

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Lucas Feksa Ramos

**METODOLOGIA DETALHADA PARA RASTREADORES
SOLARES AUTOMATIZADOS DE DOIS EIXOS EM SISTEMAS
FOTOVOLTAICOS AUTÔNOMOS**

Santa Maria, RS, Brasil
2016

Lucas Feksa Ramos

**METODOLOGIA DETALHADA PARA RASTREADORES SOLARES
AUTOMATIZADOS DE DOIS EIXOS EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), como requisito parcial para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Elétrica**.

Orientador: Professor Felix Alberto Farret, Ph.D.

Santa Maria, RS, Brasil
2016

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), com os dados fornecidos pelo autor

Feksa Ramos, Lucas
Metodologia detalhada para rastreadores solares automatizados de dois eixos em sistemas fotovoltaicos autônomos / Lucas Feksa Ramos. - 2016.
113 p.; 30cm

Orientador: Felix Alberto Farret, Ph.D.
Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Santa Maria, RS, 2016

1. Rastreamento Solar 2. Potência Fotovoltaica 3. Eficiência Energética 4. Geração de Energia 5. Energia Renovável
I. Farret A., Felix
II. Metodologia detalhada para rastreadores solares automatizados de dois eixos em sistemas fotovoltaicos autônomos.

© 2016

Todos os direitos autorais reservados a [Lucas Feksa Ramos](#). A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante citação da fonte.

E-mail: lucasfeksaramos@gmail.com

Este trabalho está licenciado pela [Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0](#)

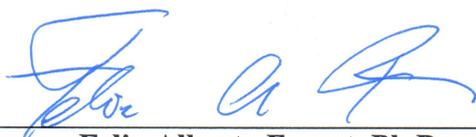
This work is licensed under the [Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0](#)

Lucas Feksa Ramos

**METODOLOGIA DETALHADA PARA RASTREADORES SOLARES
AUTOMATIZADOS DE DOIS EIXOS EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), como requisito parcial para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Elétrica**.

Aprovado em 06 de setembro de 2016:



Felix Alberto Farret, Ph.D.
(Universidade Federal de Santa Maria)
(Presidente/Orientador)



Alzenira da Rosa Abaide, Dra.
(Universidade Federal de Santa Maria)



Marcelo Godoy Simões, Ph.D.
(Colorado School of Mines)
(Participou por videoconferência)

Santa Maria, RS, Brasil
2016

AGRADECIMENTOS

Este trabalho não é resultado de apenas um esforço individual, ele surge através de significativas contribuições que recebi durante minha trajetória no mestrado. É impossível listar todos que de uma forma ou de outra me acrescentaram conhecimento nessa jornada.

Aos meus pais Bento da Silva Ramos e Iara Regina Feksa Ramos pelo incentivo e por acreditarem nos meus sonhos, sempre.

Meu sincero agradecimento nessa jornada é dedicado para minha namorada Cristiane Krüger, que esteve o tempo todo ao meu lado, nos momentos mais difíceis, os quais não foram poucos nesses últimos meses, sempre me fazendo acreditar que chegaria no fim dessa etapa e que seria muito gratificante.

Ao Professor Felix Alberto Farret, Ph.D., pela confiança, pela oportunidade de trabalhar ao seu lado, e por ser o maior incentivador na superação de meus limites perante dificuldades do trabalho. Sempre sábio e coerente em seus ensinamentos técnicos, e de vida. Sempre disponível para ajudar e esclarecer o que era necessário a qualquer momento.

As professoras, Dra. Alzenira da Rosa Abaide e Dra. Luciane Neves Canha, por todo o auxílio e apoio, manifestados ao longo deste ano, que sem dúvida foi de grande bravura.

De forma coletiva, é preciso registrar meus agradecimentos aos colegas do CEESP (Centro de Excelência em Energia e Sistemas de Potência), Emanuel Antunes Vieira, Luis Enrique Manga Olivera, Diogo Franchi, Frank Gonzatti, Fredi Zancan Ferrigo, Luciano Porto de Lima, Maicon Miotto, Marcio Burger Mansilha, Vinícius Nizolli Kuhn, o meu total obrigado pela verdadeira companhia de pesquisa, sempre dispostos a ajudar, e à infinita disponibilidade nos ensinamentos. E ao colega do PPGEE (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica) João Manoel Lenz meu agradecimento, pela influência na execução do meu trabalho.

A todos meus amigos que estiveram comigo tanto nas horas difíceis quanto nas fáceis, proporcionando excelentes momentos de alegria e descontração.

Estendo meus agradecimentos à secretaria do PPGEE (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica) o André Ross Borniatti, e em especial a secretária executiva Luciana Ivanete Kapelinski, visto que sempre trata a todos com eficiência, boa vontade e simpatia. Felicitações e agradecimentos por suas valiosas colaborações ao PPGEE.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Ministério da Educação), bem como à classe trabalhadora brasileira, cujos impostos mantêm todos os programas e institutos públicos deste país, assim possibilitando bolsas de incentivo à pesquisa em nosso país.

“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê ” (Arthur Schopenhauer)

RESUMO

METODOLOGIA DETALHADA PARA RASTREADORES SOLARES AUTOMATIZADOS DE DOIS EIXOS EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

AUTOR: Lucas Feksa Ramos
ORIENTADOR: Felix Alberto Farret, Ph.D.

A busca pela diversidade da matriz energética no mundo é um dos desafios que estão impulsionando pesquisas para preencher essa demanda com fontes de energia alternativa. Assim temos à necessidade de explorar recursos alternativos e renováveis que tragam flexibilidade e sustentabilidade quanto à sua utilização. Diante do panorama apresentado, a geração de energia elétrica com sistemas fotovoltaicos solares é uma tendência, e tem sua tecnologia em constante avanço, apresentando-se como uma solução imediata para essa busca da diversidade. A energia extraída do Sol em sistemas de geração fotovoltaicos depende do fluxo energético proveniente da radiação solar num plano perpendicular aos raios. Por isto, a energia solar média obtida pelos painéis solares convencionais durante o decorrer do dia, nem sempre é maximizada. Uma das causas é que os painéis fixos não estão com um ângulo de zênite de zero grau em relação à posição do Sol. Assim sendo, o movimento Leste (L) à Oeste (O) diário, junto ao sazonal da Terra, afeta diretamente a intensidade de radiação recebida pelos painéis fotovoltaicos. Neste contexto, os rastreadores solares podem ser usados como dispositivos que melhoram substancialmente à eficiência dos painéis fotovoltaicos, por deixá-los sempre numa posição perpendicular à radiação incidente recebida do Sol. Nesta dissertação demonstra-se uma metodologia para rastreamento solar automatizado de dois eixos para painéis fotovoltaicos. Os resultados qualitativos e quantitativos aqui apresentados evidenciam o real ganho na geração de energia por meio do desenvolvimento de um algoritmo de controle em tempo real para sistemas de rastreamento solar de dois eixos, com as respectivas simulações e testes num protótipo de baixo custo, desenvolvido no laboratório do Centro de Excelência em Energia e Sistemas de Potência (CEESP). Além disso, os resultados evidenciam que esta metodologia se adapta com êxito às diferentes condições de uso para rastrear posições do sol, tanto em laboratório como no campo.

Palavras-chave: Rastreador Solar. Potência Fotovoltaica. Eficiência Energética. Geração de Energia. Energia Renovável

ABSTRACT

DETAILED METHODOLOGY FOR SOLAR TRACKERS AUTOMATED IN TWO AXES TO PHOTOVOLTAIC SYSTEMS

AUTHOR: Lucas Feksa Ramos
SUPERVISOR: Felix Alberto Farret, Ph.D.

The search for diversity of energy sources in the world is one of the challenges that are driving research to fill this demand with alternative energy sources. So we have the need to explore alternative and renewable resources that bring flexibility and sustainability in its use. Presented before the panorama, the generation of electricity with solar photovoltaic systems is a trend, and has its technology constantly advancing, presenting itself as an immediate solution to this pursuit of diversity. The energy extracted from the Sun in photovoltaic generation systems depends on the flow of energy from the solar radiation in a plane perpendicular to the rays. Therefore, the average solar energy obtained by conventional solar panels during the course of the day, is not always maximized. One reason is that the fixed panels are not at an angle of zero degree zenith in relation to the Sun position. Thus, the movement East (E) to the West (W) daily, with the Earth's seasonal, directly affects the radiation intensity received by the photovoltaic panels. In this context, solar trackers can be used as devices that improve substantially the efficiency of photovoltaic panels, by letting them always perpendicular to the incident radiation received from the sun. In this dissertation demonstrates a methodology for automated solar tracking two axes for photovoltaic panels. The qualitative and quantitative results presented here show the real gain in power generation through the development of a real-time control algorithm for solar tracking systems of two axes, with their simulations and testing a low-cost prototype, developed in laboratory Center of Excellence in Energy and Power Systems (CEESP). Moreover, the results show that this methodology adapts successfully to the different conditions of use to track the sun's position, both in the laboratory and in the field.

Keywords: Solar Tracking. Photovoltaic Power. Energy Efficiency. Power Generation. Renewable Energy

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Eficiência das células	16
Figura 2 - Desenho de uma linha da planta fotovoltaica	18
Figura 3 - Componentes do projeto	21
Figura 4 - Rastreador com sensores de luminosidade localizados na mesma base do painel	22
Figura 5 - Vista frontal de rastreador de eixo polar	23
Figura 6 - Estrutura para previsões de potenciais solares	24
Figura 7 - Rastreador solar para painel policristalino de 10 Wp	25
Figura 8 - Sol	27
Figura 9 - Dados Sol-Terra	28
Figura 10 - Radiação solar global no mundo	30
Figura 11 - Radiação solar América Latina	31
Figura 12 - Piranômetro no INPE	32
Figura 13 - Irradiação solar na superfície da terra	33
Figura 14 - Espectro da radiação solar	34
Figura 15 - Espectro solar e absorção do Silício (Si)	35
Figura 16 - Várias possibilidades para as energias renováveis	37
Figura 17 - Gráficos dos dados do BIG	40
Figura 18 - Número de pedidos de patentes	41
Figura 19 - Histórico de instalações anuais e instalações esperadas	42
Figura 20 - Inventores da primeira célula solar, Chapin, Fuller e Pearson com base para o primeiro módulo solar de 8 células solares	43
Figura 21 - Exemplos de células de Si	44
Figura 22 - Modelo simplificado de uma célula solar	45
Figura 23 - Representação da corrente de um PV	46
Figura 24 - Circuito simplificado de uma célula fotovoltaica	47
Figura 25 - Modelo equivalente da célula fotovoltaica com um diodo	48
Figura 26 - Curva IxV característica de uma célula fotovoltaica genérica	50
Figura 27 - Camadas de um módulo	51
Figura 28 - Célula, módulo e arranjos	52
Figura 29 - Fator de espaçamento	53
Figura 30 - Ilustração do espaçamento mínimo	54
Figura 31 - Declinação magnética de Santa Maria	55
Figura 32 - Comparação de rendimento de um painel fixo e com seguidor solar de dois eixos	56
Figura 33 - Gráfico da comparação entre um sistema fixo e um sistema dois eixos	57
Figura 34 - Rastreador solar passivo	58
Figura 35 - Rastreador polar de eixo único	59
Figura 36 - Rastreador de eixo horizontal	60
Figura 37 - Rastreador em dois eixos	61
Figura 38 - Rastreador em dois eixos com plataforma giratória	62
Figura 39 - Equação do tempo	65
Figura 40 - Movimento da terra ao redor do Sol	66
Figura 41 - Mudanças anuais da posição do Sol no céu	67
Figura 42 - Declinação do sol	68
Figura 43 - Ângulo zênite	70
Figura 44 - Azimute	70
Figura 45 - Diagrama de blocos do protótipo	71

Figura 46 - Painéis fotovoltaicos monocristalino	73
Figura 47 - Cargas.....	74
Figura 48 - Estrutura com ângulo de 39°	75
Figura 49 - Painéis fotovoltaicas com proteção térmica	76
Figura 50 - Pannel fotovoltaico fixo em 39 °.....	76
Figura 51 - Pannel fotovoltaico com o rastreador de dois eixos.....	77
Figura 52 - Protótipo completo montado	77
Figura 53 - Atmel Arduino Mega 2560	78
Figura 54 - Potenciômetro	79
Figura 55 - Servo motor.....	80
Figura 56 - Sistema elétrico e de controle	81
Figura 57 - Fluxograma do algoritmo de controle.....	82
Figura 58 - Fluxograma SPA.....	83
Figura 59 - Vista externa do local de instalação do protótipo	84
Figura 60 - Localização da instalação do protótipo	84
Figura 61 - Correção da declinação magnética.....	85
Figura 62 - Equação do tempo	86
Figura 63 - Solstício de verão (21/12/2016)	87
Figura 64 - Equinócio de outono (20/03/2016).....	88
Figura 65 - Solstício de inverno (20/06/2016).....	88
Figura 66 - Equinócio de primavera (22/09/2016)	89
Figura 67 - Declinação do Sol	89
Figura 68 - Comparação entre os ângulos de elevação nos solstícios e equinócios	90
Figura 69 - Comparação dos ângulos zênite.....	91
Figura 70 - Comparação dos ângulos azimute nos solstícios e equinócios	92
Figura 71 - Teste ininterrupto no laboratório CEESP.....	93
Figura 72 - Comparação (azimute)	94
Figura 73 - Erro azimute	94
Figura 74 - Comparação (zênite)	95
Figura 75 - Erro zênite	96
Figura 76 - Radiação solar em 22/07/2016.....	97
Figura 77 - Comparação das potências geradas pelos painéis fotovoltaicos em 22/07/2016	98
Figura 78 - Potência gerada pelo painel fixo em 22/07/2016	99
Figura 79 - Potência gerada do painel rastreado 22/07/2016.....	100
Figura 80 - Ganho fotovoltaico diferencial com o rastreamento em dois eixos no dia 22/07/2016	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Consumo de energia elétrica mundial.....	29
Tabela 2 - BIG - Banco de informações de geração ANEEL	40
Tabela 3 - Eficiência das células fotovoltaicas por tecnologia	44
Tabela 4 - Cargas do PV em pontos distintos de operação	49
Tabela 5 - Dados do PV	73

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AH - Ângulo horário

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

Az - Ângulo azimute

BIG - Brasil possui um Banco de Informações de Geração

CA - Corrente alternada

CC - Corrente contínua

CEEE-GT - Companhia Estadual de Geração e Transmissão de Energia Elétrica

CEESP - Centro de Excelência em Energia e Sistemas de Potência

CO₂ - Dióxido de carbono

CRESESB - Centro de Referência em Energia Solar e Eólica Sergio de Salvo Brito

Dr. - Doutor

Dra. - Doutora

Eng(a). - Engenheiro (a)

Elev - Ângulo de elevação

ET - Equação do tempo

EUA - Estados Unidos da América

EVA - Etil Vinil Acetato

GMT - *Greenwich Mean Time*

IEC - *International Electrotechnical Commission*

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

kW - Quilowatt

LDR - Resistor Dependente de Luz (Light Dependent Resistor)

LT - Tempo solar local

MCTI - Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação

NOAA - *National Oceanic and Atmospheric Administration*

OC - Circuito aberto

OMM - Organização Mundial de Meteorologia

ON - Observatório Nacional

PPGEE - Programa de pós-graduação em engenharia elétrica

ProGD - Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica

PV - Pannel fotovoltaico

SC - Curto-circuito

Si - Silício

SPA - Algoritmo de Posicionamento Solar (*Solar Position Algorithm*)

TAI - *The International Atomic Time*

TC - Fator de correção do tempo

TDT - *The Terrestrial Dynamical*

TT - *Terrestrial Time*

UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina

UFSM - Universidade Federal de Santa Maria

USB - *Universal Serial Bus*

UT - *Universal Time*

UTC - *The Coordinated Universal Time*

UV - Ultravioleta

Wh - Watt-hora

Wmin - Watt-minuto

W_p - Watt-pico

Zn - Ângulo zênite

LISTA DE SÍMBOLOS

- a - Distância da Terra - Sol
- h - Constante de Planck
- c - Velocidade da luz no vácuo
- λ - Comprimento de onda
- I_{λ} - Corrente fotogerada
- I_D - Corrente que circula no diodo
- I_C - Corrente que circula pela célula
- I_S - Corrente de saturação reversa
- e - Carga elétrica do elétron
- V - Tensão nos terminais da célula
- η - Fator de idealidade do diodo
- k - Constante de Boltzman
- V_D - Tensão na junção $p-n$
- η - Constante de idealidade do diodo
- R_p - Resistência paralela
- R_s - Resistência série
- V_L - Tensão de saída da célula
- I_L - Corrente de saída da célula
- R_L - Carga
- q - Magnitude da carga do elétron
- V_T - Tensão térmica
- I_L - Corrente de saída do painel
- V_L - Tensão fornecida pelo painel
- α - Ângulo de elevação (graus);
- d - Distância mínima entre o gerador fotovoltaico e o obstáculo
- Fe - Fator de espaçamento obtido pela curva da Figura 29
- h_{ob} - Altura do obstáculo
- h_i - Altura de instalação do gerador fotovoltaico
- δ - Declinação
- φ - Latitude
- ϕ - Longitude

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVO GERAL.....	17
1.2	CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA	19
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	27
3.1	A ENERGIA DO SOL	27
3.1.1	Radiação solar	28
3.1.2	Medindo o potencial solar	31
3.1.3	Trajectoria solar	32
3.2	ENERGIA SOLAR	34
3.2.1	Espectro da radiação solar	34
3.3	ENERGIAS RENOVÁVEIS.....	36
3.3.1	Vantagens e desvantagens	37
3.4	ENERGIA FOTOVOLTAICA.....	38
3.4.1	Panorama de uso da energia solar fotovoltaica	38
3.4.1.1	<i>Panorama nacional</i>	38
3.4.1.2	<i>Panorama internacional</i>	41
3.4.2	Efeito fotovoltaico	42
3.4.3	Células fotovoltaicas	43
3.4.4	Modelo elétrico de uma célula fotovoltaica	46
3.5	SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.....	50
3.6	LOCALIZAÇÃO DOS PAINÉIS FOTOVOLTAICOS	52
3.6.1	Inclinação e orientação dos painéis fotovoltaicos	54
3.6.1.1	<i>Inclinação</i>	54
3.6.1.2	<i>Orientação</i>	55
3.7	RASTREADOR SOLAR	56
3.7.1	Rastreadores Passivos	57
3.7.2	Rastreadores Ativos	58
3.7.2.1	<i>Rastreador polar de eixo único</i>	58
3.7.2.2	<i>Rastreador de eixo horizontal ou zênite</i>	59
3.7.2.3	<i>Rastreador com eixo vertical ou de azimute</i>	60
3.7.2.4	<i>Rastreador de dois eixos</i>	61
3.7.2.5	<i>Rastreador com plataforma rotativa de dois eixos</i>	62
3.8	POSICIONAMENTO SOLAR DOS PAINÉIS FOTOVOLTAICOS.....	62

