houvesse uma sustentação mais eficaz. Após instalado a estrutura, foi aplicada uma camada de concreto como é possível observar na Figura 43.

Figura 43 - Instalação da estrutura mecânica no solo



Fonte: O Autor

Por fim foi conectada na base inferior a estrutura superior e instalado o módulo fotovoltaico modelo KC130TM para que a implementação ficasse completa. Foram testadas manualmente as movimentações horizontais e vertical antes da automatização para verificação de toda a junção das estruturas mecânicas. A Figura 44 mostra a implementação completa do seguidor solar.

Figura 44 - Implementação do seguidor de 2 eixos



Fonte: O Autor

Na estrutura superior onde fica o módulo, foi instalado um fuso com uma alavanca que permite fazer a movimentação vertical, é possível também substituir essa alavanca por um eixo

de motor propiciando também a automatização desse eixo conforme é possível observar na Figura 45.

Figura 45 - Fuso para movimentação vertical



Fonte: O Autor

### 3.3.4 Módulo Fotovoltaico Fixo

Um módulo fotovoltaico também do modelo KC130TM, foi instalado em uma estrutura fixa, com inclinação de  $25^\circ$  referente a média de inclinação da cidade de Curitiba para melhor incidência solar. O módulo fixo foi instalado ao lado do seguidor solar orientado ao norte onde, as grandezas de corrente de curto circuito ( $I_{sc}$ ) e tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ) de ambos os circuitos, serão coletadas para cálculo de potência e posteriormente comparadas para análise de ganho de geração de energia do seguidor em função do módulo fixo. A Figura 46 apresenta a instalação do módulo fotovoltaico fixo ao lado do seguidor solar.

Figura 46 - Instalação do módulo fixo ao lado do seguidor



Fonte: O Autor

### 3.4 DESENVOLVIMENTO DA AUTOMATIZAÇÃO DE MOVIMENTAÇÃO

A automatização do sistema consiste em fazer a movimentação do eixo horizontal do seguidor solar, em tempos pré-determinados de acordo com o mapeamento solar feito. A automatização foi desenvolvida em um arduino que consiste em uma plataforma de *hardware* livre, projetado com um microcontrolador Atmel. O *software* será desenvolvido na linguagem de programação do próprio arduino que é baseada na linguagem C++ com pequenas modificações. Essa automatização basicamente é feita para ativar o motor de passo acoplado na estrutura inferior do seguidor que fará a movimentação horizontal, para tanto, o *software* tem como objetivo enviar a cada uma hora pulsos para a movimentação do motor. O código de programação foi desenvolvido para aplicação em *drivers* específicos para motores de passo, assim o programa apenas envia através do Arduino um pulso para cada passo (*STEP*) e um sinal que define o sentido de rotação (*DIR*). A mudança de passos por resolução, no *driver* é feita pelas micro chaves contidas nele. Para os pulsos serem enviados em um tempo pré determinado, também é necessário a utilização de um RTC (*Real Time Clock*), ou seja, um Relógio de Tempo Real (RTC). Esse módulo tem 56 bytes de memória não-volátil disponível para uso, é capaz de armazenar e fornecer informações completas de data como dia da semana, dia do mês, mês, ano além das funções de horas, minutos e segundos, nos formatos de 12 ou 24 horas. O código de programação utilizado é apresentado no Apêndice A. A Figura 47 apresenta os elementos utilizados para a movimentação sendo eles o Arduino, o motor de passo e o *drive* de acionamento respectivamente.

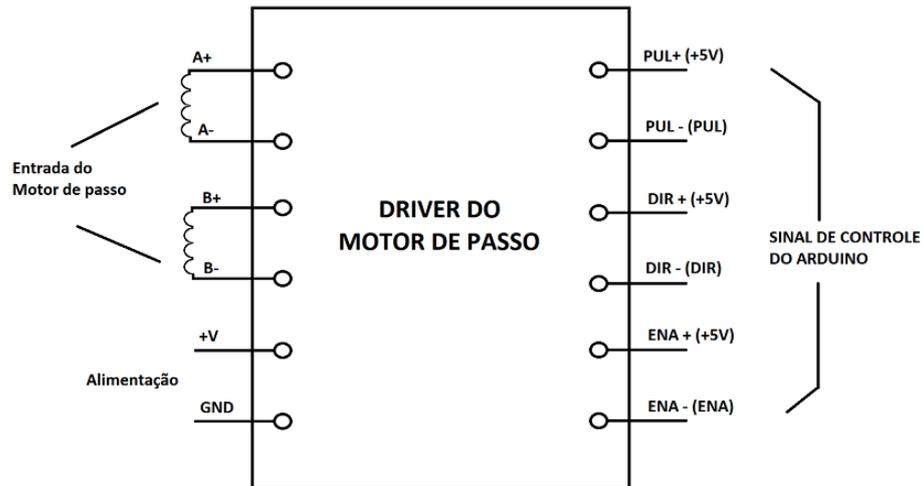
Figura 47 - Elementos para automatização do seguidor



Fonte: O Autor

A Figura 48 apresenta o esquema de ligação entre o *driver*, o motor de passo e o Arduino. A ligação do motor é feita nos pinos A+, A-, B+ e B-, as seis entradas indicadas para ligação do Arduino, tem a função de enviar sinal para a quantidade de passos realizadas pelo motor, pela direção de movimentação (direita e esquerda) e energização do motor.

Figura 48 - Esquema de ligação do motor, driver e Arduino



Fonte: O Autor

A implementação da programação no Arduino tem como objetivo, fazer o motor se movimentar (no eixo horizontal) de forma que o seguidor esteja em um ângulo correspondente a trajetória do sol em relação ao norte geográfico, em cada horário específico e estação do ano de acordo com o mapeamento feito através do *software 3D SunPath*. A Tabela 2 mostra que a partir das 07h00 da manhã no outono, o ângulo azimutal estará deslocado  $87^\circ$  a leste em relação ao norte geográfico, no qual diminui para  $83^\circ$  na hora seguinte (08h00) e assim sucessivamente. A tabela mostra também que o mapeamento da variação do ângulo azimutal, foi feito em cada estação do ano, visto que a variação do ângulo de inclinação solar também influencia na trajetória do sol.

Tabela 2 - Variação de ângulo x Horas do dia

Hora	Variação de Ângulo Azimutal (°)			
	Outono	Inverno	Primavera	Verão
7:00	87	65	84	107
7:30	83	61	80	105
8:00	80	58	77	103
8:30	76	54	73	101
9:00	71	49	68	98
9:30	67	43	62	96
10:00	59	37	56	93
10:30	52	32	47	91
11:00	42	23	38	87
11:30	32	16	22	81
12:00	14	6	5	59
12:30	357	348	343	310
13:00	340	339	332	279
13:30	326	331	320	273
14:00	314	325	309	269
14:30	305	318	301	267
15:00	298	313	295	264
15:30	292	308	290	262
16:00	288	303	285	260
16:30	283	300	282	257
17:00	280	298	278	255
17:30	276	297	275	253
18:00	273	293	271	250
18:30	270	290	268	247
19:00	266	288	264	244

Fonte: O Autor

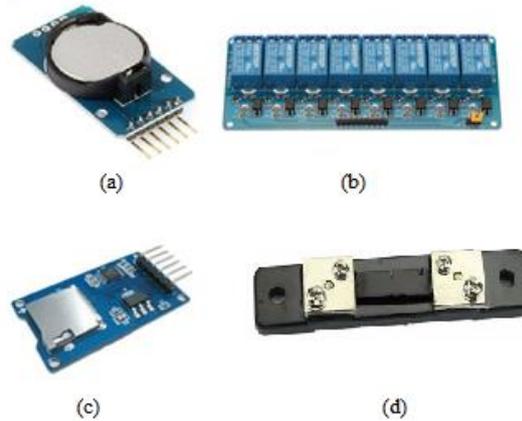
### 3.4.1 Aquisição de Dados

O sistema de aquisição de dados é um importante elemento no sistema, visto que será responsável em obter os valores para cálculo dos parâmetros dos índices de mérito do sistema e comparação entre o seguidor solar e o sistema instalado com ângulo fixo.

A aquisição será feita pelo mesmo Arduino utilizado para fazer a movimentação, porém serão utilizados elementos adicionais como RTC (*Real Time Clock*), módulo de relé, um módulo SD *Card* e um resistor *shunt*. O módulo RTC é um relógio em tempo real, que controla a hora atual e que pode ser usado para programar ações em um determinado momento, o módulo de relé será responsável em comutar chaves para leitura de variáveis como  $V_{OC}$  e  $I_{SC}$  dos

módulos fotovoltaicos, o *SD card* será responsável em armazenar as medições feitas pelo sistema. Um resistor *shunt* de  $3,75\text{m}\Omega$  será utilizado para medir a corrente, uma vez que o mesmo oferece uma queda de tensão muito baixa, assim é possível através da tensão medida pelo arduino, calcular a corrente equivalente. A Figura 49 apresenta respectivamente os módulos de RTC, relé, *SD card* e resistor *shunt*.

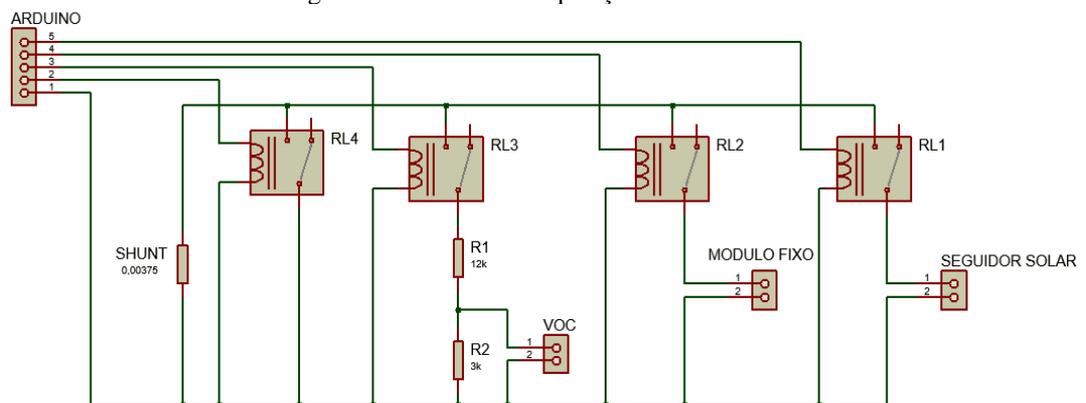
Figura 49 - Elementos para aquisição de dados – (a) RTC, (b) Módulo de relé, (c) *SD card*, (d) Resistor *shunt*



Fonte: O Autor

O circuito de aquisição de dados será responsável em fazer as medições de  $V_{OC}$  e  $I_{SC}$  tanto do módulo fotovoltaico instalado no seguidor solar, quanto no módulo de ângulo fixo, para tanto, as medições serão feitas a partir de comutações do módulo de relés onde, um será responsável pela medição de tensão, outro pela medição de corrente e outros dois comutarão separadamente habilitando qual módulo será feita a medição, conforme mostra o circuito da Figura 50.

Figura 50 - Circuito de aquisição de dados



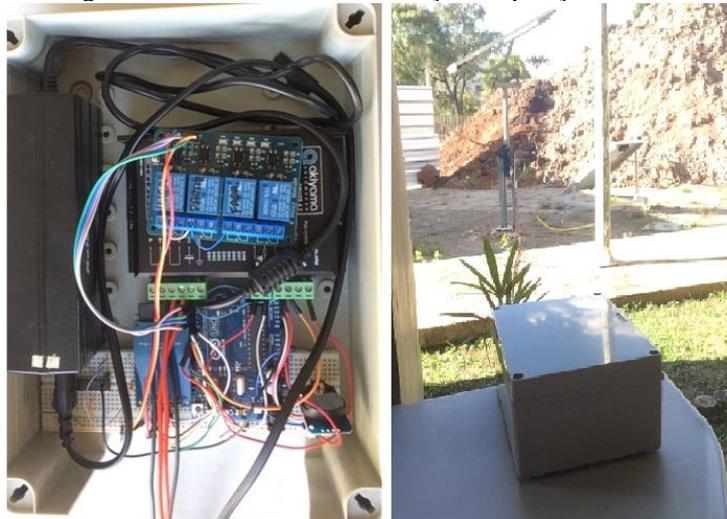
Fonte: O autor

O relé 4 habilita a medição de corrente ( $I_{sc}$ ), o relé 3 habilita a medição de tensão ( $V_{oc}$ ), o relé 1 habilita as medições no módulo do seguidor solar e o relé 2 habilita as medições do módulo do ângulo fixo. Sendo assim para medir a corrente do módulo do seguidor os relés 1 e 4 devem ser habilitados e assim segue a lógica para as outras medições. O sinal para habilitar os relés vem do Arduino que também coleta as medições e grava no *SD card*. Para medição de tensão são ligados em série com o circuito dois resistores no valor comercial de  $12k\Omega$  e  $3k\Omega$  para que o sinal de tensão seja compatível com a entrada de tensão do Arduino. Porém como os resistores possuem um valor de tolerância, foi realizado um teste de bancada para que o coeficiente de multiplicação do sinal de tensão seja referente aos valores reais dos resistores.

O Apêndice B mostra o fluxograma da lógica e a ordem de comutação dos relés para habilitação das medições e leitura das variáveis ( $V_{oc}$  e  $I_{sc}$ ), também é possível verificar a rotina de programação no Apêndice C. Essa rotina se repete a cada 5 minutos para maior confiabilidade na comparação, cálculos de potência e índices de mérito. A programação também trata os dados para que a partir das medições seja possível o cálculo dos valores de máxima potência ( $V_{MP}$ ,  $I_{MP}$  e  $P_{MP}$ ).

Todos os elementos utilizados na automatização e na aquisição de dados foram alocados em uma caixa de ABS, onde estão concentrados o Arduino, o RTC, o *SD card*, o módulo de relés, o *drive* de acionamento do motor, uma fonte de alimentação de 12V e também um pequeno *proto-board* para realização de algumas ligações físicas entre o arduino e os demais elementos conforme é possível verificar na Figura 51. O sistema foi instalado abaixo de uma marquise a 8 metros do seguidor solar para que seja protegido de ações do tempo como chuvas e ventos fortes.