3.8.1	Algoritmo de posicionamento solar	63
3.8.1.1	<i>Escala de tempo</i>	63
3.8.1.2	<i>Equação do tempo</i>	64
3.8.1.3	<i>Correção longitudinal</i>	65
3.8.1.4	<i>Ângulos solares</i>	65
3.8.1.5	<i>Declinação</i>	68
3.8.1.6	<i>Ângulo horário</i>	68
3.8.1.7	<i>Ângulo de elevação</i>	69
3.8.1.8	<i>Zênite</i>	69
3.8.1.9	<i>Azimute</i>	70
4	MATERIAIS E MÉTODOS	71
4.1	DESCRIÇÃO DO SISTEMA EXPERIMENTAL PROPOSTO	71
4.2	PAINÉIS FOTOVOLTAICOS.....	72
4.3	CARGA NOS PAINÉIS FOTOVOLTAICOS.....	73
4.4	ESTRUTURA MECÂNICA.....	74
4.5	SISTEMAS ELÉTRICOS	78
4.5.1	Hardware	78
4.5.2	Anemômetro	79
4.5.3	Atuadores	79
4.5.4	Software	80
4.5.5	Montagem	80
4.6	DESENVOLVIMENTO DO ALGORITMO.....	81
4.6.1	Algoritmo de posicionamento solar (SPA)	82
4.7	LOCALIZAÇÃO DA INSTALAÇÃO	83
4.7.1	Orientação magnética para instalação do protótipo	85
5	ANÁLISE E DISCUSSÕES DOS RESULTADOS	86
5.1	EQUAÇÃO DO TEMPO	86
5.2	CORREÇÃO LONGITUDINAL.....	87
5.3	ÂNGULOS SOLARES	87
5.4	DECLINAÇÃO	89
5.5	ÂNGULO DE ELEVAÇÃO	90
5.6	ZÊNITE.....	90
5.7	AZIMUTE.....	91
5.8	VERIFICAÇÃO DOS DADOS DO SPA COM OS DO NOAA.....	92
5.9	COMPARAÇÕES ENTRE AS POTÊNCIAS	96
5.9.1	Análise dos dados do INPE	97
5.9.2	Comparações entre as potências geradas	97

5.9.3	Potência gerada no painel fixo em 39°	99
5.9.4	Potência gerada do painel rastreado em dois eixos	99
5.9.5	Análise do ganho energético	100
6	CONCLUSÕES	102
6.1	SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	103
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	104
	ANEXO A – SERVO MOTOR MG995	110

1 INTRODUÇÃO

Sabendo que os combustíveis fósseis ainda são a principal fonte de energia primária no mundo, apresentam-se preocupações sobre a mudança climática juntamente com os preços elevados da energia, que aumentam ainda mais o interesse na exploração das energias alternativas e renováveis.

Existem diversos problemas socioambientais atuais causados pela matriz energética mundial que é baseada nos combustíveis derivados do petróleo, carvão e atômico. Com isto, aflora a preocupação crescente sobre a relação dos impactos causados por essas formas de geração de energia, não renováveis e poluentes, já que a demanda energética tem aumentado consideravelmente com o passar do tempo. No entanto, observa-se que a sociedade não detém essa percepção e preocupação, por considerar que os recursos naturais são infinitos. Hoje, a capacidade da natureza de absorver as emissões dos combustíveis fósseis é limitada, e desta forma, não se pode desvincular as necessidades de investimentos em pesquisas e desenvolvimentos tecnológicos que possam aliviar a atual matriz energética com fontes mais renováveis.

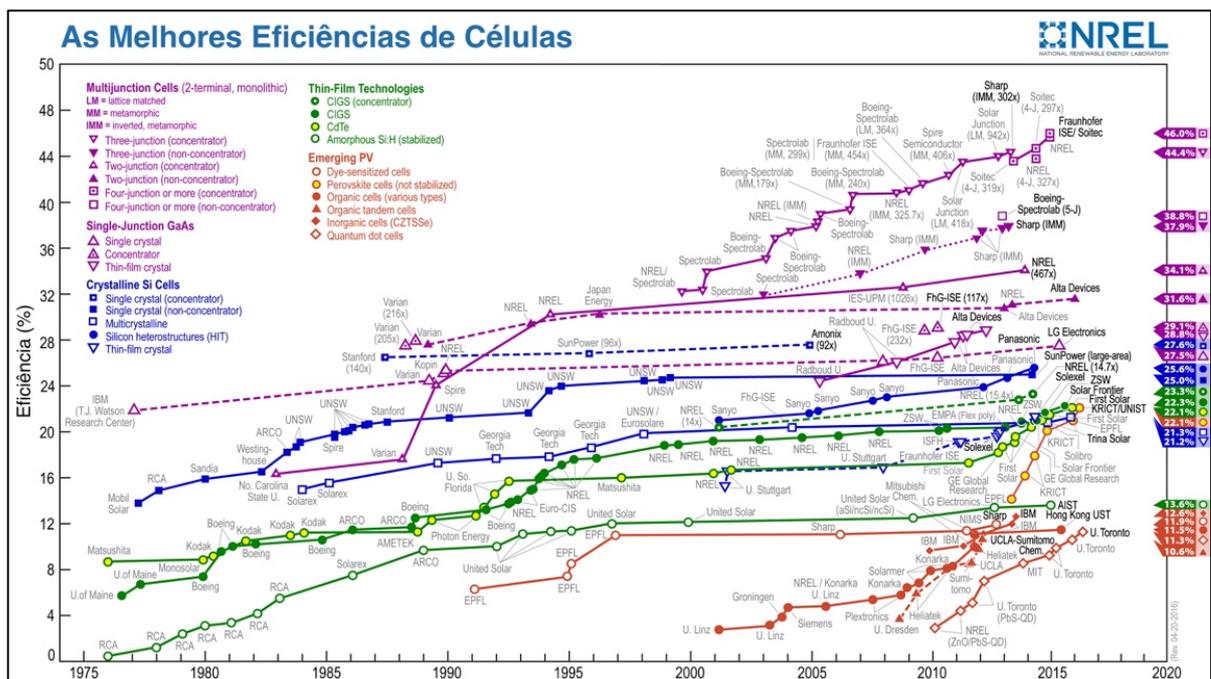
Conforme descrito por Farret (1999), nosso país tem um grande privilégio quanto ao seu potencial energético solar, algo em torno de 2.500 MW. Tal potencial é maior que muitos dos países de primeiro mundo, sendo esta uma grande vantagem, quanto ao aproveitamento dessa forma de energia com aplicações solares. O Sol é a fonte mais importante de geração de potência. Sua imensa quantidade de energia não provoca diretamente nenhum impacto ambiental como resíduos, movimentação ou ruídos através do seu uso.

A utilização das fontes alternativas naturais de energia continua evoluindo, acompanhando o desenvolvimento cultural da humanidade. O Sol aquece o planeta Terra e favorece a vida animal, colheitas na agricultura, ventos, e mais recentemente na geração de energia elétrica ou térmica.

É possível obter energia elétrica do Sol de duas maneiras distintas. A primeira delas é por meio da utilização de painéis fotovoltaicos os quais são dispositivos semicondutores capazes de converter energia solar em corrente elétrica contínua, com rendimento variável entre 3% até 46% em laboratórios. Tais rendimentos dependem da tecnologia aplicada como se verifica na Figura 1 (NREL, 2016) à qual exhibe claramente um gráfico comparando suas eficiências ao longo dos anos e das diferentes tipologias de fabricação das células fotovoltaicas. É possível perceber tendências e características distintas, como tecnologias de fabricação das células, fabricantes e ano de fabricação. A segunda maneira é, por enquanto, a que mais se

adaptou para as grandes aplicações até então, utiliza a radiação emitida pelo Sol para o aquecimento de um fluido através de tubos, tais como as calhas cilíndricas-parabólicas, deste modo, levando esse calor para um gerador de vapor. Em seguida, o vapor gerado por esse calor adentra uma turbina que gerará energia elétrica. Lembra-se que o ciclo desse fluido é fechado e, pode-se ter uso direto para aquecimento de água para residências.

Figura 1 - Eficiência das células



Fonte: Adaptação do National Renewable Energy Laboratory (NREL, 2016).

Com o surgimento dos painéis fotovoltaicos no mercado de energia, a geração está se tornando uma tecnologia cada vez mais presente em nossas realidades. Sabe-se que diversas empresas de médio e grande porte e instituições de pesquisa estão apostando cada vez mais na energia solar. Ela é algo que veio inovar o sistema de produção energética, aproveitando os recursos que a natureza nos facilita, como explicado anteriormente. Os painéis solares são cada vez mais potentes, ao mesmo tempo em que seu custo está cada vez mais reduzido, logo, isso torna a energia solar uma solução economicamente viável. A luz solar é convertida diretamente em eletricidade com módulos através de diversas células solares fotovoltaicas, sem nenhuma outra forma de energia intermediária durante a ocorrência do processo de geração de energia elétrica (FARRET e SIMÕES, 2006).

Para que se tenha o melhor rendimento quanto a geração o enfoque adotado em muitos sistemas comercialmente disponíveis é o uso dos rastreadores solares para o aumento da eficiência da planta de geração fotovoltaica. Nesse sentido, a entrega de energia do painel fotovoltaico fixo é muito menor quando comparada ao mesmo modelo de painel dotado com rastreamento solar, como discutido nesta dissertação. Estes são escopos de muitos estudos no meio acadêmico, com seus pontos favoráveis e contrários.

O Centro de Excelência em Energia e Sistemas de Potência (CEESP) é um grupo de pesquisa vinculado ao programa de pós-graduação em engenharia elétrica (PPGEE) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Ele tem como objetivo auxiliar na elaboração das pesquisas em geração fotovoltaica no Brasil, com muitos projetos de pesquisas nessa linha.

Atualmente, está em andamento um projeto no CEESP que tem como objetivo a construção de uma central fotovoltaica de 10 kW, com possibilidade de se adaptar para diversas configurações para pesquisa. Um dos seus principais focos é uma maior captação de energia solar por meio de rastreadores solares. Assim surge a premissa de se trabalhar com a parte de um rastreador solar autônomo, que pode ser aplicado a este projeto, e ser aplicado a qualquer outro projeto fotovoltaico que necessite de rastreamento solar em dois eixos.

Sabe-se que os custos para as instalações de rastreios são elevados, logo, permanecem prejudicadas a difusão do seu uso em escala global. Todavia, isso será uma boa perspectiva para um futuro próximo, já que se observa um crescimento real no Brasil das energias alternativas.

O rastreador solar é um dispositivo que coloca um painel fotovoltaico (PV) em orientação frontal para o Sol. O rastreamento diário pode aumentar a potência gerada por um PV em 40% ao ano se comparado com um módulo fixo inclinado com ângulo otimizado para a região em estudo, ou até 70%, se comparado com um PV fixo horizontalmente (MOUSAZADEH, KEYHANI, *et al.*, 2009). Mesmo mostrando que o ganho de geração é real, a implementação ainda esbarra na questão fundamental de um projeto, que são os custos, como abordado anteriormente. Contudo, como toda a pesquisa inicial que têm seus valores mais elevados, ela posteriormente tende a ficar mais barata.

1.1 OBJETIVO GERAL

Contribuir para a construção de uma central fotovoltaica de pesquisa de 10 kW que está sendo montada na UFSM pelo CEESP, a qual tem como objetivo, estudar o rendimento comparativo de painéis fotovoltaicos instalados num mesmo local. Como resultado, espera-se aplicar o que será abordado nessa dissertação em uma possível solução para as demandas

geradas em projetos com geração fotovoltaica no que tange rastreamento solar em dois eixos, e submetidas às mesmas condições solares com ângulos diferenciados e rastreamento em dois eixos.

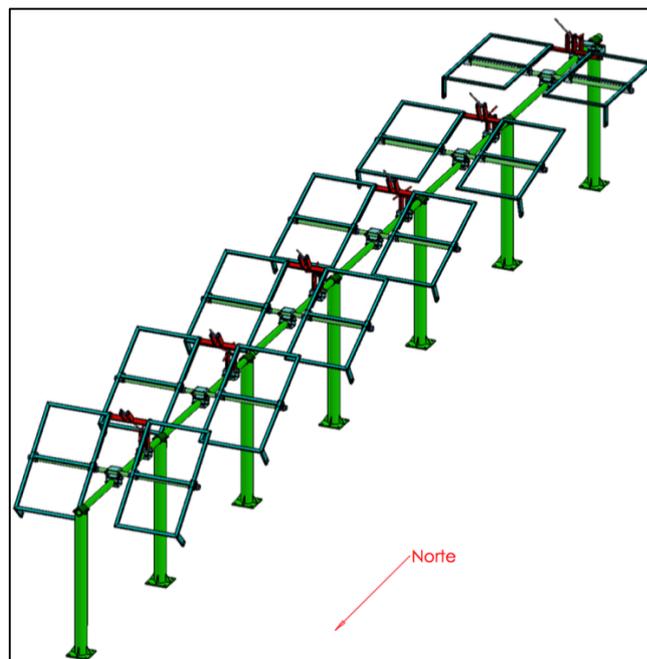
O projeto dos movimentadores dos painéis fotovoltaicos do CEESP considera 4 linhas de painéis solares, tendo cada linha 12 painéis dispostos aos pares. As linhas serão orientadas na direção Norte (N) - Sul (S), como mostrado na Figura 2.

A proposta desta dissertação é desenvolver uma metodologia para concepção de um mecanismo de rastreamento solar sem sensores em dois eixos para sistemas fotovoltaicos, a fim de se estabelecer a melhor solução no que tange à maximização energética.

Sabe-se que o ganho energético com rastreadores solares é diretamente relacionado a eficiência do painel fotovoltaico que será utilizado. No que se refere ao rendimento, está diretamente ligado a qualidade do módulo.

Os resultados, do rastreamento solar desta dissertação foram validados com um protótipo experimental especialmente desenvolvido em laboratório para possíveis aplicações em qualquer tipo de centrais fotovoltaicas, e poderá ser aplicada na central fotovoltaica de pesquisa em desenvolvimento pelo CEESP.

Figura 2 - Desenho de uma linha da planta fotovoltaica



Autor: Dr. Eng. Miguel Neves Camargo (CEESP).

1.2 CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA

Apesar de existir um certo amadurecimento em tecnologia fotovoltaica, o atual contexto em que se encontram os projetos e usinas solares fotovoltaicas com rastreamento em dois eixos ainda é muito pequeno. Necessita-se encontrar uma metodologia apropriada para rastreamento solar automatizando em dois eixos que possa ampliar sua utilização e que não se restrinja a localização da usina solar em questão. Até o presente momento, o Brasil tem alguns pequenos projetos em caráter experimental com sistemas de rastreamento em dois eixos, porém as implementações existentes destes rastreadores são resultados, usualmente de projetos de pesquisas e muitas questões ainda precisam ser respondidas. Com base nesta constatação e da escassa utilização de rastreadores solares em dois eixos, o problema maior verificado refere-se ao rastreador solar sem sensores luminosos, com sistema automatizado de movimentação que obtenha o aumento da eficiência e aproveitamento da energia recebida na Terra quando se tratar de geração fotovoltaica.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Especificamente, esta dissertação pretende:

- efetuar uma revisão na literatura sobre rastreamento solar em dois eixos para sistemas fotovoltaicos, com e sem a necessidade de sensores luminosos, como por exemplo a utilização de resistor dependente de luz (LDR).

- desenvolver teoricamente uma metodologia capaz de funcionar em qualquer sistema de rastreamento solar eletromecânico e automatizado.

- manter a superfície de conversão, no caso do painel solar fotovoltaico, sempre direcionada para o Sol em posição perpendicular aos seus raios solares, continuamente ou com intervalos de tempo a ser melhor estudado.

- construir um protótipo com um painel fixo e outro com rastreador solar em dois eixos que:

- possa simular o funcionamento mais próximo da realidade, para uma possível aplicabilidade em projetos fotovoltaicos;
- no painel fixo o ângulo pretendido será calculado;
- faça o rastreamento sob dois eixos;
- não utilize nenhum tipo de sensor para localizar o Sol;

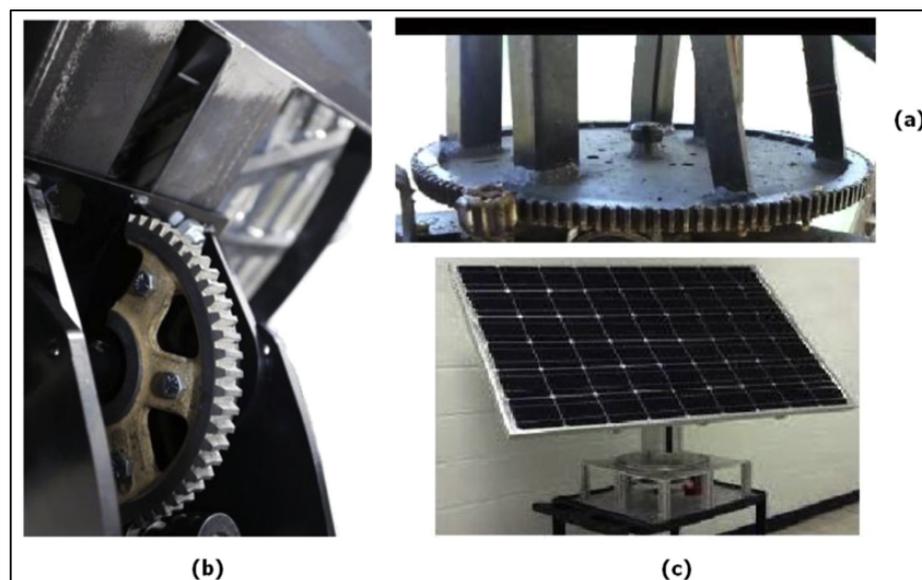
- tenha no algoritmo uma precisão de até 1 grau de erro máximo de apontamento em relação aos dados do *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA);
 - seja totalmente automatizado uma vez que for alimentado com as informações de sua localização no que se refere à longitude e latitude da instalação.
- comparar os painéis fotovoltaicos rastreados com painéis fotovoltaicos fixos para:
- verificar o efeito do rastreamento no painel fotovoltaico;
 - avaliar a quantidade de energia elétrica que será produzida em cada um dos modelos.
- validar a metodologia aplicada nesta dissertação com resultados experimentais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta revisão bibliográfica são apresentados alguns dos trabalhos sobre rastreamento fotovoltaico em publicações nesta área. O principal objetivo desta revisão é apresentar metodologias que utilizem a face da superfície de conversão voltada para o Sol. Alguns trabalhos com relevância são citados a seguir, analisando-se e comentando-se as principais características. O diferencial dessa dissertação, em comparação aos que serão apresentados, são o uso e as formas com que os equacionamentos são implementados no algoritmo, para que o rastreamento localize o Sol com precisão e sem a necessidade de sensores.

Em Fathabadi (2016) o autor descreve um estudo sobre rastreador solar em dois eixos que não utiliza sensores de luminosidade. É proposto para ser amplamente utilizado em sistemas fotovoltaicos e concentradores solares. Este autor realizou testes experimentais em um sistema com rastreador solar e verificou um ganho entre 19,1% e 30,2% a mais de energia solar captada. Para Fathabadi (2016) o custo desse modelo de rastreador é mais em conta por não possuir sensores para medir a luminosidade. A Figura 3 mostra o projeto montado onde: (a) é o ângulo azimute, (b) ângulo zênite e (c) é o protótipo completo com um painel fotovoltaico do modelo KC200GT.

Figura 3 - Componentes do projeto



Fonte: Adaptação de (FATHABADI, 2016).

No trabalho de Munna, Rahaman, Bhuyan e Hoque (2016), os autores implementam um rastreador solar autônomo híbrido em dois eixos. Os rastreadores com sensores de luminosidade estão localizados na mesma base do painel que acompanha o Sol. Esta característica pode ser comparada com sensores da diferença entre as intensidades de luz em cada sensor. Para tal, os sinais são recebidos através de um microcontrolador e enviados para unidade de atuação do painel para que seja direcionado ao novo ponto com mais luminosidade, e poder afirmar que se tem melhor eficiência e desempenho. Ainda esse artigo mostra que o rastreador solar em dois eixos é muito mais eficiente do que os outros tipos de rastreadores em um eixo, e que o sistema gera potência quase constante durante as horas de dia claro. A Figura 4 mostra o protótipo montado onde neste tipo de rastreador, o problema que pode ocorrer são pontos falsos de luminosidade ou de sombreamento dos sensores, movendo erroneamente a estrutura para uma direção com menor incidência de radiação solar.

Figura 4 - Rastreador com sensores de luminosidade localizados na mesma base do painel

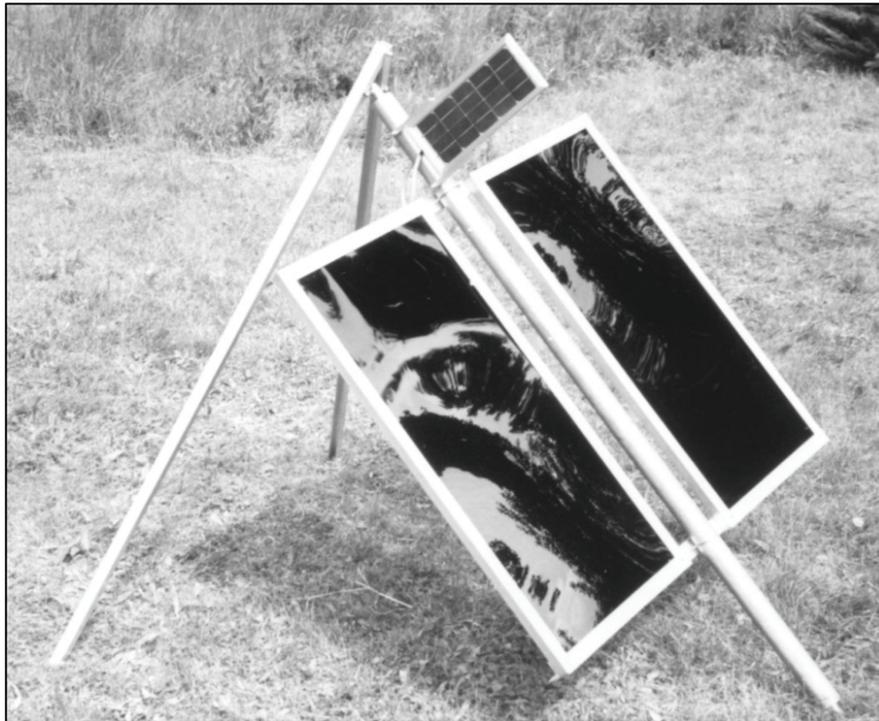


Fonte: Adaptação de (MUNNA, RAHMAN, *et al.*, 2015).

O objetivo geral do trabalho de Engin e Engin (2013) foi desenvolver um algoritmo de controle que melhorasse o desempenho e a confiabilidade do rastreador solar em dois eixos, com foco na otimização da placa controladora, hardware e software da unidade. Um protótipo experimental foi construído para comprovar o rastreador proposto aumentando a energia coletada em 40,7% em relação ao sistema fixo.

No artigo escrito por Poulek e Libra (1998), foi descrita a construção de um rastreador solar em um eixo com sensor. Os sensores usados foram placas solares fotovoltaicas pequenas adicionadas a estrutura mecânica com um ângulo de inclinação de 20° em relação a normal do conjunto de módulos solares. Conforme mostra a Figura 5, o equipamento desenvolvido tem um ângulo de rotação de 120° .

Figura 5 - Vista frontal de rastreador de eixo polar



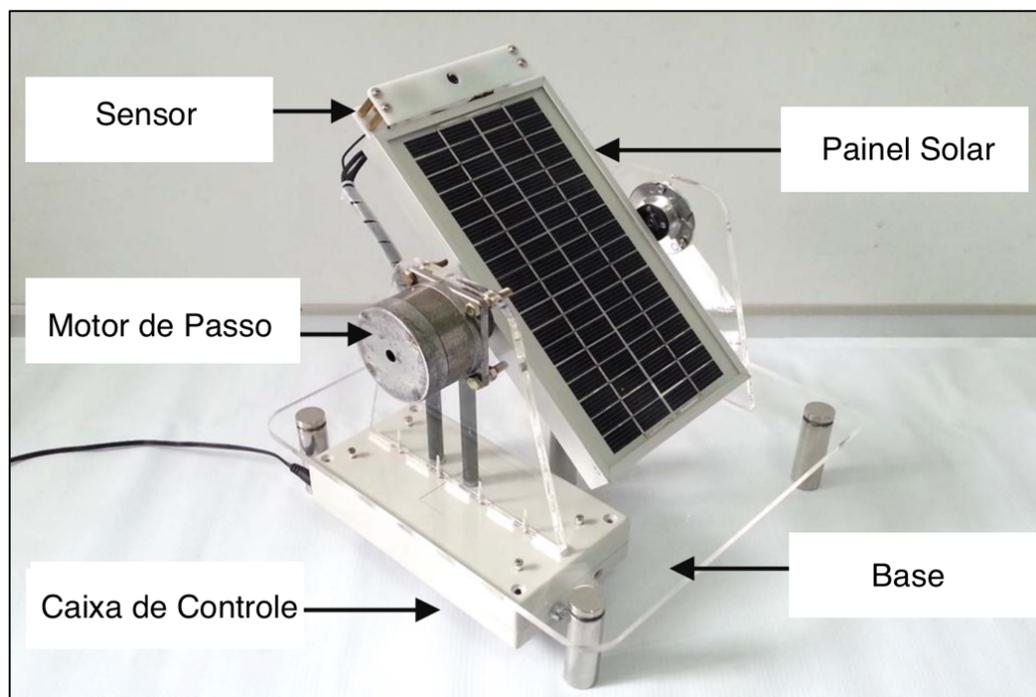
Fonte: Adaptação de (POULEK e LIBRA, 1998).

Os autores Roth, Georgiev e Boudinov (2004), descrevem um rastreador solar de dois eixos, utilizando sensores LDR com 4 quadrantes para determinar a posição do Sol. Um pireliômetro foi utilizado para medir a radiação direta. Ainda os autores informam que é possível usar o mesmo princípio para painéis fotovoltaicos e concentradores solares.

Na dissertação de mestrado de Lenz (2015) foi apresentado um estudo para melhor utilização dos rastreadores mecânicos para painéis fotovoltaicos com a análise do ganho energético de algumas configurações de um e dois eixos. O autor apresentou também uma metodologia completa para os cálculos de energia solar em superfícies e uma modelagem dos painéis fotovoltaicos. As etapas deste trabalho foram validadas com ensaios experimentais no Centro de Excelência em Energia e Sistemas de Potência (CEESP) com dados adquiridos em órgãos confiáveis para sustentação da análise proposta.

Os autores Basnayake, Jayathilaka, Amarasinghe, Attalage e Jayasekara (2016) propõem uma nova ferramenta para utilização nas previsões de potenciais solares que podem medir e gravar os dados solares no local, como ilustrado na Figura 6. Este dispositivo é capaz de medir e registrar a energia solar disponível juntamente com as medições ambientais, tais como o nível de intensidade de luz, temperatura ambiente, umidade e temperatura do painel. Os dados medidos são então armazenados em um cartão de memória interna e disponíveis a qualquer momento para possíveis análises dos potenciais solares dos locais.

Figura 6 - Estrutura para previsões de potenciais solares



Fonte: Adaptação de (BASNAYAKE, JAYATHILAKA, *et al.*, 2016).

Bakos (2015), estudou um rastreador em dois eixos para que a energia coletada fosse medida e comparada com uma superfície fixa inclinada em 40° para o Sul. Os resultados apontaram para um ganho significativo de 46,46% em comparação com o de superfície fixa. Porém, o sistema contempla o uso de foto sensores para localização do Sol, acarretando erros, por diferença de valores, pela qualidade de construção dos LDR e por degradação com o tempo.

Suria e Idris (2015) apresentam um rastreador solar em dois eixos baseado apenas em algoritmos de controle. O protótipo desenvolvido é apresentado na Figura 7. Durante os testes, os autores mostraram que a potência de saída do painel solar foi aumentada pelo posicionamento do painel solar diretamente perpendicular ao Sol. Obtiveram como resultados deste rastreador solar um aumento de sua geração em 21,4%.

Figura 7 - Rastreador solar para painel policristalino de 10 Wp



Fonte: Adaptação de (SURIA e IDRIS, 2015).

No trabalho de Sohag, Hasan, Khatun e Ahmad (2015) foi proposta uma metodologia com a montagem de um rastreador solar com sensores LDR, e processamento de imagem com *webcam* simultâneo, para direcionar a estrutura na direção correta. Os autores explicam que não

é preciso utilizar diversas *webcams* e nem vários jogos de LDR, pois um único sistema pode direcionar corretamente uma planta fotovoltaica com centenas e até milhares de painéis para o Sol.

Os autores Mereddy, Raju e Sadula (2015) demonstram o funcionamento de um rastreador solar inteligente em dois eixos utilizou LDR para detectar a posição solar. Porém, quando o céu estiver nublado ou com muitas nuvens um temporizador entra em ação e controla o rastreador solar para não acionar a movimentação.

Os autores Elagib e Osman (2013) implementam um rastreador de dois eixos sem sensores e com base em mapas solares para prever a posição aparente do Sol. Este rastreamento é de baixo custo e pode ser utilizado em uma variedade de plantas de geração. A dificuldade deste rastreador é garantir o apontamento correto, pois tem que ser configurado em uma posição inicial tão exata quanto possível uma vez que não possui feedback para corrigir seu erro.

Al-Mohamad (2004), em seu artigo publicado conseguiu melhorias comprovadas experimentalmente utilizando rastreamento solar em dois eixos com o uso de LDR. Verificou o ganho de 20% em relação ao painel fixo nas mesmas condições de operações.

Yilmaz, Ozcalik, Dogmus, Dincer, Akgold e Karaaslan (2015), fizeram estudos teóricos e experimentais comparando rastreadores de dois eixos a um painel fixo. O protótipo foi adaptado a um sistema fotovoltaico de 4,6 kW. Os resultados deste trabalho mostraram que os ganhos com rastreadores solares comparados aos fixos são superiores em questões de geração de potência.

Yao, Hu, Gao, Yang e Du (2014) mostram o desenvolvimento de um rastreador solar de eixo duplo que pode ser utilizado em diversos tipos de testes. Um dos testes e métodos utilizados no artigo aumentam a eficiência em 23,6% comparada com o PV fixo. Nesse sentido percebe-se que os resultados são promissores quando se discute rastreamento solar em dois eixos.

Finalmente, Mousazadeh, Keyhani, Javadi, Mobli, Abrinia e Sharifi (2009) descrevem uma revisão bem completa dos métodos de rastreamento solar para maximização da geração de potência. Como descrito pelos autores, o rastreador solar não é essencial, mas caso seja utilizado, pode aumentar a energia coletada significativamente em diferentes períodos de tempo e condições geográficas. Também explicaram que não é recomendado o rastreamento em pequenos painéis solares. Neste artigo foram discutidos diversos tipos de rastreamento solar.

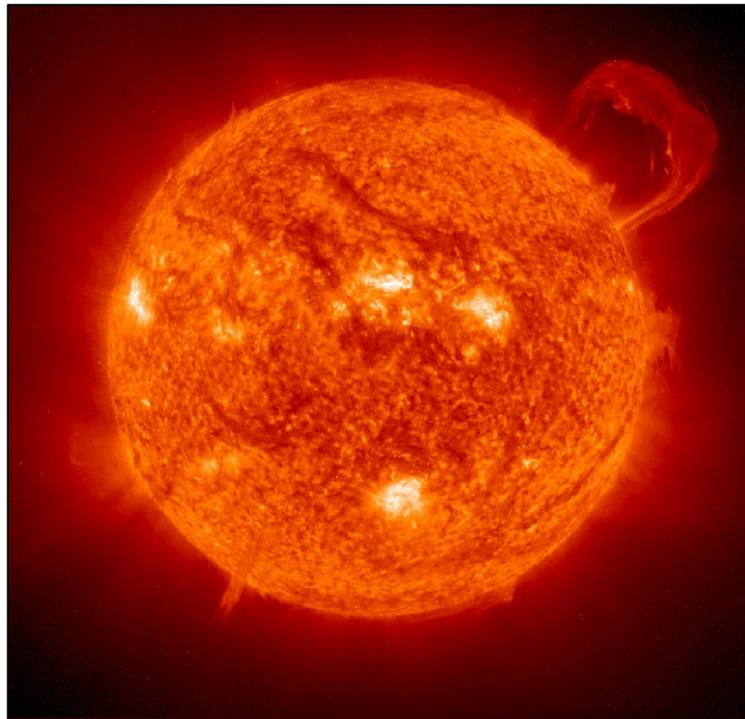
Levando em consideração os artigos apreciados, nota-se que os rastreadores solares são notáveis ferramentas para aumento da eficiência e, conseqüentemente, impactantes na geração de potência elétrica fotovoltaica.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 A ENERGIA DO SOL

O Sol, como mostrado na Figura 8, é conhecido por ser fonte de toda a vida na Terra, conforme o astrônomo Galileo Galilei (VIDEIRA, 2009). Historicamente também foi idolatrado por diversas civilizações. A energia solar é a fonte menos poluente e ilimitada conhecida até hoje, e por isso, é de muito interesse nesta pesquisa como fonte primária

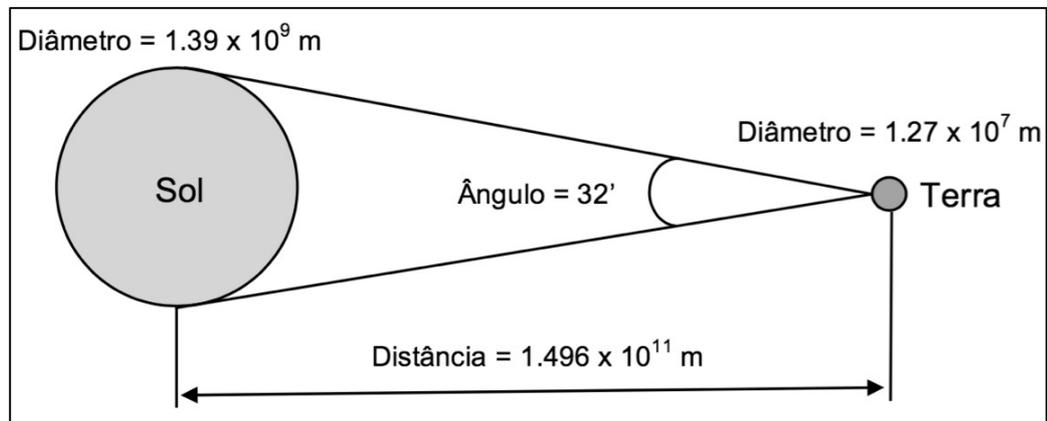
Figura 8 - Sol



Fonte: SOHO (ESA e NASA).

O Sol é uma esfera de matéria gasosa intensamente quente, com diâmetro de $1,39 \times 10^9$ m. Sua distância da Terra é cerca de $1,5 \times 10^{11}$ m, sendo que a radiação viaja no vácuo com uma velocidade de 300.000 km/s (WILLIAMS, 2016). A energia do Sol atinge nosso planeta em 8 minutos e 32 segundos. Pode-se notar que o ângulo tal como visto da Terra formado entre duas retas tangendo o diâmetro externo do Sol é de 32 minutos de grau, como demonstrado na Figura 9.

Figura 9 - Dados Sol-Terra



Fonte: Autor.

O Sol é semelhante a um reator de fusão gigantesco que pode gerar uma temperatura de aproximadamente 15 milhões de Kelvin. Toda essa energia tende a ser liberada no espaço sob a forma de radiação (MERTENS, 2014).

3.1.1 Radiação solar

Para maior entendimento do tema desta dissertação são apresentadas algumas definições básicas e cálculos baseadas nos conceitos usuais em energia solar conforme (DUFFIE e BECKMAN, 2013):

- a) Irradiância (W/m^2) é a densidade de potência radiante incidente em uma superfície por unidade da área que se está levando em conta;
- b) Irradiação (Wh/m^2) é a energia incidente por unidade de área em uma superfície, encontrada por integração da irradiância em um determinado tempo;
- c) Radiação direta é a radiação solar recebida do Sol sem sofrer a dispersão na atmosfera terrestre;
- d) Radiação difusa é a radiação solar recebida do Sol após sofrer algum tipo de dispersão pelas moléculas e partículas presentes na atmosfera;
- e) Radiação global é a soma da radiação direta e difusa recebida em uma superfície qualquer.