Figura 51 - Circuito de automatização e aquisição



Fonte: O autor

### 3.5 DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Para determinação dos valores de máxima potência ( $V_{MP}$ ,  $I_{MP}$  e  $P_{MP}$ ), é necessário encontrar os valores dos coeficientes  $CoefV$  e  $CoefI$  mencionados no item 2.8. Para tanto foi realizado um ensaio no módulo fotovoltaico para determinação de suas características elétricas e conseqüentemente desses coeficientes.

O ensaio foi realizado em um dia de céu limpo onde está instalado o módulo fotovoltaico (SENAI CIC) perto das 14h onde, submeteu-se o módulo KC130TM à irradiância solar, no plano horizontal, e mediu-se tensão de circuito aberto e corrente de curto circuito. O *datasheet* do módulo contendo todas as suas características é apresentado do Anexo A.

Para esse ensaio foi utilizado um reostato com uma resistência de  $270\Omega$ , um multímetro ligado em série para medição de corrente de curto circuito e um multímetro ligado em paralelo para medição da tensão de circuito aberto, conforme mostra a Figura 52. Foi feita a variação da resistência do reostato do menor para o maior valor, assim foi possível observar a variação dos valores de tensão e corrente para o levantamento da curva I-V.

Figura 52 - Ensaio do módulo fotovoltaico

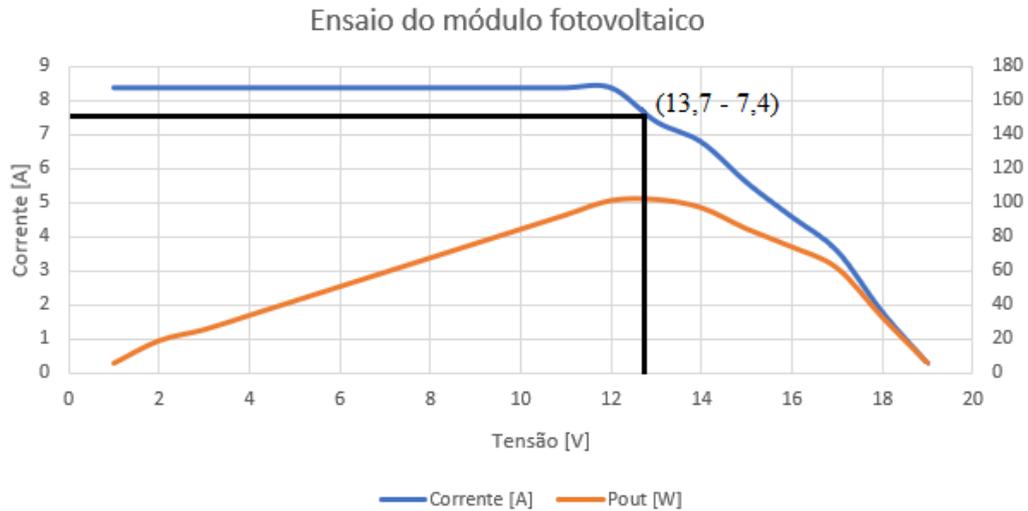


Fonte: O autor

Com os valores de tensão e corrente medidos variando a resistência do reostato, foi possível levantar a curva I-V e conseqüentemente determinar os coeficientes  $CoefV$  e  $CoefI$  utilizando as equações (1) e (2) apresentadas no item 2.8. A Figura 53 apresenta o gráfico da

curva I-V levantada a partir dos pontos medidos. As medições feitas para que fosse levantada a curva são apresentadas no Apêndice D.

Figura 53 - Curva I-V do módulo ensaiado



Com o ensaio chegou-se a um valor de máxima potência de 101,38W com valores de tensão de 13,7V e corrente de 7,4A, os valores de  $V_{oc}$  e  $I_{sc}$  medidos no ensaio foram respectivamente 19,58V e 8,67A, portanto utilizando as equações (1) e (2) pode-se definir os coeficientes como:

$$CoefV = \frac{V_{MP}}{V_{oc}} = 0,70$$

$$CoefI = \frac{I_{MP}}{I_{sc}} = 0,85$$

A partir disso, os valores de  $V_{oc}$  e  $I_{sc}$  medidos pelo sistema de aquisição de dados serão multiplicados por esses coeficientes para assim, ser possível calcular os valores de máxima potência de ambos os módulos.

### 3.6 CIRCUITO COMPLEMENTAR PARA PARA AQUISIÇÃO DE DADOS

No circuito de aquisição de dados, foi necessário um circuito complementar para medição da corrente de curto circuito ( $I_{sc}$ ) dos módulos fotovoltaicos no seguidor solar e da estrutura fixa. Para a medição de corrente, foi utilizado um resistor *shunt* de 3,75mΩ próprio para medir corrente de até 20A onde o mesmo oferece uma queda de tensão muito baixa. Para

essa medição, o arduino recebe em sua entrada analógica a tensão em cima do resistor, assim conhecendo sua resistência e multiplicando pela tensão lida pelo Arduino é possível calcular a corrente que está passando pelo resistor.

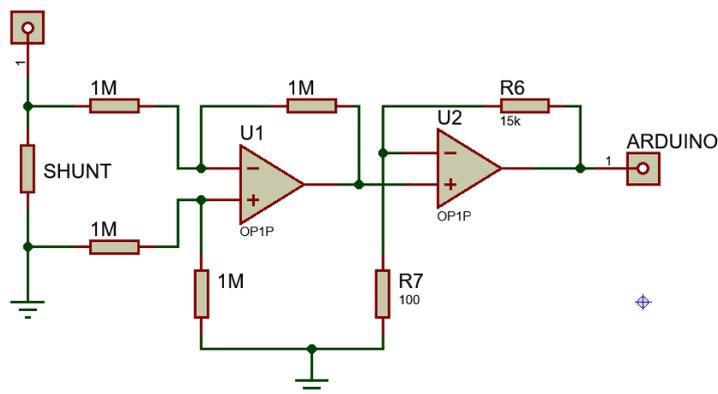
No entanto a queda de tensão no resistor é muito baixa e suas variáveis são indetectáveis pela entrada analógica do arduino, por esse motivo se faz necessário um circuito complementar que aumente esse valor de tensão, no qual as variações de tensão sejam detectáveis pelo arduino e assim possa fornecer valores precisos em sua medição. Esse circuito é feito a partir de amplificadores operacionais que em um primeiro estágio servem como um subtrator entre a tensão do resistor e a referência (terra) para assegurar que não haja nenhuma outra queda de tensão e posteriormente um circuito não inversor com ganho igual a 150 para que quando a corrente máxima (9A) a tensão lida pela entrada do arduino seja de 5V.

O valor do ganho do circuito do amplificador, se chegou a partir da análise feita de que a corrente máxima apresentada pelo módulo tem uma queda de tensão de 33,75mV e essa tensão precisa ser amplificada para 5V, assim é possível identificar todas as variações de tensões no resistor a fim de calcular a corrente que passa por ele. Dessa forma sendo conhecida as tensões de entrada e saída no circuito do amplificador operacional é possível calcular o ganho através da equação (11).

$$G = \frac{V_o}{V_i} \quad (11)$$

A partir do cálculo do ganho feito, foi possível dimensionar o circuito para que a tensão do resistor *shunt* obtenha um ganho de 151 compatível a leitura do arduino. A Figura 54 mostra o diagrama do circuito complementar para a medição de corrente dos módulos fotovoltaicos.

Figura 54 - Circuito complementar para aquisição de dados  
MODULO PV



Fonte: AYABE, *et al.* 2017

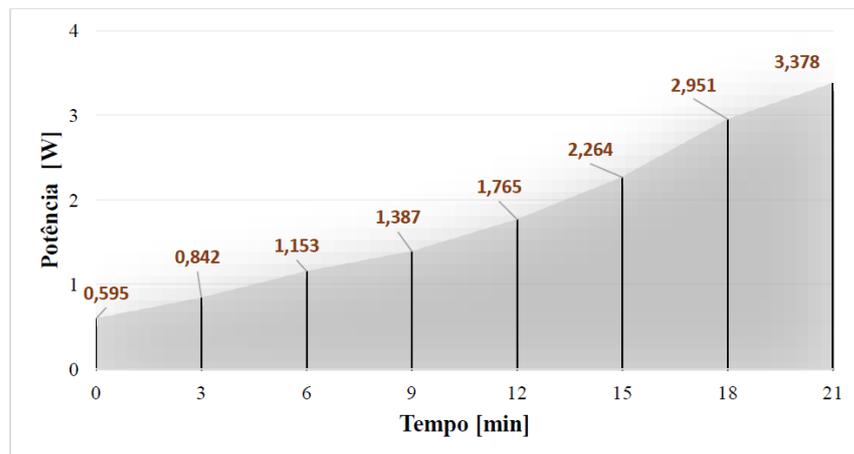
Os apêndices F e G mostram respectivamente o diagrama do Arduino com seus circuitos externos para a automatização do seguidor solar e o diagrama eletrônico completo de aquisição de dados juntamente com o circuito de ganho de sinal para medição da corrente de curto circuito.

### 3.7 ENERGIA GERADA PELO MÓDULO FOTOVOLTAICO

Para análise dos índices de mérito do sistema é necessário analisar o desempenho energético dos módulos fotovoltaicos, para tanto, foi necessário calcular as áreas sob as curvas de potência extraídas dos módulos em cada dia. Para essa análise foi calculada a integral das curvas de geração, obtendo-se uma medida de energia elétrica disponibilizada, em Watt x hora [Wh]. Ayabe, et al. (2017) apresenta um método para esse cálculo utilizando o método dos trapézios, considerando o intervalo constante entre amostras igual a 3 minutos visando determinar qual energia que poderia ter sido gerada por cada módulo ao longo do dia, se sua potência de saída estivesse sendo de fato transferida a um inversor com buscador de máxima potência (MPPT), porém para esse estudo, as amostras serão realizadas a cada 5 minutos.

A Figura 55 apresenta a curva de potência representada por Ayabe, mostrando que se forem considerados os intervalos de medição e as leituras obtidas, pode-se formar trapézios retângulos sequenciais.

Figura 55 - Trapézios para integração de uma curva de potência.



Fonte: AYABE, *et al.* 2017

A partir disso pode-se determinar que, para cada duas amostras consecutivas de potência, calcula-se uma medida de energia por meio da equação (12).

$$A_n = (B_n + b_n) \cdot \frac{h}{2} \quad (12)$$

Onde:

- $A_n$  é a área do  $n$ ésimo trapézio, parcela da área sob a curva de potência disponível, correspondente a um pacote de energia;
- $B_n$  é a base maior do  $n$ ésimo trapézio, que corresponde ao maior valor de potência entre 2 consecutivos;
- $b$  é a base menor do  $n$ ésimo trapézio, que corresponde ao menor valor de potência entre 2 consecutivos;
- $h$  é a altura do  $n$ ésimo trapézio, aqui assumida como o intervalo de tempo entre duas medições consecutivas, constante e correspondente a 5 minutos (0,083 hora);

As medições serão realizadas entre 07h e 19h em um intervalo de 5 minutos, sendo assim, serão coletadas 144 amostras de potência de ambos os módulos, então a energia total gerada  $E$  por cada um dos módulos, em Wh, ao longo de um dia completo, pode ser aproximada pela equação (13).

$$E \approx \sum_{n=2}^{n=144} (P_{n-1} + P_n) \cdot 0,083 \quad (13)$$

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A comparação da geração de energia entre seguidor de dois eixos e o módulo fotovoltaico fixo, tem como objetivo apresentar o ganho em relação a diferentes estações do ano, mostrando que não só a mudança do ângulo azimutal, mas também a variação do ângulo de inclinação do sol em cada estação também contribui no ganho.

Em julho de 2018 foram concluídas a construção da estrutura mecânica e do sistema de automatização da movimentação e aquisição de dados do seguidor solar, por fim todo o sistema foi instalado na área onde seriam feitas as medições. Os experimentos onde houve a aquisição de dados das variáveis necessárias para o cálculo do desempenho do seguidor solar foram feitos em duas etapas. Primeiramente os ângulos azimutal e de inclinação solar foram ajustados de forma manual, assim foi possível verificar se os ângulos obtidos através do mapeamento eram os que realmente geravam maior energia. Sendo assim o seguidor era posicionado no ângulo mapeado, onde eram feitas as medições de  $V_{OC}$  e  $I_{SC}$  e em seguida, os ângulos eram alterados para mais e para menos para ver o comportamento das variáveis.

Por se tratar de um seguidor de dois eixos, se faz necessário também demonstrar o ganho da geração de energia com a variação nos dois ângulos, sendo assim, verificou-se como o sistema se comportava com apenas a variação do ângulo azimutal e depois com a variação também do ângulo da altitude solar como pode-se ver nos resultados adiante.

Os demais experimentos se deram nos meses de agosto, setembro, outubro de 2018 e março, abril e maio de 2019, demonstrando assim uma comparação entre o seguidor solar e o módulo fixo em diferentes estações do ano. O módulo do seguidor solar movimentou-se em um intervalo de uma em uma hora, pois verificou-se que a variação no ganho de energia com o módulo movimentando-se a cada 30 minutos conforme o mapeamento, era quase que desprezível.

A seguir, serão demonstrados os resultados das comparações feitas da geração de energia entre, o seguidor solar e o módulo fotovoltaico fixo. As experiências apresentadas são de casos específicos mostrando o comportamento em diferentes situações, como dias ensolarados, parcialmente nublados e dias chuvosos. Assim é possível comparar os dois sistemas (seguidor solar e módulo fixo) em todas as situações possíveis avaliando, ou não a utilização desse sistema.