O Sol irradia continuamente uma quantidade de radiação $P_{sol} = 3.845 \times 10^{26} W$ em todas as suas direções. A Terra recebe apenas uma pequena parcela de toda essa energia. Para que se calcule facilmente a energia que a Terra recebe, calcula-se R_{st} , assumindo que haja uma

esfera em torno do Sol com raio R_{sol} e que nesta distância seja a quantidade de radiação do Sol que se espalha por toda a área da esfera terrestre, considerando metade da esfera irradiada. Nesse sentido, na posição da Terra obtemos a seguinte densidade de potência ou irradiância.

$$R_{st} = \frac{\text{Radiação sol}}{\text{Área da esfera}} = \frac{P_{sol}}{4 \cdot \pi \cdot R_{sol}^2} = \frac{3.845 \times 10^{26} W}{4 \cdot \pi \cdot (1.496 \times 10^{11} m)^2} = 1367 W/m^2 \quad (1)$$

O resultado de $1367 W/m^2$ da Equação 1 é chamado de constante solar (MERTENS, 2014). Existem diversos fatores que implicam na radiação recebida pelos painéis fotovoltaicos, como por exemplo alguns efeitos atmosféricos de absorção, reflexão e a latitude do local de instalação do sistema. Outras variações acontecem por efeitos locais, como poluição, nuvens e temperaturas diferenciadas.

A energia solar tem um dos maiores potenciais conhecidos de geração elétrica como fonte renovável. Em um intervalo de duas horas, a quantidade de energia solar recebida na superfície da Terra é de 188 mil TWh, que é superior ao consumo energético anual da humanidade (PINHO e GALDINO, 2014). Salienta-se que o consumo mundial de energia elétrica no ano de 2012 foi de 22 mil TWh. Na Tabela 1 podem ser conferidos os demais valores para os diversos países (EPE, 2015).

Tabela 1 - Consumo de energia elétrica mundial

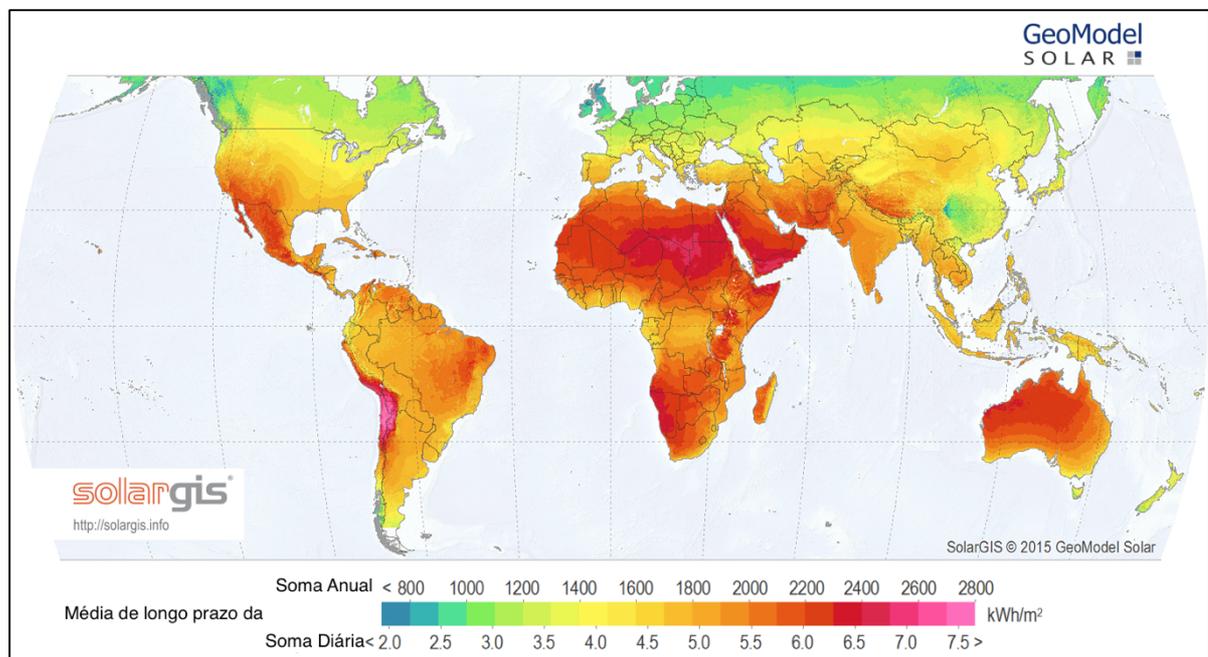
Produtores	TWh	% Mundial em 2012
China	4.985	22,0 %
Estados Unidos	4.272	18,8 %
Índia	1.128	5,0 %
Rússia	1.069	4,7 %
Japão	1.026	4,5 %
Canadá	634	2,8 %
Alemanha	623	2,7 %
França	559	2,5 %
Brasil	552	2,4 %
Coréia	531	2,3 %
Demais Países	7.290	32,3 %
Mundo	22.668	100 %

Fonte: Adaptação de (EPE, 2015).

Observa-se que o aumento da utilização de energia solar no mundo por todas as indústrias de energias alternativas e renováveis com foco em geração fotovoltaica foi o que registrou o maior crescimento substancial, de acordo com a REN21 (2016). Verifica-se na Figura 10, que os países investidores em energia solar nem sempre são os que possuem o maior potencial de radiação solar. Pode-se citar em questões como investimentos anuais e adições a capacidade líquida de geração com painéis fotovoltaicos no ano de 2015, estão nos primeiros lugares em ordenação decrescente, a China logo após a Alemanha, em seguida o Japão e em quarto lugar, os Estados Unidos da América.

Verifica-se que a China, por exemplo, tem um potencial anual de 1400 - 1600 kWh/m² e está em primeiro lugar na geração de energia, utilizando tecnologia fotovoltaica. Logo em seguida, consta a Alemanha, com potencial anual entre 1000 - 1400 kWh/m². Verifica-se que o maior potencial em geração dos países com maior utilização de energia fotovoltaica, é o pior potencial do Brasil que pode ser verificado na Figura 11, variando entre 1700 - 2200 kWh/m².

Figura 10 - Radiação solar global no mundo



Fonte: Adaptação de (SOLARGIS, 2015).

Figura 11 - Radiação solar América Latina



Fonte: Adaptação de (SOLARGIS, 2014).

3.1.2 Medindo o potencial solar

Como visto anteriormente, a intensidade da radiação solar é muito importante para a geração fotovoltaica. Por isso, para medir a intensidade solar no nível do solo são utilizados diversos equipamentos específicos, e normatizados pela Organização Mundial de Meteorologia (OMM). Um deles, por exemplo, é o piranômetro, apresentado na Figura 12 onde os dados são coletados em um *datalogger* no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e utilizados nesta dissertação. O piranômetro é usado para medir a radiação solar em uma superfície e é baseado num sensor que mede a densidade de fluxo da radiação solar (watts por metro quadrado do medidor) num campo de visão de 180 graus.

Figura 12 - Piranômetro no INPE



Fonte: Autor.

No levantamento nacional do potencial solar, não se pode deixar de citar os dois principais estudos na área que são, o “Atlas Brasileiro de Energia Solar” produzido pelo INPE em parceria com a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) (PEREIRA, MARTINS, *et al.*, 2006) e o “Atlas Solarimétrico do Brasil” - produzido pelo Centro de Referência em Energia Solar e Eólica por Sergio de Salvo Brito (CRESESB) (TIBA, FRAIDENRAICH, *et al.*, 2000). Os dois estudos complementares podem ser adquiridos gratuitamente em seus respectivos sites, disponibilizados para estudos e trabalhos. Estes dois estudos mostram as variações na radiação captada na superfície do Brasil.

3.1.3 Trajetória solar

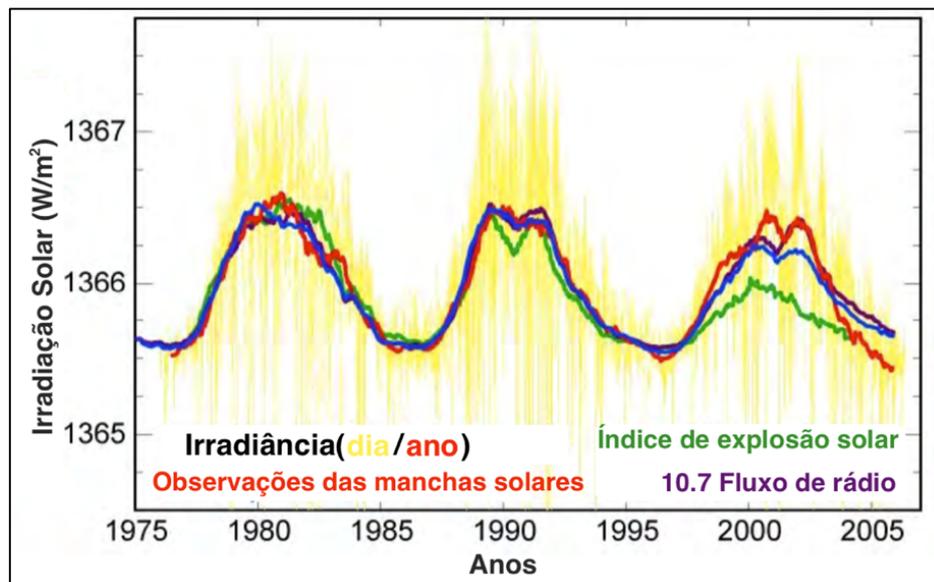
Observado a partir da Terra, o céu varia ao longo dos anos e dos séculos, e ter o conhecimento do caminho do Sol é de suma importância para calcular a radiação que incide sobre uma superfície e a definição da orientação certa que devem estar os painéis fotovoltaicos para que evitar sombreamento e obter o melhor aproveitamento energético possível. O Sol irradia na forma de energia eletromagnética. A quantidade de radiação que atinge a terra é normalmente conhecida como irradiação.

Na Figura 13 é possível observar a radiação solar sobre a superfície da terra. Além disso pode-se observar as variações cíclicas solares entre os anos de 1975 e 2005. Para aplicações

solares baseadas na geração fotovoltaica, assumiremos o valor relativamente estável de 1367 W/m^2 que é a energia eletromagnética solar passando através da atmosfera da Terra (DUFFIE e BECKMAN, 2013).

Os raios emitidos pelo Sol, raios gama, atingem a órbita terrestre alguns minutos após deixarem a superfície do Sol, cruzando aproximadamente 150 milhões de quilômetros. As nuvens refletem cerca de 17% da luz solar de volta ao espaço, cerca de 9% é espalhado pelas moléculas do ar e 7% é refletida diretamente da superfície de volta para o espaço. Portanto, o percurso através da atmosfera diminui a radiação na superfície da Terra em cerca de 35% a menos do que o nível na estratosfera (FARRET e SIMÕES, 2006).

Figura 13 - Irradiação solar na superfície da terra



Fonte: Adaptação de Robert A. Rohde/GNU General Public License (ROHDE, 2015).

Cada metro quadrado de área da superfície terrestre em seu plano perpendicular, tanto para um painel solar fotovoltaico ou térmico, pode recolher cerca de 1000 W de energia solar, assumindo uma eficiência de 100%. De qualquer forma, para melhorar a eficiência da produção de energia, é preciso um mecanismo que rastreie o Sol, chamado de rastreamento solar, visto que a trajetória do Sol muda ao longo do ano.

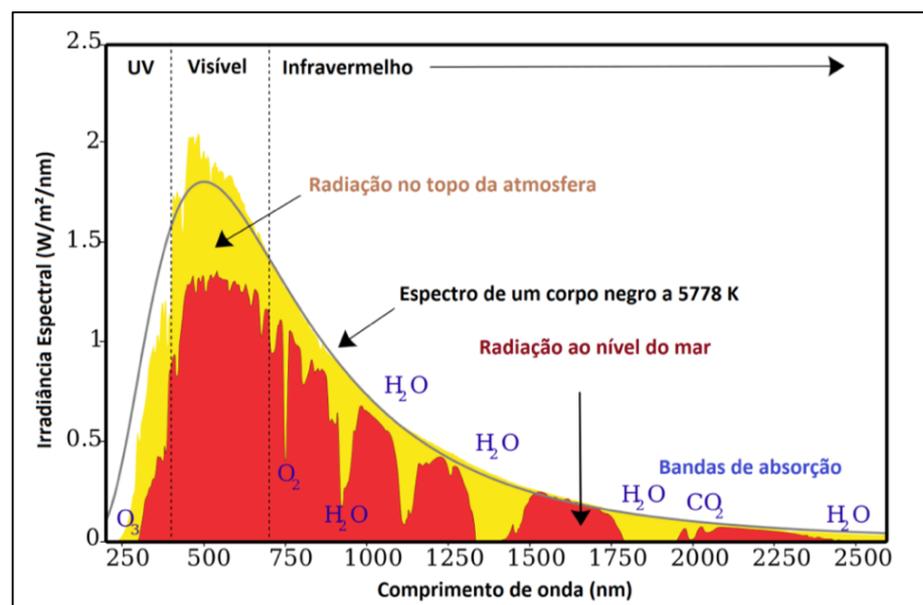
3.2 ENERGIA SOLAR

O Brasil está localizado em sua maior parte na região intertropical, possuindo um grande potencial de energia solar durante todo o ano conforme (PEREIRA, 2006). Esta posição favorável vem a cada dia conquistando novos mercados com painéis fotovoltaicos e solar térmico, entre outros, além de ser uma energia abundante e de fácil acesso.

3.2.1 Espectro da radiação solar

A energia solar é transmitida pelo espaço até o nosso planeta Terra na forma de radiação eletromagnética sofrendo os efeitos da atmosfera neste percurso. A luz solar interage com moléculas de ar (vapor de água, dióxido de carbono e ozônio) (MIT, 2015), fazendo com que parte da luz seja refletida ou absorvida. Na Figura 14 está graficamente representado o espectro da radiação solar. Percebe-se que o corpo negro ideal, radiação solar ao nível do mar e a radiação extraterrestre, que como descrito anteriormente, tem uma perda significativa de 35% (FARRET e SIMÕES, 2006) entre a radiação extraterrestre e a radiação a nível do mar. Desta forma, a irradiância espectral que chega na Terra é menor, como apresentado em vermelho na Figura 14.

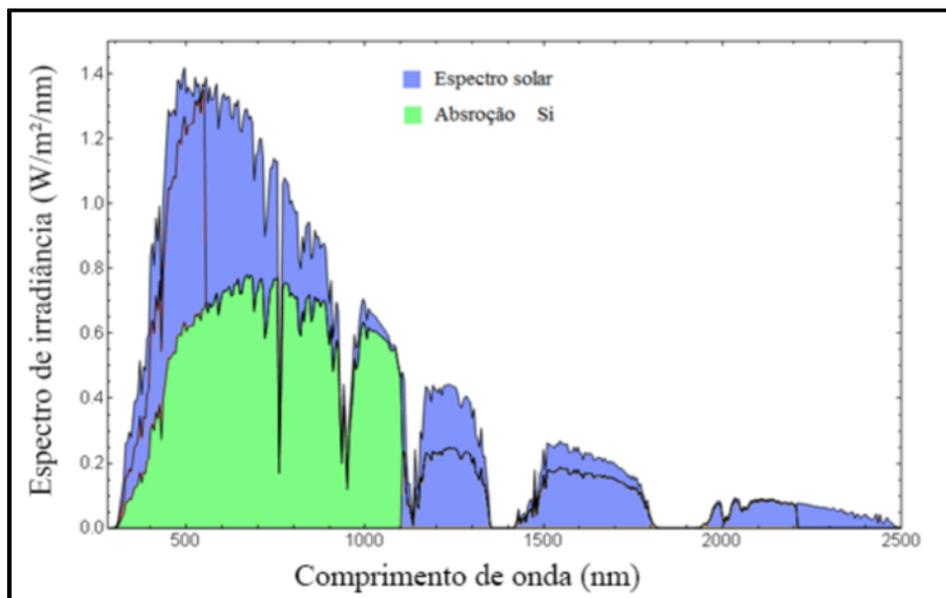
Figura 14 - Espectro da radiação solar



Fonte: Adaptação de Rohde /GNU General Public License (ROHDE, 2009).

Conhecer o espectro de absorção de uma célula solar é vital para sua geração de energia. Na Figura 15 apresenta-se a absorção do Silício (Si), abrangendo as faixas de ultravioleta (UV), luz visível e infravermelho responsáveis pela grande parte da transferência de calor por radiação térmica. Um problema que reduz a eficiência e, por consequência, a potência dos painéis PV é ocasionado pela radiação infravermelha que afeta diretamente a operação dos painéis fotovoltaicos com a elevação da temperatura (NANJANAVAR, GANDHI e PATEL, 2013). No entanto, os efeitos e parâmetros de temperatura no painel fotovoltaico não são foco desse trabalho.

Figura 15 - Espectro solar e absorção do Silício (Si)



Fonte: Adaptação de João Manoel Lenz (LENZ, 2015).

As características dos materiais semicondutores são criteriosamente escolhidas para que haja uma melhor conversão fotovoltaica espectralmente selecionada, tendo como respaldo as normas internacionais. A Comissão Eletrotécnica Internacional (em inglês: *International Electrotechnical Commission*, IEC) disponibiliza os padrões para fabricação de células fotovoltaicas. A organização que prepara e publica os padrões internacionais que regem a parte fotovoltaica para todas as tecnologias elétricas, eletrônicas e afins, são as normas: IEC 60904-1:2006, IEC 60904-2:2015 RLV, IEC 60904-3:2008, IEC 60904-4:2009, IEC 60904-5:2011, IEC 60904-7:2008, IEC 60904-8:2014, IEC 60904-9:2007 e IEC 60904-10:2009 (IEC, 2016).

Recomenda-se, que a resposta espectral da célula solar fabricada com Silício seja a mais próxima possível desses padrões.

Sabe-se que a qualidade do material das células e da tecnologia utilizada no processo da fabricação é que dão um ganho de eficiência final satisfatória. Geralmente, a eficiência de conversão de uma célula solar comercial é de 10% a 15% (FARRET e SIMÕES, 2006). Por exemplo, ao meio dia de um dia claro, um módulo fotovoltaico pode gerar uma média de 100 W/m².

3.3 ENERGIAS RENOVÁVEIS

A energia fotovoltaica propriamente dita, tem um de seus métodos de aumento de eficiência na geração com a utilização de rastreamento em dois eixos, em uma visão macro como premissa na família das energias renováveis, são aquelas que têm uma taxa de reposição equivalente à sua utilização, sendo recuperadas naturalmente ou artificialmente.

Algumas energias primárias de uso são, os movimentos dos planetas, o calor da Terra e a radiação solar. Considerando-se que, os movimentos dos planetas são usados nas centrais de energia com as marés, o aquecimento da Terra em calefação de edifícios é obtido com o auxílio de uma bomba de calor, bem como, para geração de energia elétrica em uma central elétrica geotérmica.

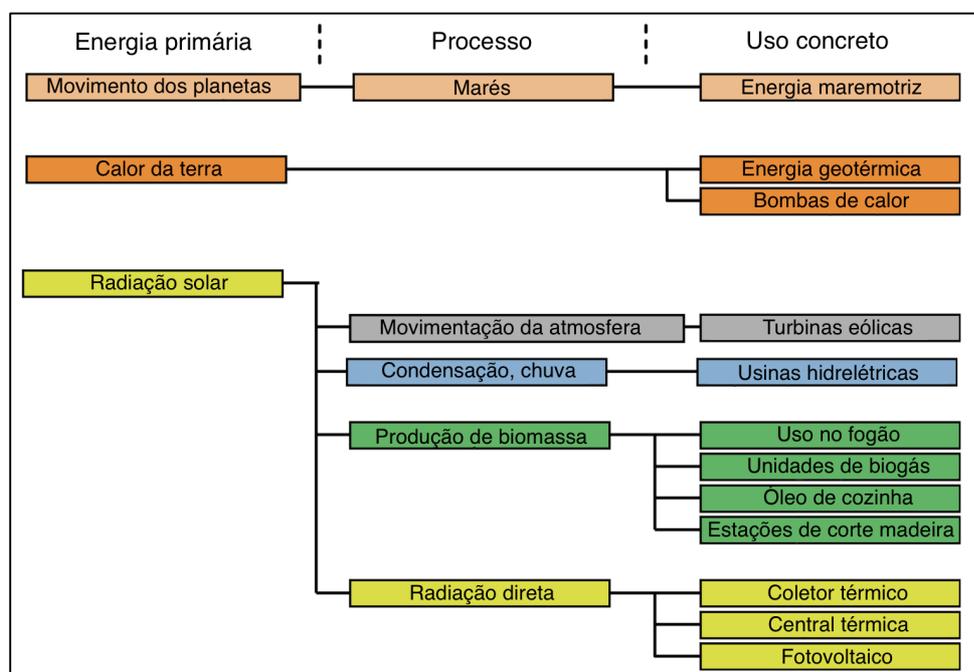
Na Figura 16 apresenta-se algumas formas de energia, observando-se que a radiação solar é a base para uma gama surpreendente de energias. A energia hidrelétrica é proveniente da condensação das águas após sua precipitação sobre a Terra. Diferenças de temperaturas causam movimentação na camada de ar gerando ventos e, assim, se fazem úteis para a energia eólica e para a biomassa, a luz solar que faz que a fotossíntese aconteça.

O uso direto da radiação solar produz calor, por exemplo, os coletores térmicos para o aquecimento doméstico de água. Nas centrais solares térmicas gera-se calor por meio do processo de luz solar concentrada por espelhos, que se tornam geradores de eletricidade.

Por fim, a energia fotovoltaica, onde a radiação solar é convertida diretamente em energia elétrica. Observa-se que nessa família de energias renováveis, pode ser considerada como a mais nova tecnologia de geração. A energia fotovoltaica tem uma grande vantagem, é a única capaz de converter a luz solar diretamente em energia elétrica, sem a necessidade de processos intermediários e complicados, e sem usar conversores mecânicos que podem produzir ruídos e desgastes.

A exploração de fontes renováveis no Brasil como a radiação solar, o vento, a água e a biomassa, oferecem um grande potencial limpo de utilização e exploração de novas tecnologias. Esclarece-se que, mesmo com custos um pouco elevados na implementação de alguma dessas opções no que tange geração, leva-se em consideração que a produção em escala de uso mundial, tende a diminuir o custo. Cita-se como exemplo o valor da geração de energia eólica, e até mesmo o valor da geração de energia fotovoltaica. Considera-se que existem benefícios sociais e ambientais ligados a qualquer uma das opções de energias renováveis.

Figura 16 - Várias possibilidades para as energias renováveis



Fonte: Adaptação da Mertens (2014) (MERTENS, 2014).

3.3.1 Vantagens e desvantagens

As energias renováveis têm características comuns. Sua maior vantagem em contraste com todos os outros tipos de energia conhecidos, é ser praticamente inesgotável. Além disso, as energias renováveis são quase livres de quaisquer emissões para produzir potência elétrica (MERTENS, 2014). Outra vantagem importante está no fato de que a Terra é um reservatório abundante de energia. Por outro lado, são grandes as áreas (para módulos solares em energia fotovoltaica, para turbinas eólicas, etc.) que podem "recolher" energia suficiente para gerar

potência elétrica. Isto significa que, normalmente, são elevados os custos dos investimentos efetuados para que se possa adquirir grandes áreas para instalações dessas tecnologias e a além da necessidade de uma ampla quantidade de material.

Uma desvantagem das energias renováveis, é o fornecimento descontinuado de energia como são os casos da energia fotovoltaica, à noite, por exemplo, não se tem energia oriunda do Sol. Logo a energia fotovoltaica e energia eólica são especialmente afetadas pela descontinuidade da fonte primária. Logo, no Brasil, são indispensáveis as centrais hidroelétricas que podem armazenar energia e garantir um fornecimento constante. Existem diversos lugares em que não há uma rede de distribuição de qualidade ou até mesmo a sua simples inexistência. Para estes casos, as energias renováveis apresentam uma outra vantagem, podem ser usadas em lugares distantes das grandes cidades sem necessitar de linhas de transmissão. Como resultado disto, as fontes renováveis de potência somam mais resultados benéficos, tanto para consumidores como para concessionárias e para os autoprodutores a energia renovável representa mais uma vantagem, pois trata-se do aumento da eficiência energética e uma possível redução de custos da geração.

3.4 ENERGIA FOTOVOLTAICA

3.4.1 Panorama de uso da energia solar fotovoltaica

Nessa seção apresenta-se um breve cenário do uso da energia solar fotovoltaica, com discussões sobre o panorama nacional e internacional de geração fotovoltaica, uma vez que se tem argumentado sobre o declínio de preço, juntamente com o crescimento das vendas de painéis fotovoltaicos, entre outros assuntos abordados. Nos últimos cinco anos a perspectiva do mercado nacional e internacional mudou consideravelmente. Os preços despencaram, a implementação global cresceu fortemente, gerando uma tendência ao uso de painéis fotovoltaicos no mundo inteiro.

3.4.1.1 *Panorama nacional*

O Brasil iniciou suas pesquisas em energia fotovoltaica na década de 50, com estudos em células de Silício e desenvolvimento de tecnologia própria para criação de células fotovoltaicas (PINHO e GALDINO, 2014). Na década de 70, com o surgimento de diversos grupos e instituições de pesquisas focados em estudos sobre energia fotovoltaica, começaram a

ser desenvolvidas aplicações que objetivavam suprir energia para telecomunicações e sistemas com bombeamento de água (TOLMASQUIM, 2003). Não se pode deixar de mencionar a relevância do grupo do Centro de Excelência em Energia e Sistemas de Potência (CEESP), que iniciou suas atividades no ano de 1986 e atua até hoje por meio de suas linhas de pesquisas voltadas para as energias alternativas, visando suprir uma demanda necessária de energia elétrica no Brasil.

Sabe-se do avanço dos marcos regulatórios reais e necessários quanto a utilização de sistemas de energias alternativas, como em 2015 a REN 482 que já teve seu processo de revisão, originando a nova resolução REN 687/2015. Esta resolução amplia as possibilidades das micro e mini gerações, aumentando alguns limites como potência, criando mecanismos de compartilhamento da geração, reduzindo prazos para resposta das distribuidoras, entre outras mudanças significativas para os usuários que pretendam gerar sua própria energia. As novas regras da REN 687/2015 já estão em vigor desde março de 2016.

No Brasil existe um programa de incentivo às fontes alternativas, criado pela Lei nº 10.438/2002, com o objetivo de aumentar a participação das fontes alternativas renováveis. Da mesma forma, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) aprovou dia 24 de novembro de 2015 os aprimoramentos na resolução normativa nº 482/2012 que cria a compensação de energia elétrica, que permite ao consumidor instalar pequenos geradores (tais como painéis solares fotovoltaicos e microturbinas eólicas, dentre outros) em sua unidade consumidora, e negociar energia com a distribuidora local para reduzir o valor da sua fatura de energia elétrica (ANEEL, 2015).

Foi lançado em 2015 um programa de geração distribuída onde o maior destaque é a energia solar que pode movimentar pouco mais de R\$ 100 bilhões em investimentos, até 2030. A portaria nº 538, de 15 de dezembro de 2015, cria o Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica (ProGD), objetivando trazer benefícios para o consumidor e para o setor elétrico. Até o ano de 2030, 2,7 milhões de unidades consumidoras poderão ter energia gerada por elas mesmas, entre residências, comércios, indústrias e setor agrícola, o que pode resultar em 23.500 MW (48 TWh produzidos) de energia limpa e renovável, além de benefícios no que tange geração tem mais um ponto positivo, as questões relacionadas ao meio ambiente. Tudo isto pode evitar a emissão de 29 milhões de toneladas de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera (MME, 2015).

O Brasil possui um Banco de Informações de Geração (BIG) da ANEEL. Na sua última atualização, em 16 de junho de 2016 relatou-se um total de 4.526 empreendimentos em operação, totalizando 144.128.839 kW de potência instalada. Desse total, 39 são centrais

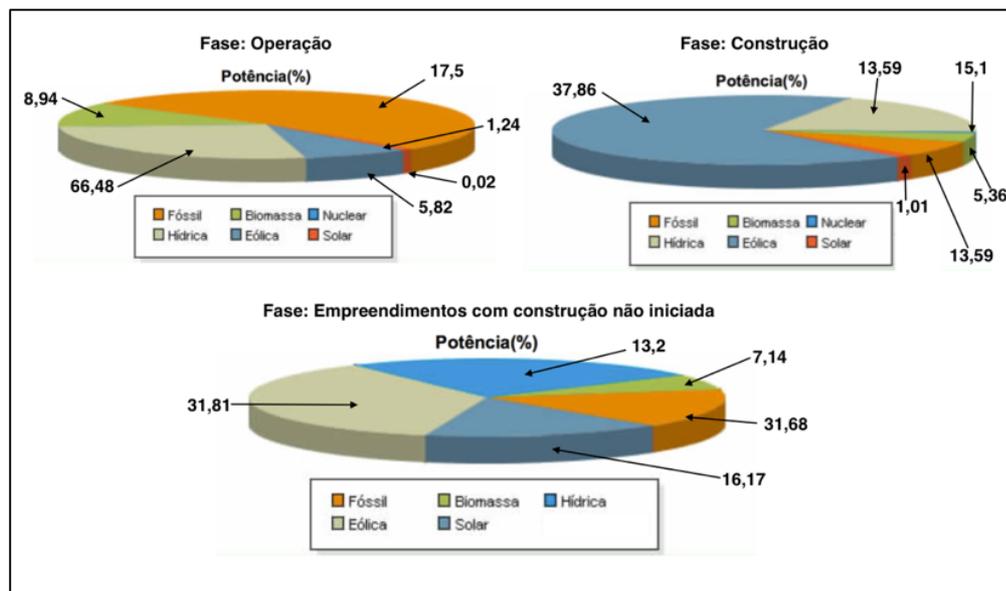
fotovoltaicas com 22.952 kW de potência instalada, isso é 0,02% da matriz energética brasileira (ANEEL, 2016). Na Tabela 2 estão os dados dos empreendimentos em fontes de energia no Brasil e na Figura 17 pode ser verificada, por meio de um gráfico em formato pizza, a proporção desses empreendimentos.

Tabela 2 - BIG - Banco de informações de geração ANEEL

Origem	Operação	Construção	Empreendimentos com construção não iniciada
Fóssil	17,5	13,59	31,68
Biomassa	8,64	5,36	7,14
Nuclear	1,24	15,1	0
Hídrica	66,48	27,09	13,2
Eólica	5,82	37,86	31,81
Solar	0,02	1,01	16,17

Fonte: Adaptação do banco de informações de geração da ANEEL (ANEEL, 2016)

Figura 17 - Gráficos dos dados do BIG



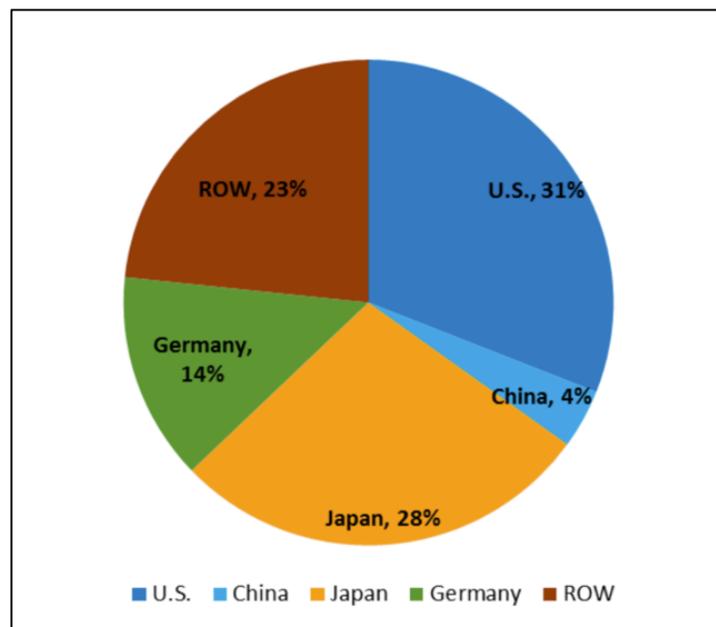
Fonte: Adaptação do banco de informações de geração da ANEEL (ANEEL, 2016)

3.4.1.2 Panorama internacional

A geração fotovoltaica, inicialmente, teve suas aplicações e estudos para área espacial, objetivando alimentar os satélites em órbitas ou geoestacionários. Atualmente a energia solar representou uma parcela pequena da energia gerada no mundo, mas a tecnologia PV para geração vem aumentando tanto por subsídios generosos, como, principalmente em países europeus, especialmente na Alemanha (PILLAI, 2015). Porém, quando a Europa começou a reduzir os incentivos, os países asiáticos começaram a liderar esse ranking, quanto a instalação e geração fotovoltaica.

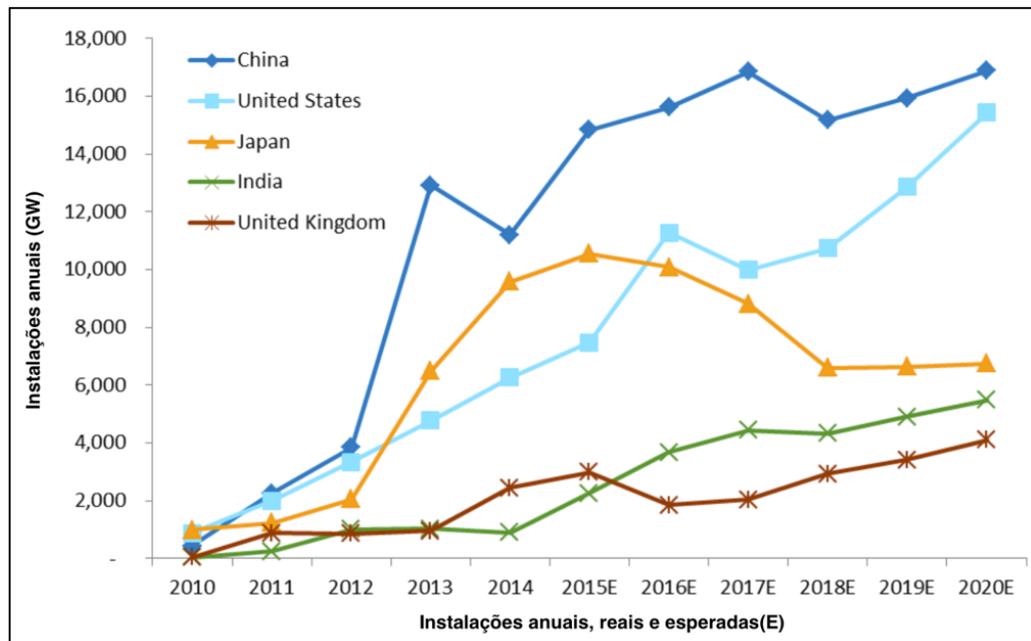
Desde 2006, até os meados de 2012, a Alemanha era a líder em energia fotovoltaica. Após 2013, a China começou a dominar, lembrando que os Estados Unidos e o Japão também tiveram grandes implementações, que podem ser conferidas a seguir. A Figura 18 mostra a porcentagem de pedidos de patentes totais em painéis fotovoltaicos no mundo no ano de 2000 até 2011 e a Figura 19 mostra um histórico das instalações anuais de usinas fotovoltaicas e uma possível expectativa até o ano de 2020. Os Chineses estão dominando a capacidade global de PV com as tecnologias com fabricação em Silício (Si) o que constituem mais de 90% da capacidade instalada anual global (ZHENG e M.CHENG, 2014).