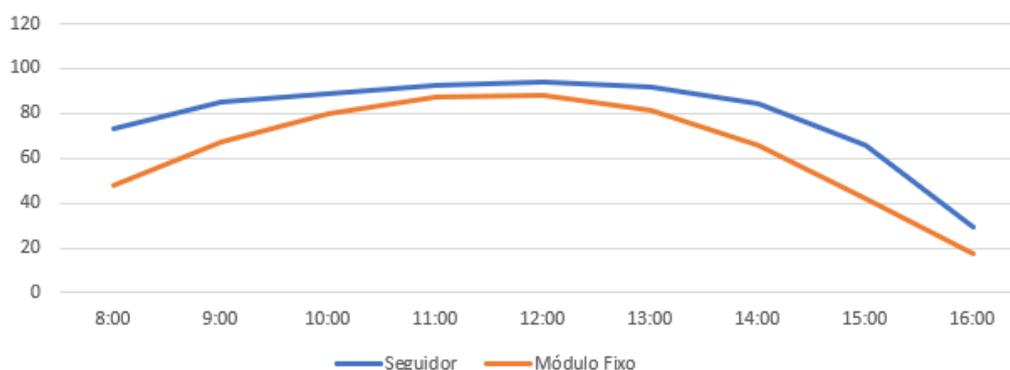
Também serão demonstradas a energia gerada e produtividade como elementos de índices de mérito dos dois sistemas ao longo das experiências e também um estudo sobre o

consumo de energia do seguidor solar para verificação da relação entre o ganho de potência e a potência consumida pelo sistema de automatização.

#### 4.1 ANÁLISE DE DESEMPENHO NO INVERNO

No dia 18 de julho de 2018 com o dia ensolarado, foram feitas as primeiras medições, variando tanto o ângulo azimutal como o ângulo de inclinação de acordo com o mapeamento feito para essa estação do ano (inverno). Sendo assim o ângulo de inclinação foi ajustado em 43° enquanto o módulo fixo estava em 25° (ângulo ideal para Curitiba). Assim como é possível observar na Figura 56, houve um ganho maior do seguidor solar na geração de energia que correspondeu a 22% em relação ao módulo fixo.

Figura 56 - Comparativo de Potência (17/07/18)  
Comparativo de Potência (Wp)



Fonte: O Autor

Para essa experiência foram calculados os índices de mérito tanto do seguidor solar quanto do módulo fixo, assim é possível observar os elementos de índice de mérito como energia gerada, produtividade e a variação de energia gerada entre os módulos fotovoltaicos conforme é apresentado na Tabela 3.

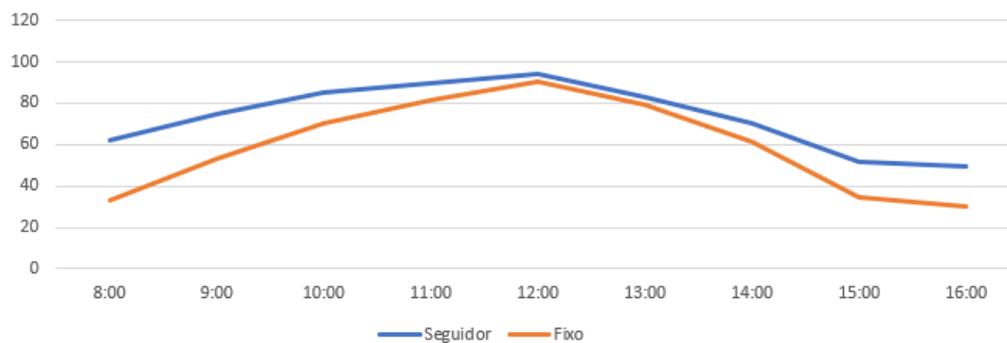
Tabela 3 - Índices de mérito (17/07/18)

Índices de Mérito	Seguidor Solar	Módulo Fixo
Energia Gerada	704,70 Wh	575,89 Wh
Produtividade	5,42 kWh/kWp	4,43 kWh/kWp
Variação de Energia Gerada	22%	-

Fonte: O Autor

Em 14 de agosto de 2018 ainda no inverno foram feitas novas medições em um dia ensolarado que mostram picos no início do dia perto das 08 horas da manhã onde o ganho de potência chega a 86% e perto do final da tarde às 16h o ganho chega a 64%. Isso se deve ao fato de o ângulo no inverno estar ajustado a 43° o que faz com que nessa época tenha maior irradiação sobre ele. Também outro fator que pode contribuir é que pequenas nuvens façam sombreamento somente na direção do módulo fixo deixando a irradiação difusa nesse ponto. Porém são pontos isolados, as demais horas do dia o ganho que em média era de 24% se manteve no padrão das medições de julho conforme é possível observar na Figura 57.

Figura 57 - Comparativo de Potência (14/08/18)  
Comparativo de Potência (Wp)



Fonte: O Autor

A Tabela 4 demonstra os índices de mérito em relação a geração de energia referente ao gráfico acima. É possível verificar que em todos aspectos o seguidor solar apresenta ganho em relação ao módulo fixo.

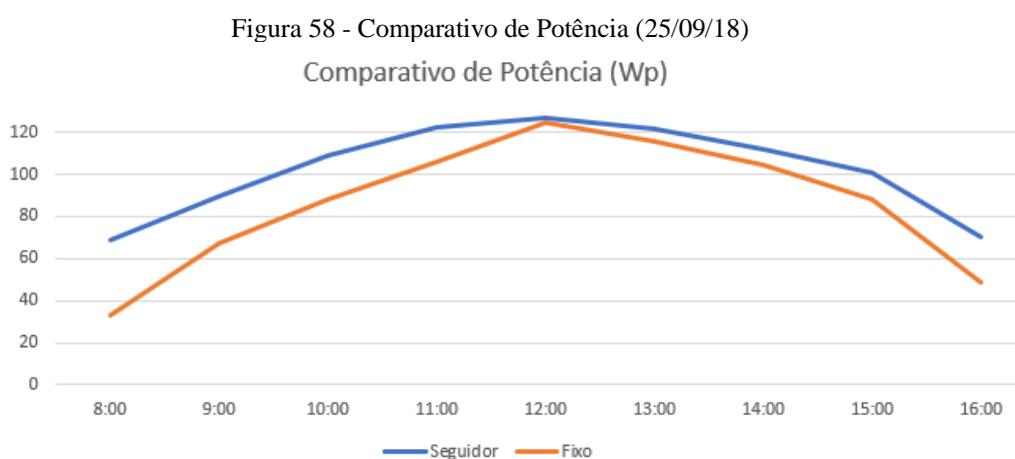
Tabela 4 - Índices de mérito (14/08/18)

Índices de Mérito	Seguidor Solar	Módulo Fixo
Energia Gerada	660,18 Wh	534,45 Wh
Produtividade	5,08 kWh/kWp	4,11 kWh/kWp
Variação de Energia Gerada	24%	-

Fonte: O Autor

## 4.2 ANÁLISE DE DESEMPENHO NA PRIMAVERA

No dia 25 de setembro de 2018 em um dia ensolarado, foram feitas medições onde o ângulo da altitude solar segue a média de inclinação para a cidade de Curitiba que é de 25°. É possível verificar que a média de energia gerada na primavera foi maior que a energia gerada no inverno, conforme é esperado de acordo com média da geração anual de energia na região onde foi feito o estudo. A Figura 58 mostra o ganho na potência média do seguidor solar em relação ao módulo fotovoltaico fixo, onde o mesmo apresenta um ganho médio de 19%.



Fonte: O Autor

A Tabela 5 demonstra os índices de mérito em relação a geração de energia referente ao gráfico acima. É possível verificar que em todos aspectos o seguidor solar apresenta ganho em relação ao módulo fixo.

Tabela 5 - Índices de mérito (25/09/2018)

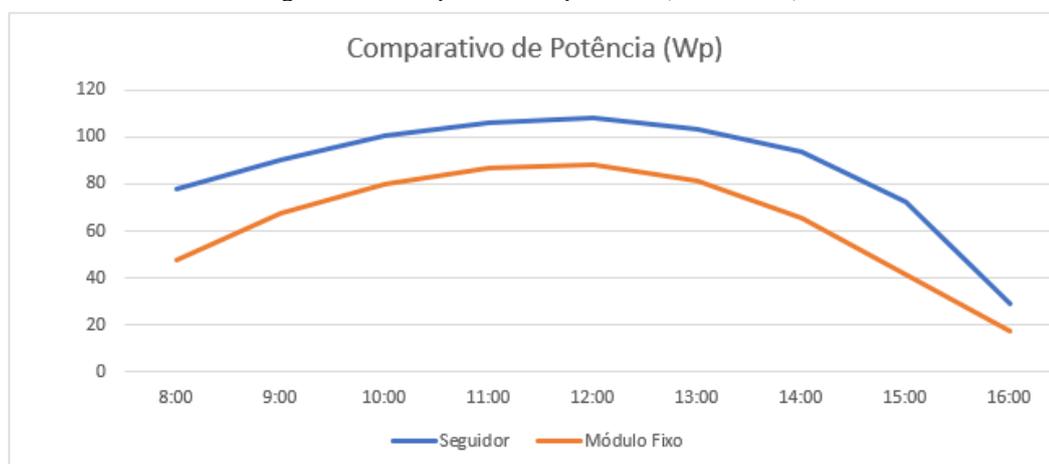
Índices de Mérito	Seguidor Solar	Módulo Fixo
Energia Gerada	921,72 Wh	775,59 Wh
Produtividade	7,09 kWh/kWp	5,97 kWh/kWp
Variação de Energia Gerada	19%	-

Fonte: O Autor

### 4.3 ANÁLISE DE DESEMPENHO NO VERÃO

No dia 02 de março de 2019 foram coletadas novas medições onde a Figura 59 mostra o comparativo da geração dos módulos em um dia ensolarado onde o ângulo de inclinação está ajustado em 10°. O ganho médio na geração de energia foi de 35% com picos de até 73% no final da tarde. O ganho maior em relação ao inverno, se deve ao fato de que a diferença entre o ângulo de inclinação do seguidor em relação ao módulo fixo é de 15° em relação a uma diferença de apenas 18° no inverno. Assim a diferença de irradiação nas diferentes estações é considerável e relevante na geração de energia.

Figura 59 - Comparativo de potência (02/03/2019)



Fonte: O Autor

A Tabela 6 demonstra os índices de mérito em relação a geração de energia no verão. É possível verificar que em todos aspectos o seguidor solar apresenta significativo ganho em relação ao módulo fixo também se comparado com o inverno.

Tabela 6 - Índices de mérito (02/03/2019)

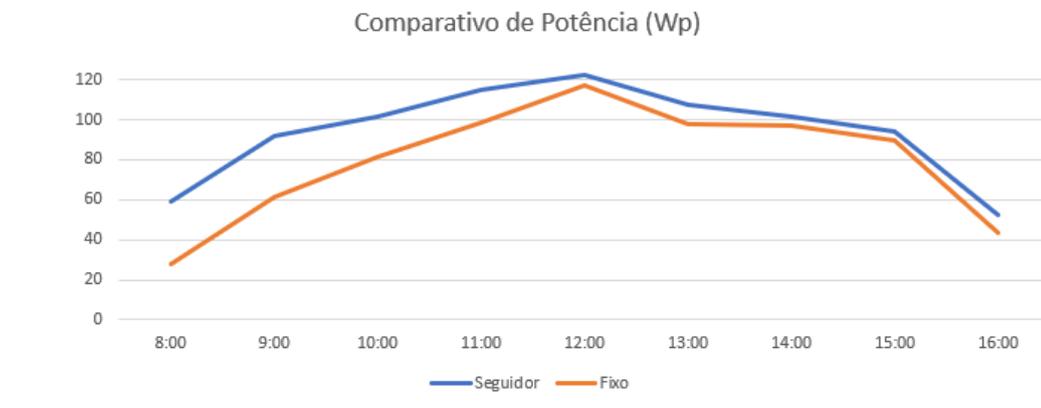
Índices de Mérito	Seguidor Solar	Módulo Fixo
Energia Gerada	781,25 Wh	578,40 Wh
Produtividade	6,01 kWh/kWp	4,45 kWh/kWp
Variação de Energia Gerada	35%	-

Fonte: O Autor

#### 4.4 ANÁLISE DE DESEMPENHO NO OUTONO

No dia 04 de abril de 2019 foram feitas medições que mostram um ganho de potência inicial de 110% e mantendo essa média alta de aproximadamente no período da manhã na faixa de 50%. Durante o período da tarde, apesar de haver ganho do seguidor do solar em relação ao módulo fixo, é um valor consideravelmente menor na média de 9% com pico de 21% ao final da tarde. No outono o ângulo médio da altitude solar também é de 25°, porém é possíveis ajustes para que aumente um pouco o ganho. A Figura 60 apresenta a relação entre os dois módulos onde a média do ganho diário foi de 18%.

Figura 60 - Comparativo de Potência (30/04/19)



Fonte: O Autor

A Tabela 7 demonstra os índices de mérito em relação a geração de energia referente ao gráfico acima. É possível verificar que em todos aspectos o seguidor solar apresenta ganho em relação ao módulo fixo.

Tabela 7 - Índices de mérito (30/04/19)

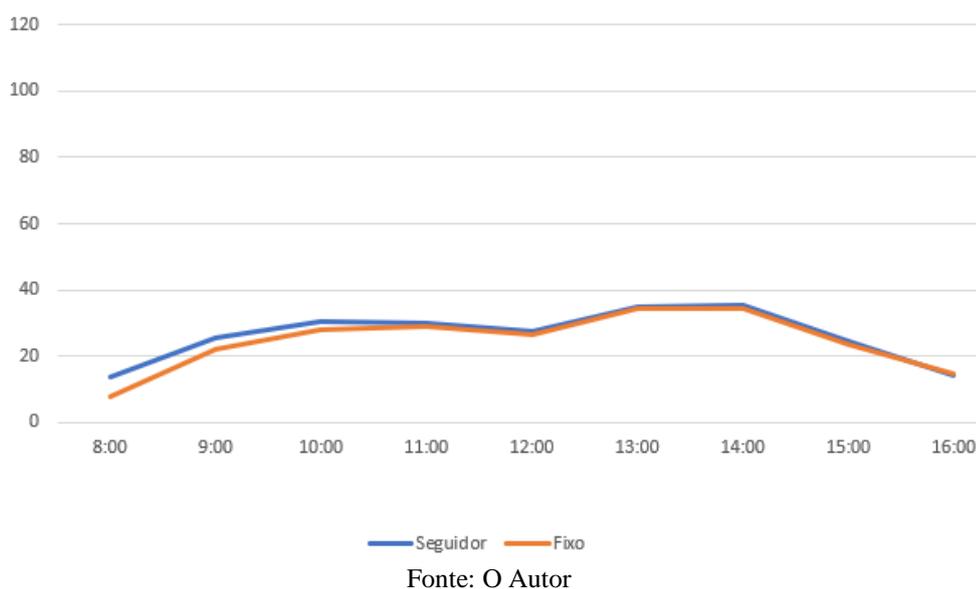
Índices de Mérito	Seguidor Solar	Módulo Fixo
Energia Gerada	845,28 Wh	715,24 Wh
Produtividade	6,50 kWh/kWp	5,50 kWh/kWp
Variação de Energia Gerada	18%	-

Fonte: O Autor

#### 4.5 ANÁLISE DE DESEMPENHO EM DIA NUBLADO/CHUVOSO

Uma análise bastante relevante que também indica a eficiência do seguidor solar, é o seu desempenho em dias nublados e chuvosos. O gráfico apresentado na Figura 61, mostra um comparativo da potência entre o seguidor e o módulo fixo, em um dia em que pela manhã estava nublado e no período da tarde estava chovendo. Devido ao seguidor se movimentar em função do mapeamento feito e não por um sensor procurando a maior irradiação, é certo que em períodos em que nuvens não estiverem encobrindo o sol, o módulo do seguidor solar obterá melhor irradiância. No projeto apresentado no estudo, a média do ganho nas horas que o céu se manteve nublado foi de 21%. No período da tarde onde houveram pancadas de chuvas, os dois módulos se mantiveram na mesma potência, porém sendo um pouco maior em alguns momentos no módulo fixo, isso se explica ao fato que em dias assim o que prevalece é a radiação difusa, ou seja, era possível que em alguns períodos houvesse maior irradiância no módulo fixo que no seguidor. Mesmo assim a média de ganho no dia foi de 7%.

Figura 61- Comparativo de Potência em dia nublado/chuvoso  
Comparativo de Potência (Wp)



A Tabela 8 demonstra os índices de mérito em relação a geração de energia referente ao gráfico acima. É possível verificar que mesmo com pequenas diferenças em todos aspectos o seguidor solar apresenta ganho em relação ao módulo fixo.

Tabela 8 - Índices de mérito (dia nublado/chuvoso)

Índices de Mérito	Seguidor Solar	Módulo Fixo
Energia Gerada	236,99 Wh	220,49 Wh
Produtividade	1,82 kWh/kWp	1,70 kWh/kWp
Variação de Energia Gerada	7%	-

Fonte: O Autor

#### 4.6 COMPARAÇÃO DE GANHO ENTRE SEGUIDORES SOLARES

O ítem 2.12.3 apresenta um estudo da arte sobre o desempenho de seguidores solares, onde mostra experiências em diferentes localidades com seguidores de um e dois eixos. Esses estudos servem como base para que se possa comparar a eficiência do seguidor solar projetado nesse estudo, afim de verificar se o mesmo está entre a média de ganho dos demais seguidores projetados.

Comparando o ganho do seguidor solar de dois eixos em relação ao desempenho dos seguidores apresentados, é possível verificar que um seguidor solar que varia os dois ângulos (azimutal e inclinação solar), possui um ganho maior do que os seguidores que se movem em apenas um eixo. De acordo com o estudo feito por Golveia, *et al.* (2017), entre os seguidores que se movem em apenas um eixo, a variação de energia gerada entre o módulo fotovoltaico fixo e do módulo com rastreador chega a 25%, já os seguidores de dois eixos chegam a apresentar um pico de 47% de ganho, porém em ambos os casos deve ser considerado que os experimentos foram feitos em dias ensolarado sem a presença de radiação difusa.

O seguidor solar projetado, apresenta uma vantagem em relação aos demais devido os outros sistemas de rastreamento utilizarem sensores para seguir o sol, assim em situações em que hajam nuvens passageiras, o sistema de automatização saia da posição ideal buscando a luz solar, e quando a nuvem sai da direção do sol, também leva um tempo até se posicionar na posição correta. O seguidor com mapeamento solar, garante que o módulo sempre esteja na posição correta mesmo quando temporariamente exista um sombreamento no módulo por nuvens.

Outra vantagem que o seguidor solar de dois eixos por mapeamento pode apresentar em relação aos seguidores que utilizam sensores para buscar a melhor irradiância, é que essa movimentação ocorre somente uma vez por hora em movimentos discretos, já seguidores que utilizam sensores, têm uma movimentação contínua toda vez que o sol sai da posição correta,

assim exige maior movimentação o que pode ocorrer um maior desgaste de toda estrutura mecânica.

Um aspecto bastante relevante a ser considerado em sistemas de rastreamento solar de um ou dois eixos, é que os resultados tanto em estudos como no trabalho aqui apresentado, são de experiências realizadas em dias ensolarados, ou seja, predomina nesses casos a radiação direta normal, com isso os sistemas que utilizam rastreadores sempre estarão com máxima radiação em seus módulos fotovoltaicos. É importante observar também que em dias nublados ou chuvosos, os sistemas com rastreadores não apresentam ganho considerável na geração de energia, visto que em dias assim a radiação difusa é predominante, ou seja, a geração de energia gerada nos módulos com rastreadores é a mesma de módulos fixo. Sendo assim, para que se possa verificar a viabilidade da implementação de um sistema de seguidor solar em qualquer região, faz-se necessária a verificação do comportamento da radiação na área de instalação, pois o sistema torna-se viável apenas em regiões em que haja uma baixa incidência de radiação difusa ao longo do ano, pois o sistema se torna mais eficiente em áreas predominantemente ensoladas com maior atuação de radiação direta.

#### 4.7 DESEMPENHO DO SISTEMA EM DIFERENTES ESTAÇÕES

Fazendo uma análise do desempenho do seguidor solar ao longo de um ano, é possível verificar que em todos os períodos o sistema apresenta um ganho na geração de energia em relação ao módulo fixo. É possível observar que no verão e inverno o ganho é maior que na primavera e no outono, isso se deve ao fato que no inverno e verão o ângulo da altitude solar é bem deslocado em relação ao módulo fixo. O ângulo médio para a cidade de Curitiba é de  $25^\circ$ , sendo que nas estações onde apresentam maior ganho, esse ângulo varia para  $10^\circ$  e  $43^\circ$  no verão e inverno respectivamente.

A Tabela 9 mostra essa análise onde é possível verificar qual o ângulo de altitude solar que maior obteve ganho em cada estação do ano e também qual foi o percentual desse ganho. Embora também houvesse ganho se somente o ângulo azimutal fosse variado, seria menor do que variando os dois ângulos.

Tabela 9 - Comparação do desempenho em diferentes estações

Estação	Ângulo (altitude solar)	Ganho (%)
Verão	10°	35%
Outono	25°	18%
Inverno	43°	22%
Primavera	25°	19%

Fonte: O Autor

#### 4.8 DEMANDA DE POTÊNCIA CONSUMIDA POR SEGUIDOR SOLAR

Silva *et al.*, (2018) apresenta uma análise da demanda de potência consumida por seguidores solares, no artigo é apresentado as diferenças de consumo entre os circuitos de controle e de potência que compõem esses sistemas, bem como análise de *datasheets*, aplicações de seguidores em operação e simulação para mensurar a potência consumida. O artigo contribui também apresentando diferentes tecnologias utilizadas para a automatização de seguidores solares, comparando qual sistema automatizado possui menor consumo de potência uma vez que, embora esses sistemas possuam um ganho na geração de energia em relação a sistemas fotovoltaicos fixos é necessário levar em consideração a perda que possui pelo consumo dos circuitos de controle e de potência.

Basicamente os seguidores possuem dois tipos de circuitos sendo eles, o circuito de controle e o circuito de potência, onde devem ser analisados para verificar a viabilidade da utilização da automatização de um rastreador solar afim de verificar se o mesmo não consome um valor superior ao ganho apresentado.

Os circuito de controle recebem os sinais dos sensores indicando a alteração na trajetória do sol, tensão, corrente, temperatura, radiação entre outros sinais que influenciam na geração de energia no módulo fotovoltaico. Esse circuito em sua maioria é composto por diferentes microcontroladores (onde atualmente o mais usual é o Arduino) ou controlador lógico programável (CLP). A Tabela 10 mostra a demanda de potência de circuitos de controle de alguns rastreadores apresentados no item 2.12.3 que também foram fontes de pesquisas por Silva *et al.*, (2018), onde é possível comparar a potência consumida em tecnologias diferentes (CLP e Arduino). Essa análise facilita a escolha de qual melhor tecnologia a ser empregada quando o foco é utilizar um sistema que possua uma menor demanda de potência não oferecendo grandes perdas para a energia gerada pelos módulos fotovoltaicos

Tabela 10 - Comparação da potência consumida entre CLP e Arduino

Tecnologia	Consumo máx	Consumo mín
CLP	3,72W	2,34W
Arduino	200 mW	165 mW

Fonte: O Autor

Já para o circuito de potência, Silva *et al*, (2018) mostra que ele é necessário para acionar o motor que fara a movimentação do módulo fotovoltaico. É utilizado um motor para movimentação no eixo vertical e um motor para a movimentação no eixo horizontal. A potência do motor utilizado é dimensionada de acordo com sua aplicação, pois existem sistemas em que o seguidor solar é composto por apenas um módulo e outros compostos por vários módulos no caso de usinas solares. No estudo apresentado, os circuitos de potência também apresentaram um baixo consumo. Esses circuitos são utilizados para fazer o acionamento dos motores que movimentam as estruturas dos seguidores solares. O motor utilizado na grande maioria é o motor de passo, que quando é aplicado para movimentar vários módulos que possuem uma carga maior, utilizam redutores para reduzir a velocidade do eixo de saída e aumentar o torque.

#### 4.9 CONSIDERAÇÕES PARA APLICAÇÃO DE SEGUIDOR SOLAR

Os resultados obtidos mostram que um sistema fotovoltaico que possui seguidor solar, seja de um ou dois eixos obtém ganhos consideráveis para geração de energia. No entanto algumas variáveis devem ser consideradas para aplicação de um seguidor solar. Primeiramente um dos maiores investimentos seria em sua estrutura mecânica para movimentação, pois em seu projeto devem ser considerados o peso do módulo, o projeto de sua movimentação, o sistema de redução e a escolha de um material que não sofra facilmente com corrosão e suporte forças externas como a velocidade do vento. É necessário levar em conta também, a quantidade de movimentação diária que haverá nesse sistema, pois quanto maior for a demanda de movimentação, mais o sistema mecânico estará suscetível a manutenções. A estrutura mecânica desse trabalho em questão em um ano de operação não teve a necessidade de grandes manutenções, pois o material era apropriado para ser instalado em tempo aberto e também foi aplicada uma pintura, para que a estrutura não sofresse com ferrugem.

Outra questão bastante relevante é o sistema de automação, pois devem ser adquiridos todo um sistema que faça a movimentação correta, comute atuadores, faça aquisição de dados, e trate os dados. Esse sistema pode ser contido por microcontroladores (ou CLP), sensores e circuitos adicionais necessários para automação. Contudo o custo-benefício se torna viável

levando em consideração o ganho energético que um sistema fotovoltaico utilizando um seguidor solar pode apresentar ao longo do ano.

Hoje existem aplicações onde já são utilizados seguidor solar, sobre tudo em usinas solares onde existe a necessidade de obter a maior geração de energia possível onde, geralmente são instalados em campo aberto com boa irradiância e sem problemas com sombreamento.

#### 4.10 INDICAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O projeto do seguidor realizado obteve bons resultados confirmando o ganho esperado na geração de energia em relação ao módulo fotovoltaico fixo, porém melhorias podem ser feitas para melhorar ainda mais o projeto e ele funcione com maior exatidão.

A variação do ângulo de altitude solar foi feita de forma manual, devido ao fato desse ângulo só variar uma vez a cada mudança de estação não foi aplicada a implementação da automatização dessa movimentação. No entanto a estrutura mecânica já contempla a possibilidade para essa implementação, sendo necessária a instalação do motor juntamente com o seu *driver* e a programação que pode ser feito no mesmo arduino já utilizado.

Outra melhoria que pode ser aplicada seria um sistema que assegure e confira que o sistema esteja no ângulo azimutal correto, pois o sistema apenas manda pulsos para o *drive* do motor, assim em casos em que falte energia o sistema pode perder a referência do ângulo mapeado e assim o sistema pode estar em um ângulo diferente não obtendo os resultados esperados. Essas melhorias não garantem maiores ganhos, porém diminui a possibilidade de erro no posicionamento do módulo fotovoltaico do seguidor solar.

É possível também acrescentar no projeto sensores de radiação para que possa dessa forma analisar de forma mais eficaz o desempenho, comparando os valores captados nos sensores com os índices de méritos do sistema.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

É fato que a aplicação de um sistema solar fotovoltaico é uma opção de geração de energia muito vantajosa, por se tratar de uma energia limpa e renovável, por ser uma fonte inegotável, pela abundância desse recurso e também pelo fato que produz uma grande economia para o consumidor. Em especial no Brasil o uso do sistema fotovoltaico se torna altamente viável pela alta irradiação que existe em todo o território.