Figura 18 - Número de pedidos de patentes



Fonte: Adaptação do (ZHENG e M.CHENG, 2014)

Figura 19 - Histórico de instalações anuais e instalações esperadas



Fonte: Adaptação James, Adam S. (JAMES, 2016)

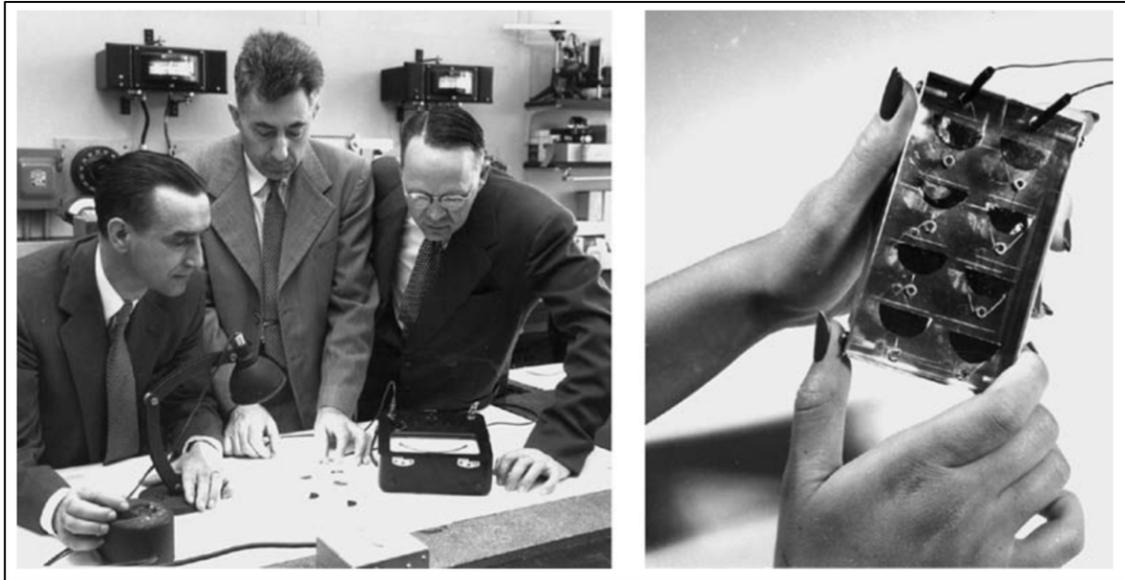
3.4.2 Efeito fotovoltaico

A conversão de energia PV em energia elétrica é baseada no princípio fotovoltaico, descoberto em células eletrolíticas, pelo então cientista da época, o francês Alexandre Edmond Becquerel em 1839. William Adams e Richard Day confirmaram a existência do mesmo efeito em sólidos (FATHPOUR, TSIA e JALALI, 2007).

Em 1950, um dos inventores do transistor, e ganhador do prêmio Nobel, o americano William B. Shockley, apresentou uma explicação para o funcionamento da junção *p-n*, tendo estabelecido as bases teóricas das células solares usadas hoje em dia. Com esta base, os pesquisadores Daryl Chapin, Calvin Fuller e Gerald Pearson, no Laboratório Bell, desenvolveram a primeira célula solar de Silício, com uma área de 2 cm² e uma eficiência de até 6%. Ela foi apresentada ao público no dia 25 de abril de 1954 onde logo foram encontradas aplicações para os programas espaciais dos Estados Unidos da América (EUA) (CHAPIN, FULLER e L., 1954). A Figura 20 mostra uma imagem real dos pesquisadores e do primeiro módulo solar do mundo, que na verdade, é um minimódulo com 8 células solares.

Como se vê, há mais de 50 anos realizam-se estudos para buscar o aumento da eficiência das células fotovoltaicas, e tem sido assim uma procura permanente. Algumas células atuais já chegam uma eficiência de 46% em laboratório.

Figura 20 - Inventores da primeira célula solar, Chapin, Fuller e Pearson com base para o primeiro módulo solar de 8 células solares



Fonte: Adaptação dos arquivos AT&T (AT&T ARCHIVES AND HISTORY CENTER, 2011).

A fotocondutividade é o fenômeno onde se obtém energia elétrica pela alteração de um material quando exposto a radiação eletromagnética. Os materiais semicondutores têm bandas de energia permitidas e proibidas no seu espectro eletrônico (o *gap* de energia). Internamente as duas faixas permitidas a banda de valência e a banda de condução, são separadas por uma diferença de energia (FARRET e SIMÕES, 2006). Esse material tem um espectro de absorção da luz para algumas faixas de comprimentos de ondas a partir da radiação solar. Por ter um desenvolvimento tecnológico sólido na indústria de microeletrônica, o Silício (Si) torna-se o material mais utilizado para fabricação de células fotovoltaicas.

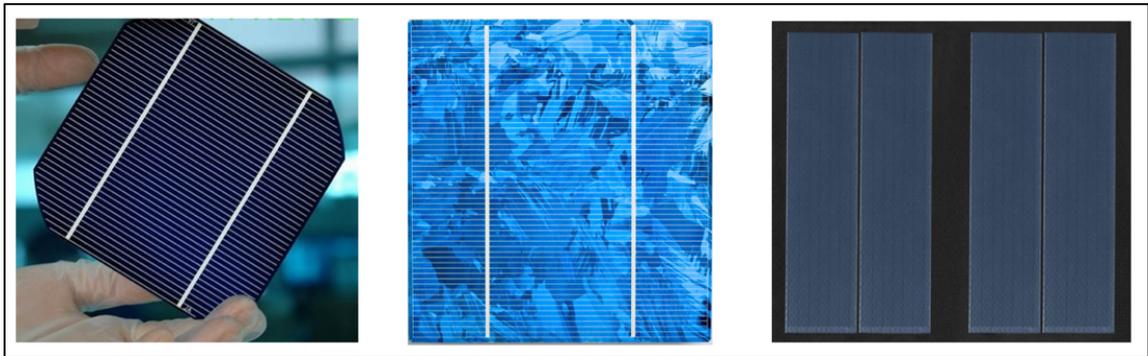
Nessa dissertação trata-se somente de células de Silício, uma vez que contemplam uma ocupação maior do mercado de painéis fotovoltaicos.

3.4.3 Células fotovoltaicas

As células solares possuem diversas características que são particularidades do material semicondutor utilizado na sua fabricação, da técnica empregada, e das propriedades geométricas e estruturais que interferem consideravelmente no funcionamento.

Na sua maioria, as células são fabricadas com materiais semicondutores baseados em junções *p-n*. A Figura 21 mostra três tipos de células fotovoltaicas, monocristalino, policristalino e amorfo, uma vez que os painéis baseados em Silício (Si) estão ocupando entre 85% e 90% no mercado (LENZ, 2015).

Figura 21 - Exemplos de células de Si



Fonte: Adaptação de Feksa (FEKSA, 2015)

As células fotovoltaicas são classificadas em gerações, de acordo com a tecnologia de fabricação. Cada conjunto apresenta características distintas. Suas eficiências por tipo de tecnologia podem ser verificadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Eficiência das células fotovoltaicas por tecnologia

Tecnologia	Eficiência típica de módulos comerciais	Eficiência dos melhores módulos (em laboratório)
Silício Cristalino		
Monocristalino	17 a 21,5 %	22,9 %
Policristalino	14 a 17 %	18,5 %
Filmes finos		
Silício amorfo	4 a 8 %	10,9 %
Telureto de Cádmio	10 a 16,3 %	18,2 %
Disseleneto de cobre-índio-gálio	12 a 14,7 %	17,5 %
Concentrador fotovoltaico	27 a 33 %	38,9 %

Fonte: Adaptação de Green, Emery, Hishikawa e Warta (GREEN, EMERY, *et al.*, 2011).

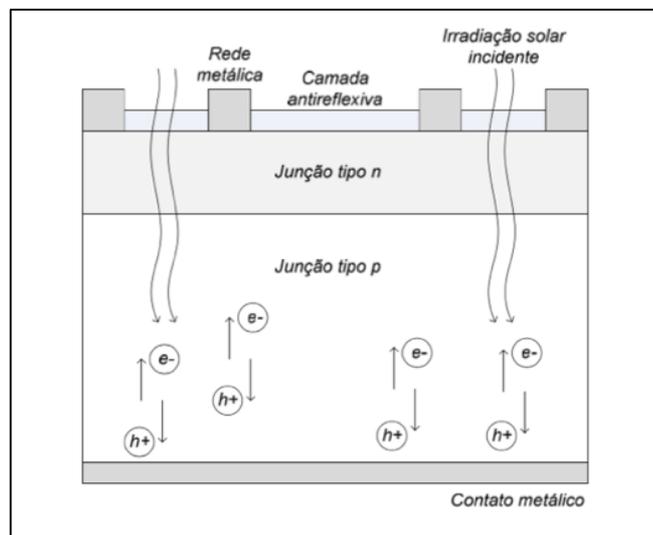
O Silício possui uma banda proibida a qual é a energia necessária para que o elétron transite de banda de valência para a banda de condução. Ao incidir radiação luminosa no material, os elétrons na banda de valência absorvem os fótons dessa radiação. Caso a energia dos fótons seja igual ou maior que a energia da banda proibida (ou *bandgap*), as ligações covalentes são rompidas, e o elétron livre vai para a banda de condução. Esse efeito possui um valor de acordo com relação de Planck-Einstein, dado pela Equação 2.

$$E = h \cdot \frac{c}{\lambda} \quad (2)$$

onde h é a constante de Planck $4,135 \times 10^{-15}$ eV.s, c é a velocidade da luz no vácuo ($2,998 \times 10^8$ m/s) e λ é o comprimento de onda do fóton em metros.

A Figura 22 representa o modelo simplificado de uma célula solar com uma junção p - n , um eletrodo que é uma rede metálica para a junção tipo n e outro eletrodo para a junção tipo p .

Figura 22 - Modelo simplificado de uma célula solar



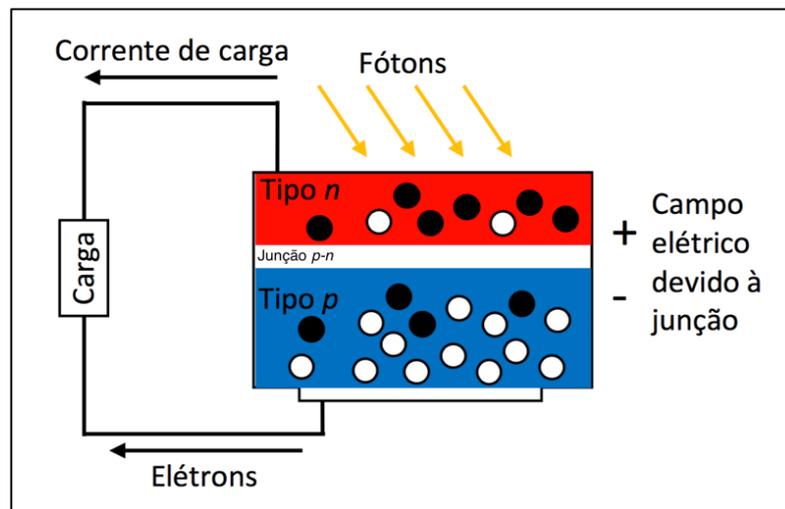
Fonte: Adaptação de Lewis Fraas e Larry Partain (FRAAS e PARTAIN, 2010).

Como expresso pela Equação 2, a banda proibida do Silício, ou seja, a energia necessária para que o elétron transite da banda de valência para a banda de condução, é de 1,12 eV. Pode-se então determinar esse valor para um fóton com comprimento de onda igual ou superior a

1,13 μm e se pode afirmar que a radiação eletromagnética nas frequências das faixas, visível, infravermelho e ultravioleta são suficientes para gerarem corrente elétrica em uma célula fotovoltaica monocristalina ou policristalina de Silício.

Os elétrons livres da camada n migram para as lacunas da camada p quando são excitadas pelos fótons, formando assim um campo elétrico na área de junção. Conectando as camadas externas por um fio surgirá um fluxo de corrente elétrica chamado de fotocorrente como pode ser verificado na Figura 23. A intensidade dessa corrente elétrica é proporcional à irradiância que incidir sobre a junção $p-n$.

Figura 23 - Representação da corrente de um PV



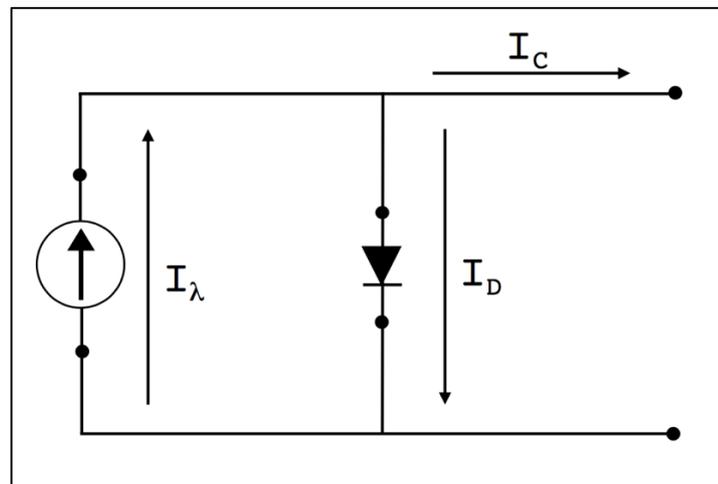
Fonte: Autor.

3.4.4 Modelo elétrico de uma célula fotovoltaica

O modelo equivalente de uma célula fotovoltaica é analisado como um diodo retificador com junção $p-n$ e uma fonte de corrente. Seu circuito pode ser visto na Figura 24, onde a fonte de corrente foto gerada é I_λ , I_D é a corrente que circula no diodo (no escuro) e I_C é a corrente que circula pela célula calculada como mostra a Equação 3 .

$$I_C = I_\lambda - I_D \quad (3)$$

Figura 24 - Circuito simplificado de uma célula fotovoltaica



Fonte: Adaptação de (FARRET e SIMÕES, 2006).

Pela equação de Shalimova (1975) a corrente I_D pode ser encontrada

$$I_D = I_S \left\{ \exp \left(\frac{eV}{\eta kT} \right) - 1 \right\} \quad (4)$$

onde

I_S = corrente de saturação reversa;

e = carga elétrica do elétron;

V = tensão nos terminais da célula;

η = fator de idealidade do diodo (valor entre 1 até 2);

k = constante de Boltzman ($1,3806 \times 10^{-23}$ J/K);

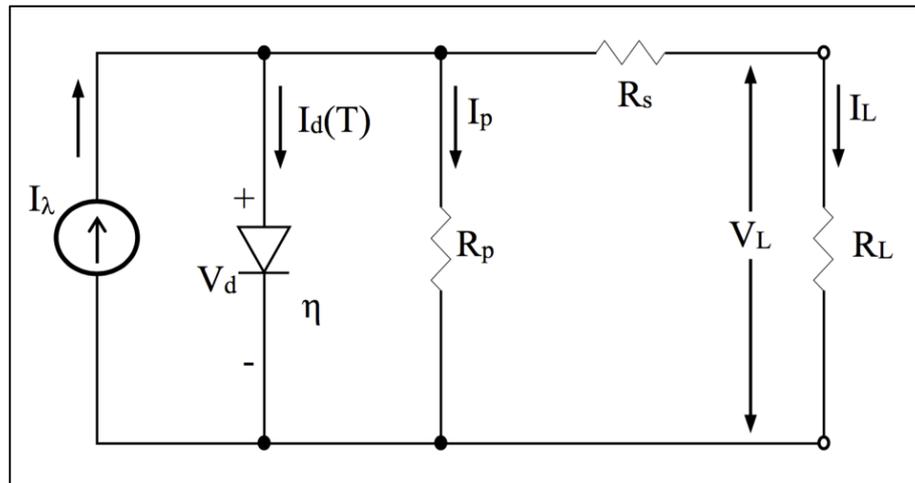
T = temperatura absoluta da célula.

A partir da Figura 24 e Equações 3 e 4, define-se situações da célula fotovoltaica em curto circuito onde ($V = 0$ V) e $I_\lambda = I_C$ e pela Equação 3, $I_D = 0$. Então a corrente de curto (I_{SC}) será a mesma corrente fotogerada ($I_{SC} = I_\lambda$). Na célula com circuito aberto a corrente I_C será nula então $I_C = 0$ e a tensão de circuito aberto V_{OC} , fará uma auto polarização na célula fazendo com que a corrente do diodo seja igual à fotogerada ($I_D = I_\lambda$).

As variáveis I_{SC} e V_{OC} são características da célula e são fornecidas pelo fabricante para certas condições impostas como nível de radiação e temperatura.

Num modelo mais completo da célula real ou de um módulo fotovoltaico, outros fatores são considerados (LINEYKIN, AVERBUKH e ALON, 2014), como mostra a Figura 25.

Figura 25 - Modelo equivalente da célula fotovoltaica com um diodo



Fonte: Adaptação de (FARRET e SIMÕES, 2006).

onde os símbolos e os parâmetros do modelo equivalente do painel fotovoltaico são:

I_λ = corrente fotogerada;

V_D = tensão na junção $p-n$;

I_D = corrente na junção $p-n$;

η = constante de idealidade do diodo;

R_p = resistência paralela;

R_s = resistência série;

V_L e I_L = tensão e corrente de saída da célula, respectivamente;

R_L = carga.

Na célula PV real tem-se apenas acesso a tensão e a corrente de saída. A partir destes valores obtém-se os demais parâmetros através de análise das malhas do circuito usando as leis de Kirchoff. A corrente de saída pode ser descrita pela Equação 5.

$$I_L = I_\lambda - I_D - I_P \quad (5)$$

A Equação 5 pode ser ainda reescrita como mostra a Equação 6, levando em conta a equação de Shockley para o diodo, onde I_S é a corrente reversa do diodo, V_T é a tensão térmica do semiconductor. A tensão térmica é verificada pela Equação 7, e depende da temperatura absoluta da operação.

$$I_L = I_\lambda - I_S \left(e^{\frac{V_D}{\eta \cdot V_T}} - 1 \right) - \frac{V_P}{R_P} \quad (6)$$

$$V_T = \frac{k \cdot T}{q} \quad (7)$$

onde q é a magnitude da carga do elétron igual a $1,6022 \times 10^{-19}$ C, k é a constante de Boltzmann igual a $1,3806 \times 10^{-23}$ J/K, e T a temperatura em Kelvin.

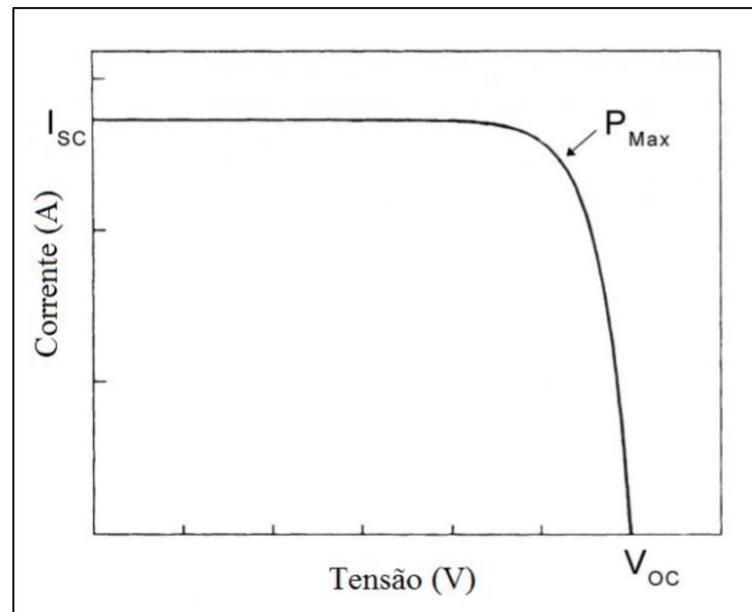
Três pontos distintos de operação podem ser usados para representar os diversos parâmetros: ponto de curto-circuito (SC), ponto de máxima potência (nominal) e o ponto de circuito aberto (OC). A Tabela 4 mostra o resumo do modelo de um diodo para cada ponto de operação.