A implementação demonstrou que é possível ter ganho na geração de energia em todas as estações do ano, uma vez que em determinados períodos o ângulo de altitude solar varia consideravelmente da média utilizada na cidade de Curitiba, chegando a uma variação de  $18^\circ$  no inverno e  $15^\circ$  no verão. O projeto do seguidor utilizando mapeamento da trajetória do sol mostrou-se bastante viável, eficiente e com resultados bastante significativo onde em todas as estações do ano apresentou ganho médio entre 18% à 35%, em dias ensolarados onde prevalecia a radiação direta. É possível observar que os maiores ganhos que o seguidor solar apresenta é no período da manhã e perto do fim do dia onde o ângulo azimutal está consideravelmente deslocado do  $0^\circ$  do norte geográfico.

Notou-se no mapeamento feito através do *software 3D sun path* a grande variação da trajetória do sol em diferentes dias, assim é possível fazer um mapeamento ainda mais preciso alterando esse mapeamento de mês em mês ou até a cada semana, porém como o objetivo desse trabalho era sua verificação em diferentes estações, o dia escolhido para o mapeamento era sempre os dias de virada de estação, ou seja, nos dias 20 de março (outono), 21 de junho (inverno), 22 de setembro (primavera) e 21 de dezembro (verão).

Uma vantagem do projeto do seguidor por mapeamento solar é em sua programação que se torna mais simples e intuitiva se comparada com seguidores que buscam a melhor posição do sol de forma contínua. A aplicação do arduino como plataforma de programação obteve grande vantagem para a implementação da automação, visto que todos os elementos adicionais como *SD card*, RTC e módulo de relé eram acessórios próprios do arduino o que facilitou bastante sua integração, também os sinais de saída do arduino eram compatíveis com o sinal do *drive* que movimentava o motor de passo.

Observou-se ao longo de um ano que a estrutura mecânica utilizada não sofreu danos, não houve pontos de corrosão e quase não houveram manutenções. As poucas manutenções que houveram, foram em virtude da estrutura do redutor se desalinhar, assim todo o sistema de movimentação se tornava mais pesado dificultando a movimentação do rastreador. Nos testes de movimentação do ângulo azimutal, a estrutura era testada sem o módulo acoplado, no entanto

em sua implementação notou-se que o sistema se movimentava com dificuldade devido ao peso do módulo fotovoltaico. Assim houve a necessidade de redimensionar o sistema de redução.

O estudo que considerou a análise da demanda de potência dos seguidores solares, mostrou que comparando a potência utilizada para a automatização levando em consideração os sistemas de controle e potência são praticamente irrelevantes, tanto em sistemas de pequeno porte como os de grande porte. Assim é possível verificar a viabilidade da implementação dessa automatização em termos de demanda de potência consumida.

Levando em consideração os resultados obtidos e comparando também os resultados dos seguidores já utilizados apresentados por Golveia, *et al* (2017), pode-se verificar que, comparando com um sistema solar fixo um sistema de seguimento solar consegue aumentar a captação de luz solar em todas as estações do ano, no entanto estes valores podem ser diferentes tendo em conta a geolocalização do sistema. Uma outra vantagem desse sistemas é o fato de ser necessário menos espaço para gerar a mesma quantidade de energia. Tendo em vista que um sistema com seguidor solar consegue ter um aumento de captação solar conforme mostra os resultados apresentados, então, por dedução lógica um sistema com seguidor solar vai necessitar de menos módulos fotovoltaicos do que um sistema fixo sem seguidor solar, e por consequência, vai necessitar de menos espaço de instalação. Pode-se verificar no estudo também que outro aspecto muito importante a destacar é que, graças ao rastreamento solar não só a produção de energia aumenta, mas também melhora a forma como a potência é entregue. Assim com todos os aspectos considerados é possível verificar que o sistema solar fotovoltaico pode ser explorado de outras formas que produzam mais energia, reduzindo custos e tornem o sistema mais eficaz e estável em qualquer região em que se instale.

Também analisando a comparação entre rastreadores solares conforme apresentado no item 4.6, é importante levar em consideração que esses sistemas foram analisados em dias ensolarados, assim para que se possa verificar a viabilidade da implementação de um sistema de seguidor solar em qualquer região, é importante verificar a radiação anual na área de instalação, pois o sistema torna-se viável apenas em regiões em que haja uma baixa incidência de radiação difusa ao longo do ano, pois o sistema se torna mais eficiente em áreas predominantemente ensoladas com maior atuação de radiação direta.

## REFERÊNCIAS

- ABNT. NBR 10899 - **Energia Solar Fotovoltaica - Terminologia**, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Norma Brasileira, 2006.
- ABNT. NBR 11704 - **Sistemas Fotovoltaicos - Classificação**, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Norma Brasileira, 2008.
- ABREU, S., TIEPOLO, G., PEREIRA, S., & SOUZA, J. (2017). **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. São José dos Campos: INPE. Disponível em: <http://labren.ccst.inpe.br/Acesso> em 16/03/18
- ALDABÓ, R. **Energia Solar**. São Paulo, 1ª Edição. Artliber, 2002.
- ALMAKS, LASER SOLUTION. **Laser Scribing**. Disponível em <http://www.almakslasersolution.com/laser-scribing/> - Acesso em 16/03/18
- ALVES, A. F. **Desenvolvimento de um Sistema de Posicionamento Automático para Painéis Fotovoltaicos**. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. Botucatu, p. 70. 2008.
- ANTÔNIO, A. D. S.; PEREIRA, H. A. **Análise de um seguidor solar unidirecional em um dia parcialmente nublado**. V Congresso Brasileiro de Energia Solar, Março-Abril 2014.
- AYABE, M. S.; DA SILVA JR, S. A.; LOVATO, T. G. **Análise de desempenho de um gerador fotovoltaico dotado de um seguidor solar de eixo polar**. 2017. 143 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Bacharelado em Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR. Curitiba, 2017.
- BAZYARI, S., KEYPOUR, R., FARHANGI, S., GHAEDI, A., & BAZYARI, K. (2014). **A study on the effects of solar tracking systems on the performance of photovoltaic power plants**. *Journal of Power and Energy Engineering*, 2(04), 718.
- BENEDITO, R. D. S. **Caracterização da geração distribuída de eletricidade por meio de sistemas fotovoltaicos conectados à rede, no Brasil, sob os aspectos técnico, econômico e regulatório**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2009
- BRIGHT SOLAR. **Seguidor 2-eixos MPPT | São Domingos**. Disponível em: <http://www.bright-solar.pt/portfolio-item/100529-seguidor-de-2-eixos-mppt/>. Acesso em 27/06/18.
- CORTEZ, R. J. M., **Sistemas de seguimento solar em produção de energia fotovoltaica**, Dissertação de Mestrado da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto - FEUP, Porto - Portugal, 2013.
- ELECTRÓNICA. **Instalação Sistemas Solares Fotovoltaicos**. Disponível em: <http://www.electronica-pt.com/instalacao-sistema-fotovoltaico> - Acesso em 16/03/18

ELEKTRA. **Curva característica I-V**. Disponível em: <https://www.grupoelektra.es/blog/nota-tecnica-curva-caracteristica-v/>. Acesso em 11/12/18.

ENERGIA TECSOLAR. **Como dimensionar o seu sistema off-grid**. Disponível em: [http://energiatecsolar.com.br/kits-completos-para-sistemas-off\\_grid-de-geracao-de-energia-solar/#sthash.yHVL8194.dpbs](http://energiatecsolar.com.br/kits-completos-para-sistemas-off_grid-de-geracao-de-energia-solar/#sthash.yHVL8194.dpbs) – Acesso em 16/03/18

GARCIA, Y.; DIAZ, O.; AGUDELO, C. **Performance of a solar PV tracking system on tropic regions**. WIT Transactions on Ecology and The Environment, v. 195, p. 197-207, 2015. ISSN 1743-3541.

DE FÁTIMA GRAH, V., DE MATOS PONCIANO, I., SARETTA, E., ALVES, D. G., & BOTREL, T. A. (2015). **Performance of single axis solar tracking system for photovoltaic energy generation**. *Energia na agricultura*, 30(2), 180-188.

GOUVEIA, D. C. ; SILVA, F. B. F. ; TONOLO, E. A. ; URBANETZ JUNIOR, J. ; SANTOS, W. E. **Avaliação do desempenho de sistemas fotovoltaicos com seguidores solares**. In: <http://smartenergy.org.br/2017/>, 2017, Curitiba. Conferência Internacional de Energias Inteligentes ? Smart Energy CIEI&EXPO 2017, 2017.

INEO, INSTITUTO NACIONAL DE ELETRÔNICA ORGÂNICA. **Criada primeira célula solar inteiramente de carbono**. Disponível em: [http://www.ifsc.usp.br/~ineo/news/index.php?pos\\_id=212](http://www.ifsc.usp.br/~ineo/news/index.php?pos_id=212) - Acesso em 16/03/18

LANSOLAR. **Tipos de painel solar fotovoltaico**. Disponível em: [http://www.lansolar.com.br/noticias.php?not\\_id=4](http://www.lansolar.com.br/noticias.php?not_id=4) – Acesso em 16/03/18

LAZAROUIU, G. C., LONGO, M., ROSCIA, M., & PAGANO, M. (2015). **Comparative analysis of fixed and sun tracking low power PV systems considering energy consumption**. *Energy Conversion and Management*, 92, 143-148.

LIRA, J. R. V., **Desenvolvimento de um Rastreador Solar do Tipo Polar com Ajuste do Ângulo de Inclinação**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, UFRN, 2014.

MARION, B., ADELSTEIN, J., BOYLE, K. E., HAYDEN, H., HAMMOND, B., FLETCHER, T., ... & RICH, G. (2005, January). **Performance parameters for grid-connected PV systems**. In Conference Record of the Thirty-first IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2005. (pp. 1601-1606). IEEE.

MARSH, A. J. **Personal Info**. Disponível em: <http://andrewmarsh.com/pages/about/> – Acesso em 25/06/18

MATTAR, F. N. Pesquisa de marketing. 3.ed. São Paulo: Atlas, 2001.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Análise da Inserção da Geração Solar na Matriz Elétrica Brasileira**. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisas Energéticas, 2012.

MORAES, E. P., **Seguidor Solar de Um Eixo Inclinado**. Centro Universitário de Brasília, UNICEUB, 2012.

NREL. **Glossary of Solar Radiation Resource Terms: National Renewable Energy Laboratory**, 2016. Disponível em:  
[http://rredc.nrel.gov/solar/glossary/gloss\\_s.html](http://rredc.nrel.gov/solar/glossary/gloss_s.html) Acesso em 16/03/18

OLIVEIRA, M. M. **Análise de Desempenho de um Gerador Fotovoltaico com Seguidor Solar Azimutal**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 137. 2008.

PICCOLI, L. **Desenvolvimento de Metodologia e Bancada para Ensaio de Exposição Solar Prolongada de Módulos Fotovoltaicos de Filmes Finos**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

PINHO, T.; GALDINO, M. A. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPEL - CRESESB, 2014. 529 p.

PRINSLOO, G., DOBSON, R., 2014. **Solar Tracking, Sun Tracking, Sun Tracker, Solar Tracker, Follow Sun, Sun Position**. 2014.

REIS, L. B.; PHILIPPI Jr, A. **Energia e sustentabilidade**. Manole. Barueri – SP, 2016.

RENOVÁVEIS MAGAZINE. **Novas células solares orgânicas melhoram a eficiência energética dos edifícios**. Disponível em:  
<http://www.renovaveismagazine.pt/2017/02/23/novas-celulas-solares-organicas-melhoram-a-eficiencia-energetica-dos-edificios/> - Acesso em 16/03/18

RIBEIRO. S. C, PRADO. P. P. L, GONÇALVES. J. B. **Projeto e Desenvolvimento de um Rastreador Solar para Painéis Fotovoltaicos**. Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia. 2012.

RONCOLATTO, R. A.; DONADON, A. R.; CAMARGO, J. C. **Avaliação Técnica e Econômica de Sistema Móvel Versus Fixo na USFV Tanquinho**. VI Congresso Brasileiro de Energia Solar, Belo Horizonte, 04 a 07 Abril 2016.

RÜTHER, R. **Edifícios solares fotovoltaicos: O Potencial da Geração Solar Fotovoltaica Integrada a Edificações Urbanas e Interligada à Rede Elétrica Pública no Brasil**. LABSOLAR, Florianópolis, 2004.

SOLAR MECA. **Seguidor multipista horizontal de 1 eixo Hyperion – MR**. Disponível em:  
<https://mecasolar.com/es/project/1-axis-multi-row-horizontal-tracker-hyperion/> - Acesso 26/06/18.

SILVA, F. B. F; GOLVEIA, D. C; JUNIOR, J. U. **Análise da Demanda de Potência Consumida por Rastreadores Solares Automatizados**. VII Congresso Brasileiro de Energia Solar – Gramado, 17 a 20 de abril de 2018.

SUTHAR, M.; SINGH, G. K.; SAINI, R. P. **Performance Evaluation of Sun Tracking Photovoltaic Systems : a Case Study**. Communication and Computing (ARTCom 2013), Fifth International Conference on Advances in Recent Technologies, 26 Junho 2014. 328-335.

TIEPOLO, G., PEREIRA, E., URBANETZ JR, J., PEREIRA, S., GONCALVES, A., LIMA, F., ... & ALVES, A. (2017). **Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná. 1a Edição.** Curitiba: UTFPR.

TOLMASQUIM, M. T. **Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica.** Rio de Janeiro: EPE, 2016. 451 p. ISBN 978-85-60025-06- 0.

TONIN, F. S. **Caracterização de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica na Cidade de Curitiba.** 2017. Dissertação de mestrado em Engenharia Elétrica, Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Energia (PPGSE), da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

TREVELIN, F. C., **Estudo Comparativo entre métodos de rastreamento solar aplicados a sistemas fotovoltaicos.** 2014

URBANETZ JUNIOR, J. **Sistemas Fotovoltaicos Conectados a Redes de Distribuição Urbanas: sua influência na qualidade da energia elétrica e análise dos parâmetros que possam afetar a conectividade.** 2010. 189 p. Tese de Doutorado em Engenharia Civil – UFSC, Florianópolis – SC, 2010.

VIEIRA, R. G; GUERRA, F. V; VALE, M.G; ARAÚJO, M.M; **Sistema de rastreo de painel fotovoltaico utilizando pla microcontrolada Arduino®.** XII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (SBAI), Natal, 25 a 28 Outubro 2015. 457-461.

VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R. **Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações.** 1 ed. São Paulo: Editora Érica, 2012

VILLULLAS, H. M; TICIANELLI, E. A.; GONZALEZ, E. R. Células a combustível: energia limpa a partir de fontes renováveis. **Redes**, 2011.

ZILLES, R.; MACÊDO, W. N.; GALHARDO, M. A. B.; OLIVEIRA, S. H. F. **Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica.** São Paulo, SP: Oficina de Textos, 2012.

ANEXO A - Folha de dados técnicos do módulo fotovoltaico Kyocera  
KC130TM.



THE NEW VALUE FRONTIER



# KC130TM

HIGH EFFICIENCY MULTICRYSTAL PHOTOVOLTAIC MODULE



## HIGHLIGHTS OF KYOCERA PHOTOVOLTAIC MODULES

Kyocera's advanced cell processing technology and automated production facilities produce a highly efficient multicrystal photovoltaic module. The conversion efficiency of the Kyocera solar cell is over 18%. These cells are encapsulated between a tempered glass cover and a pottant with back sheet to provide efficient protection from the severest environmental conditions. The entire laminate is installed in an anodized aluminum frame to provide structural strength and ease of installation.



## APPLICATIONS

- Microwave / Radio repeater stations
- Electrification of villages in remote areas
- Medical facilities in rural areas
- Power source for summer vacation homes
- Emergency communication systems
- Water quality and environmental data monitoring systems
- Navigation lighthouses, and ocean buoys
- Pumping systems for irrigation, rural water supplies and livestock watering
- Aviation obstruction lights
- Cathodic protection systems
- Desalination systems
- Railroad signals
- etc.

## QUALIFICATIONS

- MODULE : UL 1703 certified  
Hazardous Locations : Class I, Div 2, Groups A, B, C and D
- FACTORY : ISO9001 and ISO 14001

## QUALITY ASSURANCE

Kyocera multicrystal photovoltaic modules have passed the following tests.

- Thermal cycling test ● Thermal shock test ● Thermal / Freezing and high humidity cycling test ● Electrical isolation test
- Half impact test ● Mechanical, wind and twist loading test ● Salt mist test ● Light and water-exposure test ● Field exposure test

## LIMITED WARRANTY

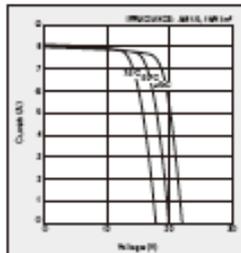
※ 1 year limited warranty on material and workmanship

※ 20 years limited warranty on power output: For detail, please refer to "category IV" in Warranty issued by Kyocera

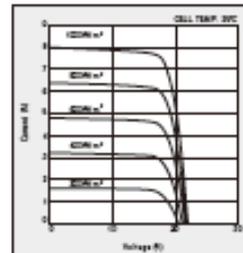
[Long term output warranty shall warrant if PV Module(s) exhibits power output of less than 90% of the original minimum rated power specified at the time of sale within 10 years and less than 80% within 20 years after the date of sale to the Customer. The power output values shall be those measured under Kyocera's standard measurement conditions. Regarding the warranty conditions in detail, please refer to Warranty issued by Kyocera.]

## ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Current-Voltage characteristics of Photovoltaic Module KC130TM at various cell temperatures



Current-Voltage characteristics of Photovoltaic Module KC130TM at various irradiance levels

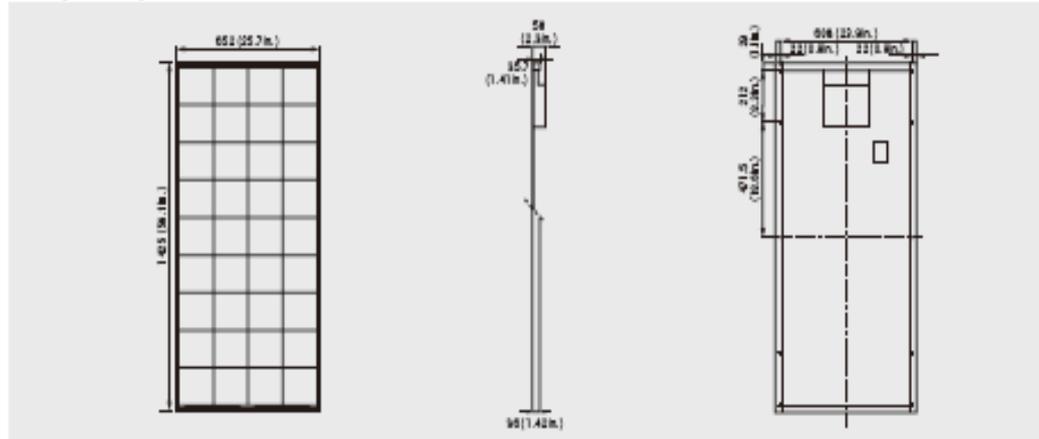


## SPECIFICATIONS

KC130TM

## Physical Specifications

Unit: mm (in.)



## Specifications

## Electrical Performance under Standard Test Conditions (STC)

Maximum Power (P <sub>max</sub> )	130W (+10%/-5%)
Maximum Power Voltage (V <sub>mpp</sub> )	17.6V
Maximum Power Current (I <sub>mpp</sub> )	7.39A
Open Circuit Voltage (V <sub>oc</sub> )	21.9V
Short Circuit Current (I <sub>sc</sub> )	8.08A
Max System Voltage	600V
Temperature Coefficient of V <sub>oc</sub>	-8.21×10 <sup>-4</sup> V/°C
Temperature Coefficient of I <sub>sc</sub>	5.18×10 <sup>-2</sup> A/°C

STC: Irradiance 1000W/m<sup>2</sup>, AM1.5 spectrum, module temperature 25°CElectrical Performance at 800W/m<sup>2</sup>, NOCT, AM1.5

Maximum Power (P <sub>max</sub> )	92W
Maximum Power Voltage (V <sub>mpp</sub> )	15.5V
Maximum Power Current (I <sub>mpp</sub> )	5.94A
Open Circuit Voltage (V <sub>oc</sub> )	19.9V
Short Circuit Current (I <sub>sc</sub> )	8.47A

NOCT (Rated Operating Cell Temperature): 45°C

## Cells

Number per Module	36
-------------------	----

## Module Characteristics

Length × Width × Depth	1453mm(57.2 in.) × 652mm(25.7 in.) × 18mm(0.7 in.)
Weight	11.9kg(26.3 lbs.)

## Junction Box Characteristics

Length × Width × Depth	170mm(6.7 in.) × 120mm(4.7 in.) × 30mm(1.2 in.)
IP Code	IP65

## Reduction of Efficiency under Low Irradiance

Reduction	4.3%
-----------	------

Reduction of efficiency from an irradiance of 1000W/m<sup>2</sup> to 200W/m<sup>2</sup> (module temperature 25°C)

Please contact our office for further information



## KYOCERA Corporation

## KYOCERA Corporation Headquarters

CORPORATE SOLAR ENERGY DIVISION  
6 Takada, Tohokoro-cho  
Fushimi-ku, Kyoto  
612-8501, Japan  
TEL: (81)75-604-2470 FAX: (81)75-604-2475  
<http://www.kyocera.com>

## ● KYOCERA Solar, Inc.

7812 East Acorn Drive  
Scottsdale, AZ 85226, USA  
TEL: (1)480-948-8003 or (800)223-9580 FAX: (1)480-488-4821  
<http://www.kyocerasolar.com>

## ● KYOCERA Solar do Brasil Ltda.

Av. Guillard 851, Lote A  
22760-200, Recreio dos Bandeirantes, Rio de Janeiro, Brazil  
TEL: (55)21-2437-8525 FAX: (55)21-2437-2928  
<http://www.kyocerasolar.com.br>

## ● KYOCERA Solar Pty Ltd.

Level 3, 6-10 Talavera Road, North Ryde  
N.S.W. 2113, Australia  
TEL: (61)2-9870-2648 FAX: (61)2-9889-9229  
<http://www.kyocerasolar.com.au/>

## ● KYOCERA Fineceramics GmbH

Fritz Müller strasse 107, D-73730 Esslingen, Germany  
TEL: (49)714-59924-417 FAX: (49)714-59924-450  
<http://www.kyocerasolar.de/>

## ● KYOCERA Asia Pacific Pte. Ltd.

299 Tiong Bahru Road, #12-02/05  
Central Plaza, Singapore 108730  
TEL: (65)6271-0600 FAX: (65)6271-0900

## ● KYOCERA Asia Pacific Ltd.

Room 401-602, Tower 1 South Seas Centre, 75 Mody Road,  
Tsimshatsui East, Kowloon, Hong Kong  
TEL: (852)2-7237183 FAX: (852)2-7242501

## ● KYOCERA Asia Pacific Ltd. Taipei Office

10 Fl., No.88, Nanjing West Road, Taipei, Taiwan  
TEL: (886)2-2515-3600 FAX: (886)2-2523-4121

## ● KYOCERA(Tianjin) Sales &amp; Trading Corporation

19F, Tower C HeJiao Building 8A Guanghua Rd.,  
Chao Yang District, Beijing 100026, China  
TEL: (86)10-6583-2270 FAX: (86)10-6583-2250

## APÊNDICE A – Código de programação de movimentação do módulo fotovoltaico

```

//Declaração das bibliotecas
#include <DS3232RTC.h>
#include <Streaming.h>
#include <Time.h>
#include <Wire.h>
#include <SD.h>
#include <SPI.h>

//Pino CS do modulo cartao SD
int CS_PIN = 4;
int PUL_PIN = 7;
int DIR_PIN = 6;
int ENA_PIN = 5;
int velocidade = 1;
int passos = 35; // =1 grau
File file;
void setup(void)
{ Serial.begin(9600);
  //Inicializa o cartao SD
  inicia_SD();
//configuração das entradas de motor e sensores
  pinMode(PUL_PIN,OUTPUT);
  pinMode(DIR_PIN,OUTPUT);
  pinMode(ENA_PIN,OUTPUT);
  pinMode(8, OUTPUT);
  pinMode(A1, OUTPUT);
  pinMode(2, OUTPUT);
  pinMode(3, OUTPUT);
  digitalWrite(8, HIGH);

```

```

digitalWrite(A1, HIGH);
digitalWrite(2, HIGH);
digitalWrite(3, HIGH);
digitalWrite(ENA_PIN,LOW); //Habilita Driver
//Sincroniza a biblioteca Time com o RTC a cada 5 minutos
setSyncProvider(RTC.get);
Serial << F("Sincronizando com o RTC...");
if (timeStatus() != timeSet) Serial << F(" Falha!");
Serial << endl;}
void loop(void)
{ static time_t tLast;
  time_t t;
  tmElements_t tm;
  //Verifica se foi setado um novo horario
  //Formato: ano, mês, dia, hora, minuto, segundo
  if (Serial.available() >= 12) {
    int y = Serial.parseInt();
    if (y >= 100 && y < 1000)
      Serial<<F("Erro: Ano deve ter dois ou quatro digitos!") <<endl;
    else {
      if (y >= 1000)
        tm.Year = CalendarYrToTm(y);
      else //(y < 100)
        tm.Year = y2kYearToTm(y);
      tm.Month = Serial.parseInt();
      tm.Day = Serial.parseInt();
      tm.Hour = Serial.parseInt();
      tm.Minute = Serial.parseInt();
      tm.Second = Serial.parseInt();
      t = makeTime(tm);
      RTC.set(t);
      setTime(t);
      Serial << F("Horario modificado para: ");
      printDateTime(t);

```

```

Serial << endl;
while (Serial.available() > 0) Serial.read();  } }
// Movimentação para o verão
    if( month(t)==12 || month(t)<=03 ){
    if( (month(t)==12 && day(t)<=21) || ( month(t)==3 && day(t)>=20)){    //Não é Verão
        }else{
            if (hour(t) == 7 && minute(t) == 00 && second(t) == 00) // 07h - Ângulo em 103°
                { digitalWrite(DIR_PIN,LOW); //Gira Horário
                  for(int i = 0;i < (55*passos);i++){
                    digitalWrite(PUL_PIN,HIGH);
                    delay(velocidade);
                    digitalWrite(PUL_PIN,LOW);
                    delay(velocidade);} }
            if (hour(t) == 8 && minute(t) ==00 && second(t) == 00) // 08h - Ângulo em 103°
                { digitalWrite(DIR_PIN,HIGH); //Gira Horário
                  for(int i = 0;i < (2*passos);i++){
                    digitalWrite(PUL_PIN,HIGH);
                    delay(velocidade);
                    digitalWrite(PUL_PIN,LOW);
                    delay(velocidade);} }
            if (hour(t) == 9 && minute(t) == 00 && second(t) == 00) // 09h - Ângulo em 98°
                { digitalWrite(DIR_PIN,HIGH); //Gira Horário
                  for(int i = 0;i < (5*passos);i++){
                    digitalWrite(PUL_PIN,HIGH);
                    delay(velocidade);
                    digitalWrite(PUL_PIN,LOW);
                    delay(velocidade);} }
            if (hour(t) == 10 && minute(t) == 00 && second(t) == 00) // 10h - Ângulo em 93°
                { digitalWrite(DIR_PIN,HIGH); //Gira Horário
                  for(int i = 0;i < (5*passos);i++){
                    digitalWrite(PUL_PIN,HIGH);
                    delay(velocidade);
                    digitalWrite(PUL_PIN,LOW);
                    delay(velocidade);} }