Tabela 4 - Cargas do PV em pontos distintos de operação

Condição	Carga	Tensão na carga	Corrente na carga
Curto - Circuito	$R_L = 0$	$V_L = 0$	$I_L = I_{SC}$
Nominal	R_L	$V_L = I_L R_L$	I_L
Circuito Aberto	$R_L = \infty$	$V_L = V_{OC}$	$I_L = 0$

Fonte: Adaptação de (FARRET e SIMÕES, 2006).

Considerando o circuito equivalente apresentado, pode-se traçar as curvas características do PV. A Figura 26 ilustra uma curva genérica do comportamento da corrente de saída do painel (I_L) em função da tensão fornecida pelo painel (V_L).

Figura 26 - Curva $I \times V$ característica de uma célula fotovoltaica genérica

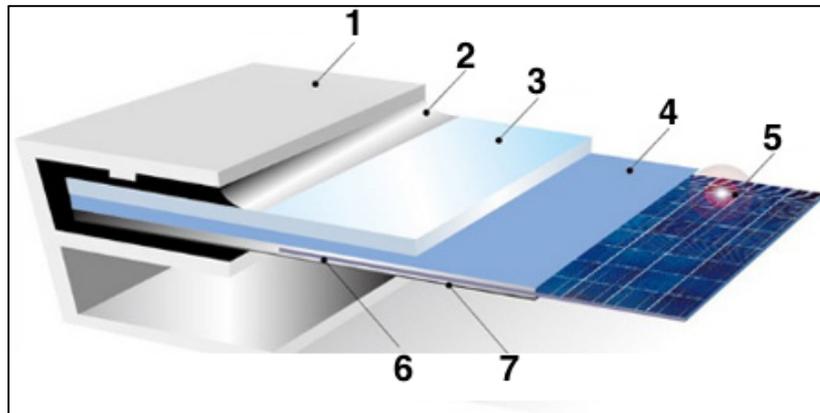
Fonte: Adaptação de (LENZ, 2015).

3.5 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

O principal elemento para a geração fotovoltaica é a célula fotovoltaica demonstrada anteriormente. Todavia, o aproveitamento em escala comercial desse tipo de energia, tem o auxílio de outros componentes. A Figura 27 a seguir ilustra o encapsulamento de um módulo, o qual proporciona proteção contra os efeitos climáticos, e suporte para conexão física entre módulos para que possa ser feito em arranjos PV.

O número de células conectadas num módulo depende da tensão de utilização e da corrente elétrica desejadas. É necessário o agrupamento de células em um módulo fotovoltaico, pois uma célula fornece pouca energia elétrica, uma tensão que gira em torno de 0,4 volts no ponto de máxima potência e uma densidade de corrente na ordem de 30 mA/cm^2 (PINHO e GALDINO, 2014).

Figura 27 - Camadas de um módulo



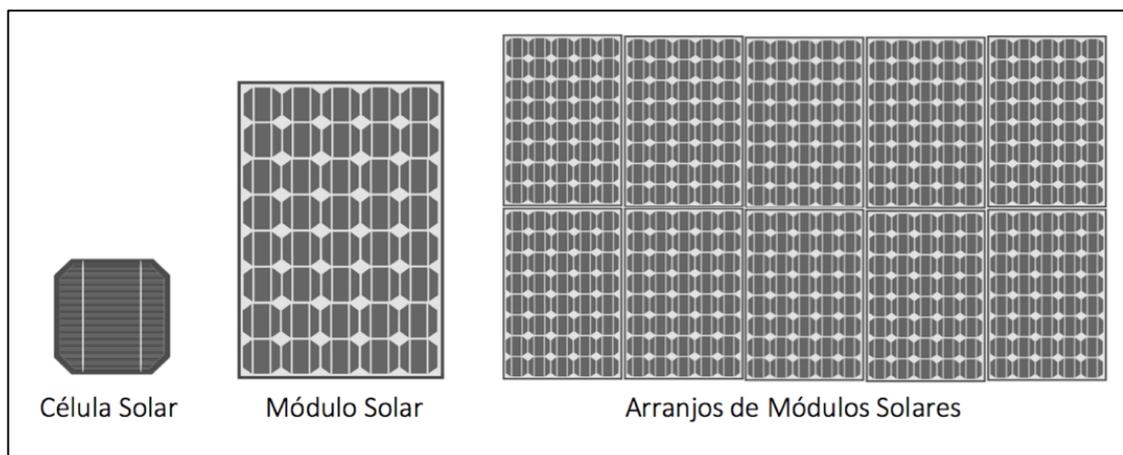
Fonte: Adaptação (RITEK).

Os números na Figura 27 referem-se as camadas características de um módulo fotovoltaico e definem:

- 1) Moldura - parte mais externa estruturante do módulo, geralmente de alumínio onde é feita a fixação do módulo nas estruturas.
- 2) Selante - composto adesivo, tem a função de unir as camadas internas do módulo com a moldura, impedindo também a possível entrada de humidade e partículas de poeira.
- 3) Vidro - camada externa que protege as células, ao mesmo tempo que permite a passagem de luz para que a mesma possa ser convertida em energia elétrica. O vidro em especial é composto por baixo teor de ferro, com uma camada antirreflexo com a superfície texturizada que evita a reflexão da luz a partir do vidro.
- 4) Encapsulação - é um filme que envolve as células, protegendo-as da umidade e dos materiais externos, além de otimizar a condução elétrica. O material para encapsular mais utilizado é o EVA (Etil Vinil Acetato), que é uma resina termoplástica derivada do petróleo.
- 5) Células Fotovoltaicas - componente eletrônico que é responsável pela conversão direta da energia eletromagnética em energia elétrica.
- 6) Encapsulação - é o mesmo material que se encontra no item 4 da ilustração
- 7) Backsheet - parte anterior do módulo que previne a entrada de umidade e protege as células de elementos externos. Também, oferece isolamento elétrico adicional. O Tedlar® é o material de base mais utilizado para confecção do *backsheet*.

Uma única célula gera pouca corrente bem como uma tensão baixa, por isso são instaladas em módulos fotovoltaicos. Os níveis de tensão e corrente são adequados a carga através de associações paralelas e séries até atingir uma potência adequada. Posteriormente são feitos arranjos com outros módulos para que se tenha maior potência de geração. A ilustração da Figura 28 abaixo mostra essa distinção.

Figura 28 - Célula, módulo e arranjos



Fonte: Autor.

Os arranjos dos módulos solares são feitos de células em série e paralelo para que se chegar na tensão e corrente desejadas do inversor. A geração é feita em corrente contínua (CC) e, portanto, é necessário um inversor para transformar em corrente alternada (CA) para uso em equipamentos residenciais. Pode ser ligado em modelos *off-grid* que são modelos isolados que requerem um inversor e um controlador de carga.

3.6 LOCALIZAÇÃO DOS PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

Um dos cuidados necessários na hora da instalação de um gerador fotovoltaico é evitar o sombreamento dos painéis, sempre priorizando as áreas abertas para os módulos fotovoltaicos, visando com isto a menor presença de obstáculos como mostrado na Equação 8 (PINHO e BARRETO, 2008).

$$d = Fe(h_{ob} - h_i) \quad (8)$$

onde

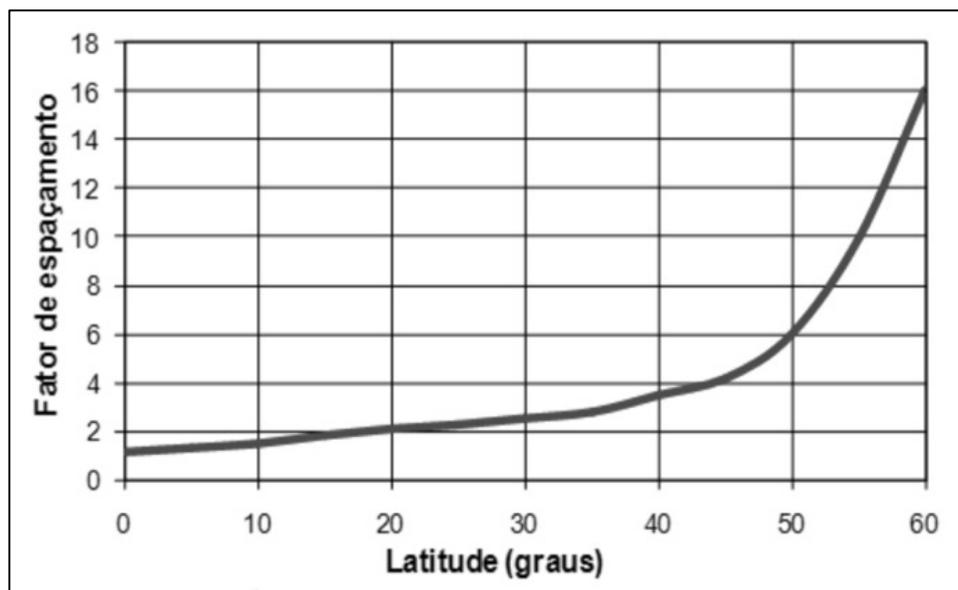
d = distância mínima entre o gerador fotovoltaico e o obstáculo (m);

F_e = fator de espaçamento obtido pela curva da Figura 29;

h_{ob} = altura do obstáculo (m);

h_i = altura de instalação do gerador fotovoltaico (m).

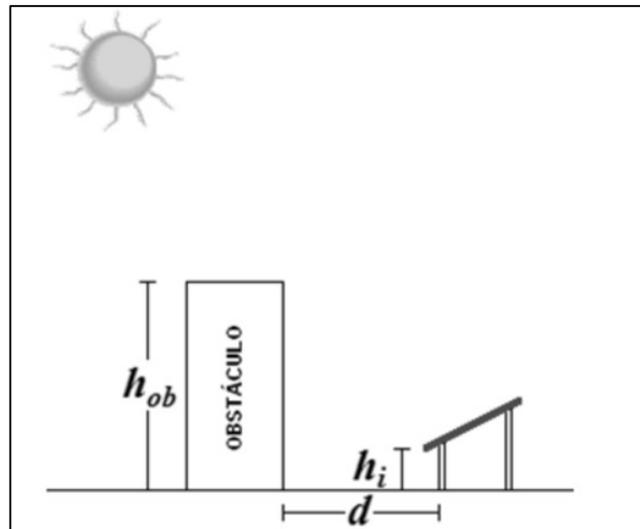
Figura 29 - Fator de espaçamento



Fonte: Adaptação de (PINHO e BARRETO, 2008).

O método apresentado por Pinho (2008) garante que não haverá sombra sobre o gerador durante o inverno, quando os dias são mais curtos. Dia 21 de junho no hemisfério Sul é a data mais crítica. A seguir na Figura 30 ilustra para definição do espaçamento mínimo entre os painéis fotovoltaicos e os obstáculos, assim evitando o sombreamento.

Figura 30 - Ilustração do espaçamento mínimo



Fonte: Adaptação de (PINHO e BARRETO, 2008).

3.6.1 Inclinação e orientação dos painéis fotovoltaicos

Como já conhecido na literatura para que se tenha a máxima captação de energia ao longo dos anos, duas condições precisam ser observadas: a inclinação e a orientação.

3.6.1.1 Inclinação

O ângulo inclinação que maximiza a geração de potência ao longo de um ano deve estar dentro de 10° em torno da latitude do local. Para tal lembra-se, que a latitude é a linha imaginária do Equador e tem como representação o 0° . Referidas a ela, existem as latitudes ao Norte (N) e ao Sul (S), que são linhas de 15° em 15° até 90° do equador.

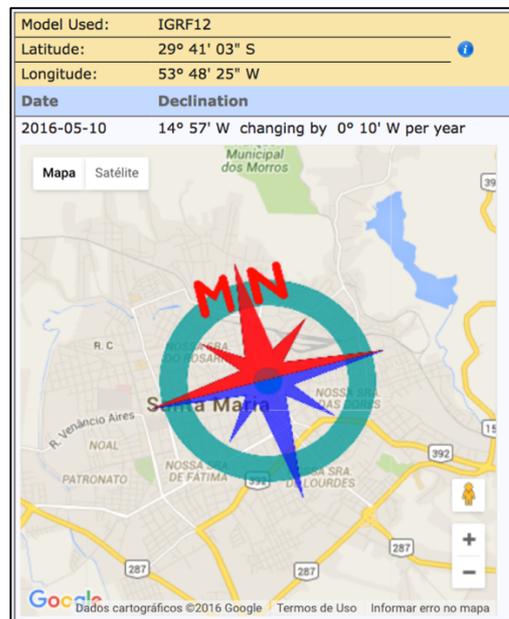
A instalação de um painel fixo na cidade de Santa Maria no Rio Grande do Sul, por exemplo, está localizada em uma latitude de $29^\circ 41' 03''$ S. Nesta região, pode-se colocar os painéis dispostos entre 19° a 39° , sem uma redução significativa no desempenho anual do gerador (PINHO e GALDINO, 2014). Essa inclinação também favorece a autolimpeza dos painéis fotovoltaicos pela ação da água da chuva.

Os sistemas de rastreamento manuais ou automáticos melhoram o desempenho, porém tem que se levar em conta que normalmente são mais caros e mais complexos na instalação e manutenção.

3.6.1.2 Orientação

Nas instalações localizadas no hemisfério Sul, que é o caso de Santa Maria no Rio Grande do Sul, as faces dos painéis fotovoltaicos devem estar orientadas para direção ao Norte Verdadeiro, que geralmente quase coincide com o Norte Magnético indicado na bússola. Pode-se fazer uma correção do referencial magnético em programas computacionais disponíveis em diversos sites para consulta online. No Brasil tem-se o Observatório Nacional (ON), que está vinculado ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) (NETO e MOREIRA, 2015) que disponibiliza essa correção. Em nível internacional a correção está disponibilizada na *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), mostrando a declinação magnética para qualquer localidade do mundo (NCEI, 2016). Na Figura 31 verifica-se que a cidade de Santa Maria - RS tem uma declinação magnética de aproximadamente 15° ao Oeste em relação ao Norte magnético.

Figura 31 - Declinação magnética de Santa Maria



Fonte: Adaptação do site NCEI-NOAA (NCEI, 2016).

Posteriormente na instalação do protótipo, foi necessária uma correção do Norte verdadeiro em relação ao referencial magnético da bússola, de aproximadamente 15° no ângulo do norte magnético.

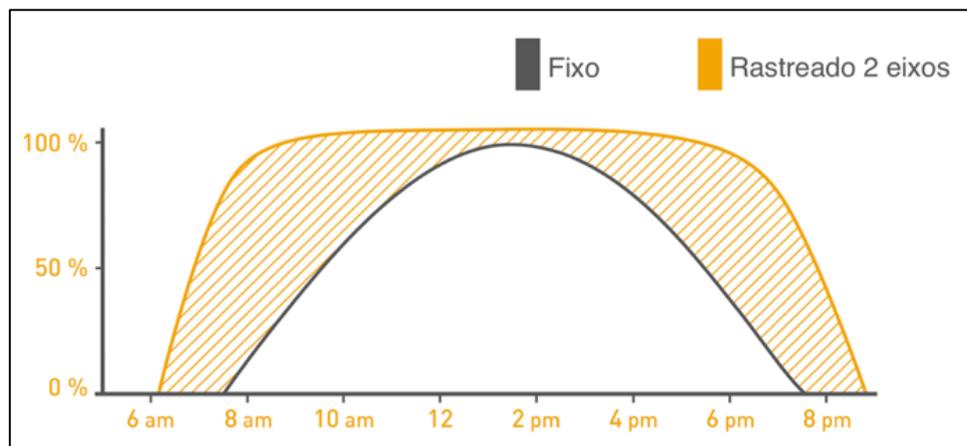
3.7 RASTREADOR SOLAR

Uma maneira simples de se maximizar a irradiação solar sobre os painéis fotovoltaicos é a utilização de rastreadores solares. Tais mecanismos são utilizados para aumento da irradiação e, portanto, do rendimento dos painéis fotovoltaicos pela maior exposição ao Sol, mantendo os raios solares perpendiculares a superfície dos painéis. Os rastreadores podem ser de um eixo ou de dois eixos.

O rastreamento solar pode ser obtido através de sensores ópticos com sistemas eletrônicos e por cálculos de posicionamento, onde são considerados diversos parâmetros como latitude, longitude, ângulo horário, etc. Da mesma forma sensores ópticos são empregados na transformação térmica, conversão fotovoltaica, concentradores de energia ou em aparelhos de medição (radiômetros).

Verifica-se facilmente na Figura 32 que o rendimento de um painel rastreado é maior que um painel fixo. Foi verificado que estes ganhos variam entre 19,1% e 30,2% (FATHABADI, 2016).

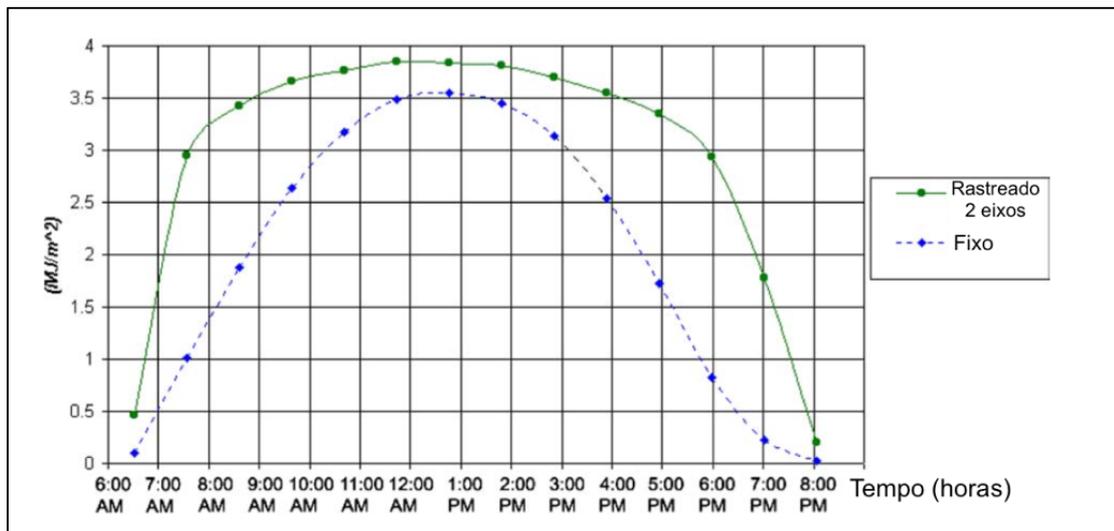
Figura 32 - Comparação de rendimento de um painel fixo e com seguidor solar de dois eixos



Fonte: Adaptação (DEGER).