```

```

if (hour(t) == 11 && minute(t) == 00 && second(t) == 00) // 11h - Ângulo em 87°
    {digitalWrite(DIR_PIN,HIGH); //Gira Horário
    for(int i = 0;i < (6*passos);i++){
    digitalWrite(PUL_PIN,HIGH);
    delay(velocidade);
    digitalWrite(PUL_PIN,LOW);
    delay(velocidade);} }

if (hour(t) == 12 && minute(t) == 00 && second(t) == 00) // 12h - Ângulo em 59°
    { digitalWrite(DIR_PIN,HIGH); //Gira Horário
    for(int i = 0;i < (28*passos);i++){
    digitalWrite(PUL_PIN,HIGH);
    delay(velocidade);
    digitalWrite(PUL_PIN,LOW);
    delay(velocidade);} }

if (hour(t) == 12 && minute(t) == 58 && second(t) == 00) // 13h - Ângulo em -81°
    {digitalWrite(DIR_PIN,HIGH); //Gira Horário
    for(int i = 0;i < (50*passos);i++){
    digitalWrite(PUL_PIN,HIGH);
    delay(velocidade);
    digitalWrite(PUL_PIN,LOW);
    delay(velocidade);} }

if (hour(t) == 12 && minute(t) == 59 && second(t) == 00) // 13h - Ângulo em -81°
    {digitalWrite(DIR_PIN,HIGH); //Gira Horário
    for(int i = 0;i < (50*passos);i++){
    digitalWrite(PUL_PIN,HIGH);
    delay(velocidade);
    digitalWrite(PUL_PIN,LOW);
    delay(velocidade);} }

if (hour(t) == 13 && minute(t) == 00 && second(t) == 00) // 13h - Ângulo em -81°
    { digitalWrite(DIR_PIN,HIGH); //Gira Horário
    for(int i = 0;i < (40*passos);i++){
    digitalWrite(PUL_PIN,HIGH);
    delay(velocidade);

```

```

        digitalWrite(PUL_PIN,LOW);
        delay(velocidade);}}
if (hour(t) == 14 && minute(t) == 00 && second(t) == 00) // 14h - Ângulo em -91°
    { digitalWrite(DIR_PIN,HIGH); //Gira Horário
      for(int i = 0;i < (10*passos);i++){
        digitalWrite(PUL_PIN,HIGH);
        delay(velocidade);
        digitalWrite(PUL_PIN,LOW);
        delay(velocidade);}}
if (hour(t) == 15 && minute(t) == 00 && second(t) == 00) // 15h - Ângulo em -96°
    { digitalWrite(DIR_PIN,HIGH); //Gira Horário
      for(int i = 0;i < (5*passos);i++){
        digitalWrite(PUL_PIN,HIGH);
        delay(velocidade);
        digitalWrite(PUL_PIN,LOW);
        delay(velocidade);}}
if (hour(t) == 16 && minute(t) == 05 && second(t) == 00) // 16h - Ângulo em -100°
    { digitalWrite(DIR_PIN,HIGH); //Gira Horário
      for(int i = 0;i < (4*passos);i++){
        digitalWrite(PUL_PIN,HIGH);
        delay(velocidade);
        digitalWrite(PUL_PIN,LOW);
        delay(velocidade);}}
if (hour(t) == 17 && minute(t) == 00 && second(t) == 00) // 17h - Ângulo em -105°
    { digitalWrite(DIR_PIN,HIGH); //Gira Horário
      for(int i = 0;i < (5*passos);i++){
        digitalWrite(PUL_PIN,HIGH);
        delay(velocidade);
        digitalWrite(PUL_PIN,LOW);
        delay(velocidade);}}
if (hour(t) == 17 && minute(t) == 59 && second(t) == 00) // 18h - Volta para o ângulo 0
    { digitalWrite(DIR_PIN,LOW); //Gira Horário
      for(int i = 0;i < (50*passos);i++){
        digitalWrite(PUL_PIN,HIGH);

```

```

        delay(velocidade);
        digitalWrite(PUL_PIN,LOW);
        delay(velocidade);} }
if (hour(t) == 18 && minute(t) == 00 && second(t) == 00) // 18h - Volta para o ângulo 0
    {
        digitalWrite(DIR_PIN,LOW); //Gira Horário
        for(int i = 0;i < (55*passos);i++){
            digitalWrite(PUL_PIN,HIGH);
            delay(velocidade);
            digitalWrite(PUL_PIN,LOW);
            delay(velocidade);}
        } }
// Movimentação para o Outono
if( month(t)>=3 && month(t)<=06 ){
if( (month(t)==3 && day(t)<=20) || ( month(t)==6 && day(t)>=21)){ //Não é Outono
    }else{
if (hour(t) == 8 && minute(t) == 35 && second(t) == 0) // 07h - Ângulo em 83°
    {
        digitalWrite(DIR_PIN,LOW); //Gira Horário
        for(int i = 0;i < (83*passos);i++){
            digitalWrite(PUL_PIN,HIGH);
            delay(velocidade);
            digitalWrite(PUL_PIN,LOW);
            delay(velocidade);} }
if (hour(t) == 14 && minute(t) == 11 && second(t) == 15) // 08h - Ângulo em 80°
{
    digitalWrite(DIR_PIN,HIGH); //Gira Horário
    for(int i = 0;i < (3*passos);i++){
        digitalWrite(PUL_PIN,HIGH);
        delay(velocidade);
        digitalWrite(PUL_PIN,LOW);
        delay(velocidade);} }
if (hour(t) == 14 && minute(t) == 11 && second(t) == 30) // 09h - Ângulo em 71°
    {
        digitalWrite(DIR_PIN,HIGH); //Gira Horário
        for(int i = 0;i < (9*passos);i++){
            digitalWrite(PUL_PIN,HIGH);
            delay(velocidade);

```

```

        digitalWrite(PUL_PIN,LOW);
        delay(velocidade);} }

if (hour(t) == 14 && minute(t) == 12 && second(t) == 00) // 10h - Ângulo em 59°
    {    digitalWrite(DIR_PIN,HIGH); //Gira Horário
        for(int i = 0;i < (12*passos);i++){
            digitalWrite(PUL_PIN,HIGH);
            delay(velocidade);
            digitalWrite(PUL_PIN,LOW);
            delay(velocidade);} }

if (hour(t) == 11 && minute(t) == 00 && second(t) == 00) // 11h - Ângulo em 42°
    {    digitalWrite(DIR_PIN,HIGH); //Gira Horário
        for(int i = 0;i < (17*passos);i++){
            digitalWrite(PUL_PIN,HIGH);
            delay(velocidade);
            digitalWrite(PUL_PIN,LOW);
            delay(velocidade);} }

if (hour(t) == 12 && minute(t) == 00 && second(t) == 00) // 12h - Ângulo em 14°
    {    digitalWrite(DIR_PIN,HIGH); //Gira Horário
        for(int i = 0;i < (28*passos);i++){
            digitalWrite(PUL_PIN,HIGH);
            delay(velocidade);
            digitalWrite(PUL_PIN,LOW);
            delay(velocidade);} }

if (hour(t) == 13 && minute(t) == 00 && second(t) == 00) // 13h - Ângulo em -20°
    {    digitalWrite(DIR_PIN,HIGH); //Gira Horário
        for(int i = 0;i < (34*passos);i++){
            digitalWrite(PUL_PIN,HIGH);
            delay(velocidade);
            digitalWrite(PUL_PIN,LOW);
            delay(velocidade);} }

if (hour(t) == 14 && minute(t) == 00 && second(t) == 00) // 14h - Ângulo em -46°
    {    digitalWrite(DIR_PIN,HIGH); //Gira Horário
        for(int i = 0;i < (26*passos);i++){
            digitalWrite(PUL_PIN,HIGH);

```

```

        delay(velocidade);
        digitalWrite(PUL_PIN,LOW);
        delay(velocidade);} }

if (hour(t) == 15 && minute(t) == 00 && second(t) == 00) // 15h - Ângulo em -62°
    {
        digitalWrite(DIR_PIN,HIGH); //Gira Horário
        for(int i = 0;i < (16*passos);i++){
            digitalWrite(PUL_PIN,HIGH);
            delay(velocidade);
            digitalWrite(PUL_PIN,LOW);
            delay(velocidade);} }

if (hour(t) == 16 && minute(t) == 05 && second(t) == 00) // 16h - Ângulo em -72°
    {
        digitalWrite(DIR_PIN,HIGH); //Gira Horário
        for(int i = 0;i < (10*passos);i++){
            digitalWrite(PUL_PIN,HIGH);
            delay(velocidade);
            digitalWrite(PUL_PIN,LOW);
            delay(velocidade);} }

if (hour(t) == 17 && minute(t) == 00 && second(t) == 00) // 17h - Ângulo em -80°
    {
        digitalWrite(DIR_PIN,HIGH); //Gira Horário
        for(int i = 0;i < (8*passos);i++){
            digitalWrite(PUL_PIN,HIGH);
            delay(velocidade);
            digitalWrite(PUL_PIN,LOW);
            delay(velocidade);} }

if (hour(t) == 17 && minute(t) == 59 && second(t) == 00) // 18h - Volta para o ângulo 0
    {
        digitalWrite(DIR_PIN,LOW); //Gira Horário
        for(int i = 0;i < (40*passos);i++){
            digitalWrite(PUL_PIN,HIGH);
            delay(velocidade);
            digitalWrite(PUL_PIN,LOW);
            delay(velocidade);} }

if (hour(t) == 18 && minute(t) == 00 && second(t) == 00) // 18h - Volta para o ângulo 0
    {
        digitalWrite(DIR_PIN,LOW); //Gira Horário
        for(int i = 0;i < (40*passos);i++){

```

```

        digitalWrite(PUL_PIN,HIGH);
        delay(velocidade);
        digitalWrite(PUL_PIN,LOW);
        delay(velocidade);}
    } }
    // Movimentação para o Inverno
    if( month(t)>=6 && month(t)<=9 ){
if( (month(t)==06 && day(t)<=21) || ( month(t)==9 && day(t)>=22)){ //Não é Inverno
    }else{
if (hour(t) == 07 && minute(t) == 29 && second(t) == 20) // 07h30 - Ângulo em 61°
    { digitalWrite(DIR_PIN,LOW); //Gira Horário
      for(int i = 0;i < (30*passos);i++){
        digitalWrite(PUL_PIN,HIGH);
        delay(velocidade);
        digitalWrite(PUL_PIN,LOW);
        delay(velocidade);} }
if (hour(t) == 07 && minute(t) == 30 && second(t) == 0) // 07h30 - Ângulo em 61°
    { digitalWrite(DIR_PIN,LOW); //Gira Horário
      for(int i = 0;i < (31*passos);i++){
        digitalWrite(PUL_PIN,HIGH);
        delay(velocidade);
        digitalWrite(PUL_PIN,LOW);
        delay(velocidade);} }
if (hour(t) == 8 && minute(t) == 00 && second(t) == 00) // 08h - Ângulo em 58°
    { digitalWrite(DIR_PIN,HIGH); //Gira Anti Horário
      for(int i = 0;i < (3*passos);i++){
        digitalWrite(PUL_PIN,HIGH);
        delay(velocidade);
        digitalWrite(PUL_PIN,LOW);
        delay(velocidade);} }
if (hour(t) == 9 && minute(t) == 00 && second(t) == 00) // 09h - Ângulo em 49°
    { digitalWrite(DIR_PIN,HIGH); //Gira Anti Horário
      for(int i = 0;i < (9*passos);i++){
        digitalWrite(PUL_PIN,HIGH);

```

```

        delay(velocidade);
        digitalWrite(PUL_PIN,LOW);
        delay(velocidade);} }

if (hour(t) == 10 && minute(t) == 00 && second(t) == 00) // 10h - Ângulo em 37°
    {    digitalWrite(DIR_PIN,HIGH); //Gira Anti Horário
        for(int i = 0;i < (12*passos);i++){
            digitalWrite(PUL_PIN,HIGH);
            delay(velocidade);
            digitalWrite(PUL_PIN,LOW);
            delay(velocidade);} }

if (hour(t) == 11 && minute(t) == 00 && second(t) == 00) // 11h - Ângulo em 23°
    {    digitalWrite(DIR_PIN,HIGH); //Gira Anti Horário
        for(int i = 0;i < (14*passos);i++){
            digitalWrite(PUL_PIN,HIGH);
            delay(velocidade);
            digitalWrite(PUL_PIN,LOW);
            delay(velocidade);} }

if (hour(t) == 12 && minute(t) == 00 && second(t) == 00) // 12h - Ângulo em 6°
    {    digitalWrite(DIR_PIN,HIGH); //Gira Anti Horário
        for(int i = 0;i < (17*passos);i++){
            digitalWrite(PUL_PIN,HIGH);
            delay(velocidade);
            digitalWrite(PUL_PIN,LOW);
            delay(velocidade);} }

if (hour(t) == 13 && minute(t) == 00 && second(t) == 00) // 13h - Ângulo em -21°
    {    digitalWrite(DIR_PIN,HIGH); //Gira Anti Horário
        for(int i = 0;i < (27*passos);i++){
            digitalWrite(PUL_PIN,HIGH);
            delay(velocidade);
            digitalWrite(PUL_PIN,LOW);
            delay(velocidade);} }

if (hour(t) == 14 && minute(t) == 00 && second(t) == 00) // 14h - Ângulo em -35°
    {    digitalWrite(DIR_PIN,HIGH); //Gira Anti Horário
        for(int i = 0;i < (14*passos);i++){

```

```

        digitalWrite(PUL_PIN,HIGH);
        delay(velocidade);
        digitalWrite(PUL_PIN,LOW);
        delay(velocidade);} }

if (hour(t) == 15 && minute(t) == 00 && second(t) == 00) // 15h - Ângulo em -47°
{   digitalWrite(DIR_PIN,HIGH); //Gira Anti Horário
    for(int i = 0;i < (12*passos);i++){
        digitalWrite(PUL_PIN,HIGH);
        delay(velocidade);
        digitalWrite(PUL_PIN,LOW);
        delay(velocidade);} }

if (hour(t) == 16 && minute(t) == 05 && second(t) == 00) // 16h - Ângulo em -57°
{   digitalWrite(DIR_PIN,HIGH); //Gira Anti Horário
    for(int i = 0;i < (10*passos);i++){
        digitalWrite(PUL_PIN,HIGH);
        delay(velocidade);
        digitalWrite(PUL_PIN,LOW);
        delay(velocidade);} }

if (hour(t) == 17 && minute(t) == 00 && second(t) == 00) // 17h - Ângulo em -62°
{   digitalWrite(DIR_PIN,HIGH); //Gira Anti Horário
    for(int i = 0;i < (5*passos);i++){
        digitalWrite(PUL_PIN,HIGH);
        delay(velocidade);
        digitalWrite(PUL_PIN,LOW);
        delay(velocidade);} }

if (hour(t) == 17 && minute(t) == 59 && second(t) == 20) // 18h - Volta para o ângulo 0
{   digitalWrite(DIR_PIN,LOW); //Gira Horário
    for(int i = 0;i < (30*passos);i++){
        digitalWrite(PUL_PIN,HIGH);
        delay(velocidade);
        digitalWrite(PUL_PIN,LOW);
        delay(velocidade);} }

if (hour(t) == 18 && minute(t) == 00 && second(t) == 00) // 18h - Volta para o ângulo 0
{   digitalWrite(DIR_PIN,LOW); //Gira Horário

```

```

        for(int i = 0; i < (32*passos); i++){
            digitalWrite(PUL_PIN, HIGH);
            delay(velocidade);
            digitalWrite(PUL_PIN, LOW);
            delay(velocidade); } } } }

// Movimentação para o Primavera
    if( month(t)>=9 && month(t)<=12 ){
if( (month(t)==9 && day(t)<=22) || ( month(t)==12 && day(t)>=21)){ //Não é Primavera
    }else{
if (hour(t) == 07 && minute(t) == 29 && second(t) == 0) // 07h - Ângulo em 80°
    {   digitalWrite(DIR_PIN, LOW); //Gira Horário
        for(int i = 0; i < (40*passos); i++){
            digitalWrite(PUL_PIN, HIGH);
            delay(velocidade);
            digitalWrite(PUL_PIN, LOW);
            delay(velocidade); } }

if (hour(t) == 07 && minute(t) == 30 && second(t) == 0) // 07h - Ângulo em 80°
    {   digitalWrite(DIR_PIN, LOW); //Gira Horário
        for(int i = 0; i < (40*passos); i++){
            digitalWrite(PUL_PIN, HIGH);
            delay(velocidade);
            digitalWrite(PUL_PIN, LOW);
            delay(velocidade); } }

if (hour(t) == 8 && minute(t) == 00 && second(t) == 00) // 08h - Ângulo em 77°
    {   digitalWrite(DIR_PIN, HIGH); //Gira Anti Horário
        for(int i = 0; i < (3*passos); i++){
            digitalWrite(PUL_PIN, HIGH);
            delay(velocidade);
            digitalWrite(PUL_PIN, LOW);
            delay(velocidade); } }

if (hour(t) == 9 && minute(t) == 00 && second(t) == 00) // 09h - Ângulo em 68°
    {   digitalWrite(DIR_PIN, HIGH); //Gira Anti Horário
        for(int i = 0; i < (9*passos); i++){
            digitalWrite(PUL_PIN, HIGH);

```

```

        delay(velocidade);
        digitalWrite(PUL_PIN,LOW);
        delay(velocidade);} }
if (hour(t) == 10 && minute(t) == 00 && second(t) == 00) // 10h - Ângulo em 56°
    {   digitalWrite(DIR_PIN,HIGH); //Gira Anti Horário
        for(int i = 0;i < (12*passos);i++){
            digitalWrite(PUL_PIN,HIGH);
            delay(velocidade);
            digitalWrite(PUL_PIN,LOW);
            delay(velocidade);} }
if (hour(t) == 11 && minute(t) == 00 && second(t) == 00) // 11h - Ângulo em 38°
    {   digitalWrite(DIR_PIN,HIGH); //Gira Anti Horário
        for(int i = 0;i < (18*passos);i++){
            digitalWrite(PUL_PIN,HIGH);
            delay(velocidade);
            digitalWrite(PUL_PIN,LOW);
            delay(velocidade);} }
if (hour(t) == 12 && minute(t) == 00 && second(t) == 00) // 12h - Ângulo em 5°
    {   digitalWrite(DIR_PIN,HIGH); //Gira Anti Horário
        for(int i = 0;i < (33*passos);i++){
            digitalWrite(PUL_PIN,HIGH);
            delay(velocidade);
            digitalWrite(PUL_PIN,LOW);
            delay(velocidade);} }
if (hour(t) == 13 && minute(t) == 00 && second(t) == 00) // 13h - Ângulo em -28°
    {   digitalWrite(DIR_PIN,HIGH); //Gira Anti Horário
        for(int i = 0;i < (33*passos);i++){
            digitalWrite(PUL_PIN,HIGH);
            delay(velocidade);
            digitalWrite(PUL_PIN,LOW);
            delay(velocidade);} }
if (hour(t) == 14 && minute(t) == 00 && second(t) == 00) // 14h - Ângulo em -51°
    {   digitalWrite(DIR_PIN,HIGH); //Gira Anti Horário
        for(int i = 0;i < (23*passos);i++){

```

```

        digitalWrite(PUL_PIN,HIGH);
        delay(velocidade);
        digitalWrite(PUL_PIN,LOW);
        delay(velocidade);} }

if (hour(t) == 15 && minute(t) == 00 && second(t) == 00) // 15h - Ângulo em -65°
    {   digitalWrite(DIR_PIN,HIGH); //Gira Anti Horário
        for(int i = 0;i < (14*passos);i++){
            digitalWrite(PUL_PIN,HIGH);
            delay(velocidade);
            digitalWrite(PUL_PIN,LOW);
            delay(velocidade);} }

if (hour(t) == 16 && minute(t) == 05 && second(t) == 00) // 16h - Ângulo em -75°
    {   digitalWrite(DIR_PIN,HIGH); //Gira Anti Horário
        for(int i = 0;i < (10*passos);i++){
            digitalWrite(PUL_PIN,HIGH);
            delay(velocidade);
            digitalWrite(PUL_PIN,LOW);
            delay(velocidade);} }

if (hour(t) == 17 && minute(t) == 00 && second(t) == 00) // 17h - Ângulo em -82°
    {   digitalWrite(DIR_PIN,HIGH); //Gira Anti Horário
        for(int i = 0;i < (7*passos);i++){
            digitalWrite(PUL_PIN,HIGH);
            delay(velocidade);
            digitalWrite(PUL_PIN,LOW);
            delay(velocidade);} }

if (hour(t) == 17 && minute(t) == 29 && second(t) == 00) // 18h - Volta para o ângulo 0
    {   digitalWrite(DIR_PIN,LOW); //Gira Horário
        for(int i = 0;i < (40*passos);i++){
            digitalWrite(PUL_PIN,HIGH);
            delay(velocidade);
            digitalWrite(PUL_PIN,LOW);
            delay(velocidade);} }

if (hour(t) == 18 && minute(t) == 00 && second(t) == 00) // 18h - Volta para o ângulo 0
    { digitalWrite(DIR_PIN,LOW); //Gira Horário

```

```
for(int i = 0;i < (42*passos);i++){  
  digitalWrite(PUL_PIN,HIGH);  
  delay(velocidade);  
  digitalWrite(PUL_PIN,LOW);  
  delay(velocidade);}}}  
Serial << endl; } }
```

## APÊNDICE B – Fluxograma da lógica de programação da comutação dos relés



## APÊNDICE C – Rotina de programação de aquisição de dados

// Aquisição de dados

```

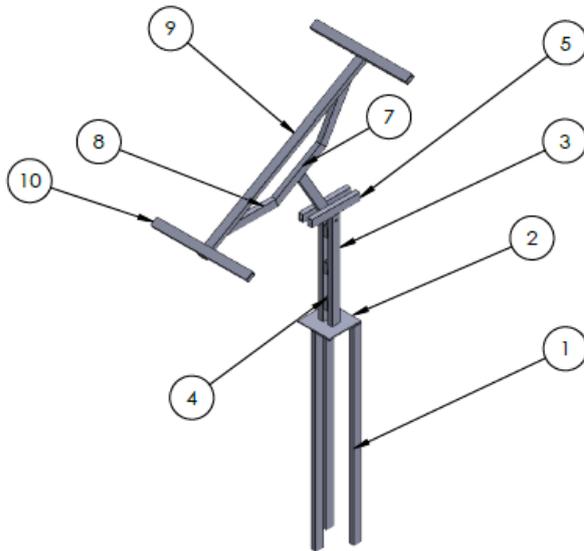
if (hour (t) >=7 && hour(t) <20 ) // 18h - Volta para o ângulo 0
    {if (minute(t) %5==0 && second (t) ==00){ // realiza a rotina a cada 5 min.
        inicia_SD();
        digitalWrite(3, LOW);    digitalWrite(8, LOW);
        (analogRead(A3)*(5.0 / 1023.0)*5.22);
        Serial.println("Medindo..."); Serial.println("Tensão do seguidor:");
        Serial.println(analogRead(A3)*(5.0 / 1023.0)*5.22);
        delay(2000);
        digitalWrite(3, HIGH);    digitalWrite(8, HIGH);
        delay(2000);
        digitalWrite(3, LOW);    digitalWrite(A1, LOW);
        Serial.println("Corrente do seguidor:");
        (analogRead(A4)*(5.0 / 1023.0)/ 0.5);
        Serial.println(analogRead(A4)*(5.0 / 1023.0)/ 0.5);
        delay(2000);
        digitalWrite(3, HIGH);    digitalWrite(A1, HIGH);
        delay(2000);
        digitalWrite(2, LOW);    digitalWrite(8, LOW);
        (analogRead(A3)*(5.0 / 1023.0)*5.46);
        Serial.println("Tensão do módulo fixo:");
        Serial.println(analogRead(A3)*(5.0 / 1023.0)*5.46);
        delay(2000);
        digitalWrite(2, HIGH);    digitalWrite(8, HIGH);
        delay(2000);
        digitalWrite(2, LOW);    digitalWrite(A1, LOW);
        (analogRead(A4)*(5.0 / 1023.0)*3);
        Serial.println("Corrente do módulo fixo:");
        Serial.println(analogRead(A4)*(5.0 / 1023.0)*3);    delay(2000);
        digitalWrite(2, HIGH);    digitalWrite(A1, HIGH);
        delay(2000);    grava_SD(t);}}

```

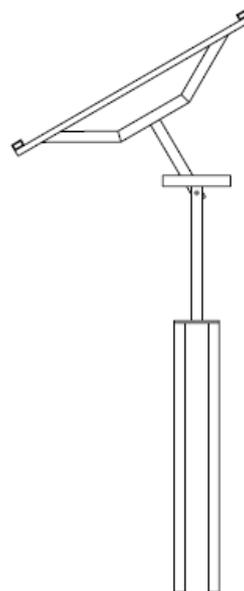
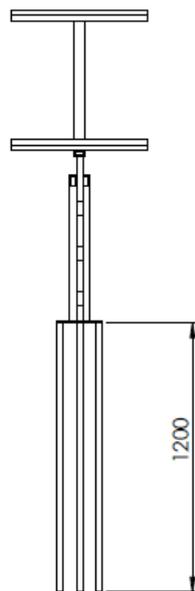
**APÊNDICE D – Levantamento da curva I-V**

Ensaio para curva I-V		
Tensão [V]	Corrente [A]	Pout [W]
0,66	8,40	5,54
2,23	8,40	18,73
3,00	8,40	25,20
4,00	8,40	33,60
5,00	8,40	42,00
6,00	8,40	50,40
7,00	8,40	58,80
8,00	8,40	67,20
9,00	8,40	75,60
10,00	8,40	84,00
11,00	8,40	92,40
12,00	8,40	100,80
13,70	7,40	101,38
14,20	6,80	96,56
15,00	5,61	84,15
16,00	4,60	73,60
17,00	3,60	61,20
18,00	1,80	32,40
19,00	0,30	5,70

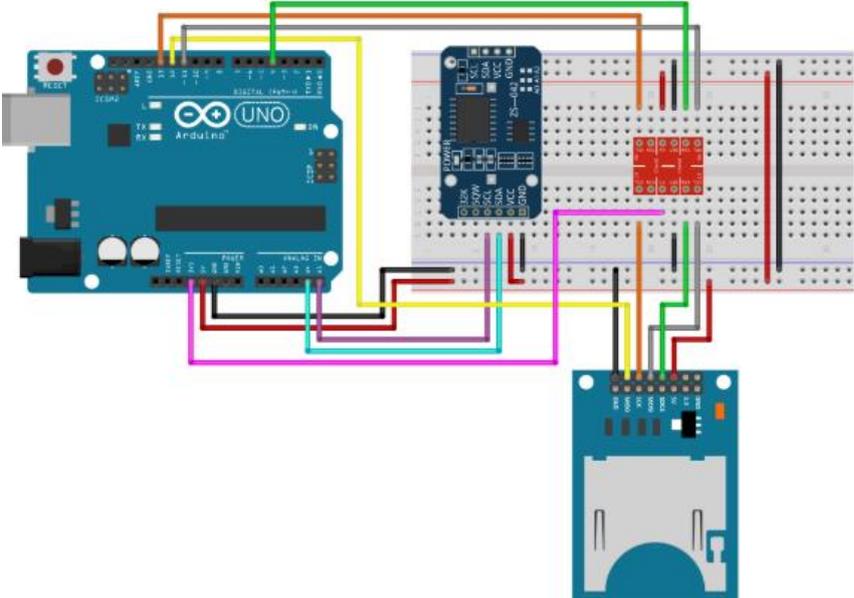
## APÊNDICE E – Projeto Mecânico do seguidor solar



Nº	Item	Qntd
1	Pé	3
2	Base	1
3	Haste de acoplamento	2
4	Separador	3
5	Suporte de acoplamento	2
6	Haste 1	1
7	Haste 2	1
8	Haste 3	2
9	Haste 4	1
10	Haste 5	2



APÊNDICE F – Circuito do Arduino com RTC e SD card



APÊNDICE G – Circuito de aquisição de dados