Na Figura 33 apresenta-se um gráfico que compara a geração de energia de um sistema fixo real com um sistema de dois eixos (ABDALLAH e NIJMEH, 2003).

Figura 33 - Gráfico da comparação entre um sistema fixo e um sistema dois eixos



Fonte: Adaptação de (ABDALLAH e NIJMEH, 2003).

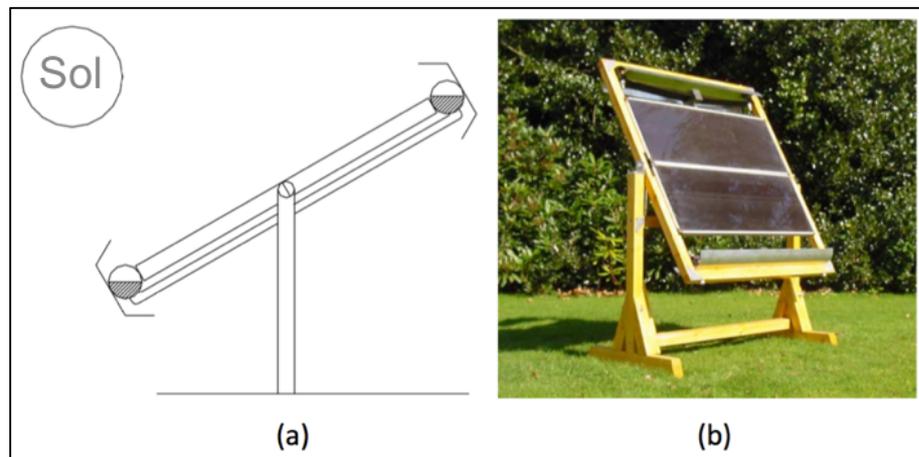
Os rastreadores solares possuem diversas aplicações tendo a energia solar como fonte primária. São utilizados muitas vezes para produção de energia solar térmica. Nos últimos anos tem-se aperfeiçoado e reduzido os custos para instalação de rastreadores solares e o curso natural é que aumente sua utilização para geração de energia fotovoltaica. Existem muitos modelos de rastreadores solares, variando os custos, complexidades e funções, com diversos níveis de precisão. Tais modelos podem ser classificados em sistemas ativos ou passivos. Serão descritos os principais modelos de rastreadores ativos e passivos utilizados mundialmente.

3.7.1 Rastreadores Passivos

Os rastreadores passivos são os que não utilizam qualquer tipo de fonte de energia elétrica para que ocorra a movimentação do painel. Esse modelo de rastreador solar é baseado na expansão térmica de um líquido do tipo Freon (ALEXANDRU e C., 2008). O funcionamento é através de constantes variações de temperatura no fluido, ou seja, se houver aumento da temperatura o volume do gás também irá aumentar, e transformar esse ganho em força mecânica para movimentar os painéis fotovoltaicos, dessa apontando-os para o Sol.

A Figura 34 apresenta-se um exemplo de um seguidor solar passivo, (a) o projeto e (b) protótipo já montado.

Figura 34 - Rastreador solar passivo



Fonte: Adaptação de (CLIFFORD e EASTWOOD, 2004).

Um dos grandes problemas que ocorrem no modelo de rastreador da Figura 34 é o fato de se ter uma baixa precisão e só ser aplicado em locais de instalação que sofram variações térmicas o suficiente para provocar a expansão do gás. A grande vantagem do rastreador passivo é o fato de não possuírem motores elétricos ou hidráulicos e serem muito simples de aplicar em painéis fotovoltaicos.

3.7.2 Rastreadores Ativos

Os rastreadores ativos utilizam sistemas de movimentação com energia elétrica. O controle pode ser feito com sensor de luminosidade ou algoritmos que indiquem a posição atual do Sol para ativar um sistema que comanda motores elétricos com atuadores lineares.

Existem vários tipos de estruturas para rastreadores solares ativos. Entre elas estão o rastreador polar de eixo único, o de eixo horizontal, o de eixo vertical ou Azimute, o rastreador solar de dois eixos e por fim, não menos importante, o rastreador com plataforma rotativa de dois eixos que é o utilizado para construção do protótipo desta dissertação.

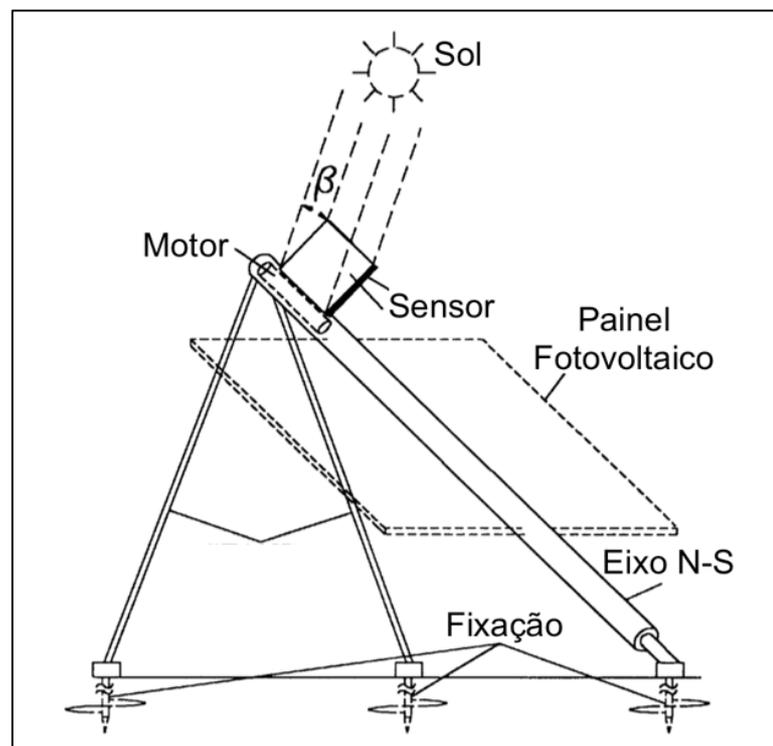
3.7.2.1 Rastreador polar de eixo único

A concepção do rastreador polar de eixo único é mostrada na Figura 35. Ela usa um eixo central Norte (N) - Sul (S) fixo em um ângulo e paralelo ao eixo terrestre, normalmente a

latitude do local. O eixo permanecerá perpendicularmente à movimentação do Sol, ou seja, fazendo o rastreamento do Sol da nascente para o poente variando o seu ângulo de rotação.

A montagem do rastreador polar de eixo único é simples e bastante eficiente, utilizando apenas um atuador elétrico que em muitas montagens, é alimentado externamente, aumentando assim a eficiência da geração como um todo. (POULEK e LIBRA, 1998).

Figura 35 - Rastreador polar de eixo único



Fonte: Adaptação de (POULEK e LIBRA, 1998).

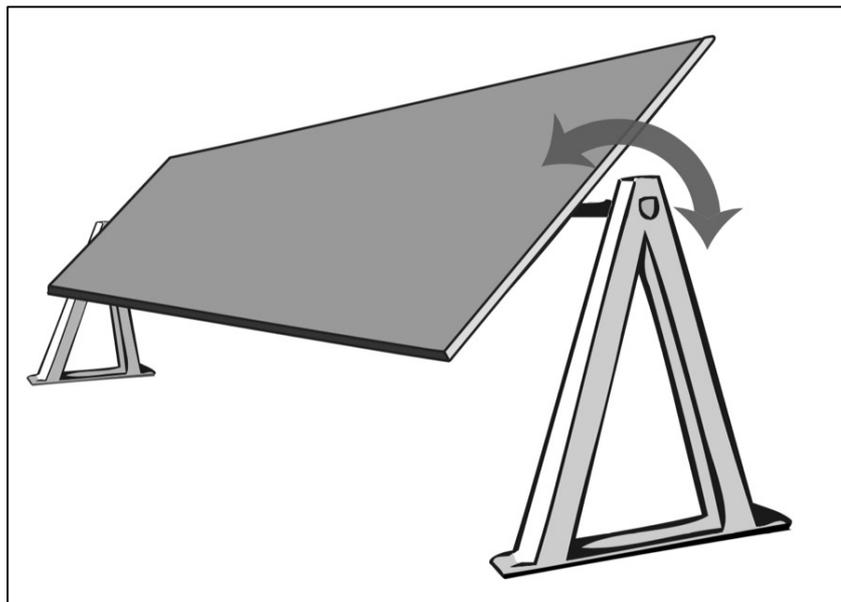
3.7.2.2 Rastreador de eixo horizontal ou zênite

O rastreador de eixo horizontal ou zênite está representado na Figura 36. Ele tem seu eixo de rotação colocado paralelamente a superfície da Terra, de modo que a movimentação aconteça de Leste (L) para Oeste (O). Esse modelo é conhecido por rastreadores de zênite pelo fato da rotação do painel ser semelhante ao do ângulo de zênite. A sua grande vantagem é a possibilidade de colocar vários painéis fotovoltaicos sobre o eixo de rotação, aproveitando toda a área de radiação exposta.

No modelo que utiliza concentradores de energia radiante com espelhos cilíndrico-parabólicos, o ponto focal tem geralmente um tubo no qual um fluido é aquecido. Posteriormente este fluido é usado em aplicações térmicas, mas também pode ser utilizado em sistemas fotovoltaicos.

O rastreador de eixo horizontal ou zênite não tem uma eficiência muito grande como os outros rastreadores, mesmo assim é uma opção a se considerar quando o objetivo é rastreamento solar para aumentar a eficiência total do sistema. Outro ponto positivo é por ser automático, porém não necessariamente precisa ter atuadores lineares, podendo até funcionar por uma série de posições fixas, determinadas antes da instalação.

Figura 36 - Rastreador de eixo horizontal



Fonte: Adaptação de (DUERR, MEURET e HUGO, 2013).

3.7.2.3 Rastreador com eixo vertical ou de azimute

No rastreador com eixo vertical ou de azimute, o painel roda sobre uma base fixa, ou seja, vai apenas provocar uma variação azimutal durante o dia. É possível afirmar que têm um ganho de 4% em relação ao rastreador polar de eixo único e 7% a menos da radiação se comparado com rastreador de dois eixos (GIL, MARTÍN, *et al.*, 2009). As aplicações destes seguidores verticais são parecidas aos dos seguidores polares, entretanto com estruturas

diferentes. As montagens mecânica e elétrica são simples e têm um bom desempenho em estações do ano quando os dias são longos. O ajuste da inclinação do conjunto de painéis é feito manualmente conforme a estação. A vantagem deste modelo é ser muito robusto e de fácil implementação. Em muitos casos esta vantagem compensa a menor radiação recebida pelos painéis fotovoltaicos, motivo pelo qual este tipo de seguidor está sendo cada vez mais utilizado.

3.7.2.4 *Rastreador de dois eixos*

O rastreador em dois eixos mostrado na Figura 37 permite movimentação azimutal que é o eixo vertical e o de inclinação ou zênite que é o eixo horizontal para proporcionar um grande rendimento de captação da radiação solar. Geralmente é utilizado na conversão direta de energia.

A desvantagem do rastreador em dois eixos é o esforço ao qual estão sujeitos, principalmente devido ao seu peso e ao fato de que têm que ser bloqueados sempre que se registrar muito vento. Devido as suas duas direções de movimentação, ele naturalmente é mais complexo, tornando-o o mais suscetível aos custos de aquisição e de manutenção, podendo também ficar inoperante durante a manutenção.

Figura 37 - Rastreador em dois eixos



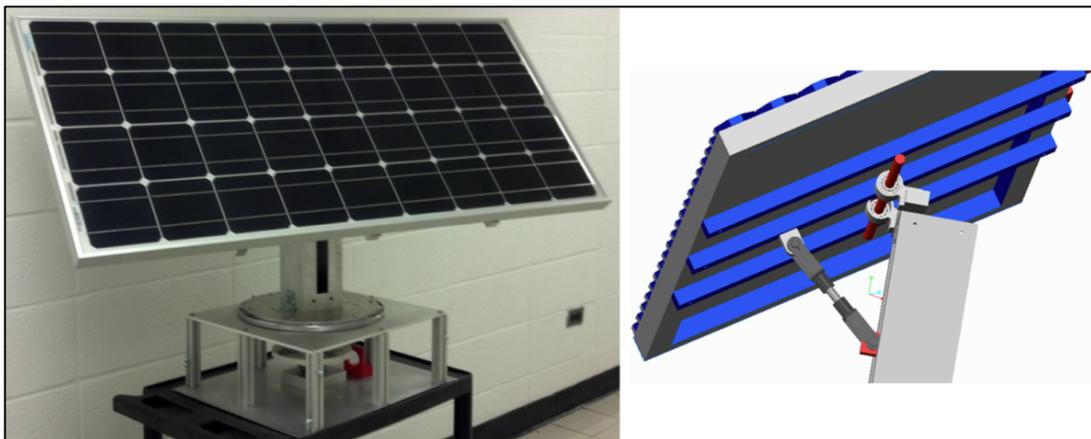
Fonte: Adaptação de (ENERGY, 2016).

3.7.2.5 Rastreador com plataforma rotativa de dois eixos

O rastreador com plataforma rotativa de dois eixos é muito semelhante ao rastreador em dois eixos, porém é dotado de uma plataforma que executa o movimento rotativo para movimentação L - O. Sobre essa plataforma vão estar os painéis que por sua vez estarão em fileiras sobre um eixo horizontal para o seguimento N - S. É um seguidor robusto, pois pode coordenar um número elevado de painéis simultaneamente.

O rastreador com plataforma rotativa de dois eixos tem sua estrutura metálica montada com uma série de apoios fixos ao solo para que possa dar suporte à roda responsável pelo movimento da base. Na ilustração da Figura 38 é apresentado o rastreador, que foi utilizado como referência ao do protótipo construído para esta dissertação.

Figura 38 - Rastreador em dois eixos com plataforma giratória



Fonte: Adaptação de (BECERRA, 2016)

3.8 POSICIONAMENTO SOLAR DOS PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

A maioria das aplicações de rastreadores solares usa o posicionamento do conjunto de conversão de energia baseado em sensores óticos como fototransistor, fotodiodo, LDR e células fotovoltaicas. Porém, essa dissertação usa um Algoritmo de Posicionamento Solar (SPA) cujo objetivo é posicionar via software os painéis fotovoltaicos para o Sol, maximizando a potência de uma unidade com rastreamento, sem a necessidade de equipamentos como os demais métodos exigem.

3.8.1 Algoritmo de posicionamento solar

Como descrito por Grena (2008), os algoritmos da literatura podem ser classificados em dois tipos. Os do primeiro grupo utilizam expressões algébricas mais simples, e os do segundo grupo contêm algoritmos mais complexos que dão a localização precisa (latitude e longitude do local) e o horário imediato de observação. Este algoritmo calcula as coordenadas locais para a qual o painel deve estar apontado para melhor aproveitamento da captação de radiação solar conhecido como *Solar Position Algorithm* (SPA), descrito minuciosamente por Reda e Andreas (REDA e ANDREAS, 2004).

Como existem inúmeros artigos descrevendo fórmulas e maneiras diversas para calcular e desenvolver os algoritmos de posição solar para aplicação fotovoltaica, apresenta-se aqui os equacionamentos utilizados por Soteris A. Kalogirou (KALOGIROU, 2014) e por A. K. Suria e R. Mohamad (A.K.SURIA e IDRIS, 2015). Baseado nestes equacionamentos, foram feitos o desenvolvimento e a validação do algoritmo no software MatlabR2016a® (MATHWORKS).

3.8.1.1 Escala de tempo

As escalas reconhecidas internacionalmente são as demonstradas a seguir:

- ✓ *Universal Time (UT)* - é um padrão de tempo com base na rotação da Terra. É uma continuação moderna do *Greenwich Mean Time* (GMT), ou seja, o tempo solar médio no meridiano de Greenwich, é contado a partir do zero hora à meia-noite; a unidade é o dia solar médio. *UT* é o tempo utilizado para calcular a posição solar no algoritmo descrito.
- ✓ *The International Atomic Time (TAI)* - é a duração do segundo sistema internacional (SI-segundo) com base em um grande número de relógios atômicos.
- ✓ *The Coordinated Universal Time (UTC)* - é a base da maioria dos sinais de tempo de rádio e os sistemas legais de tempo. Tempo Universal Coordenado (UTC) é a base para civil de tempo hoje, o padrão de tempo de 24 horas é mantido usando relógios atômicos de alta precisão combinada com a rotação da Terra.
- ✓ *The Terrestrial Dynamical or Terrestrial Time (TDT ou TT)* - é a escala de tempo de calendário para observações da superfície da Terra.

A seguir são apresentadas as equações que descrevem os relacionamentos entre as escalas de tempo acima (em segundos):

$$TT = TAI + 32.184 \quad (9)$$

$$UT = TT - \Delta T \quad (10)$$

onde ΔT é a diferença entre o tempo de rotação da Terra e o Tempo Terrestre (TT).

$$UT = UT1 = UTC \quad (11)$$

3.8.1.2 Equação do tempo

Devido aos fatores associados à órbita da Terra em torno do Sol, a velocidade orbital da Terra varia ao longo do ano e a equação do tempo (ET) descrita a seguir corrige a excentricidade da órbita da Terra e a inclinação do eixo. Ao longo de todo o ano, o comprimento médio de um dia é de 24 horas. Assim os valores da ET podem ser obtidos aproximadamente a partir das seguintes equações:

$$ET = 9.87 \text{sen}(2B) - 7.53 \text{cos}(B) - 1.5(B) \text{ [min]} \quad (12)$$

$$B = (Nd - 81) \frac{360}{365} \quad (13)$$

onde

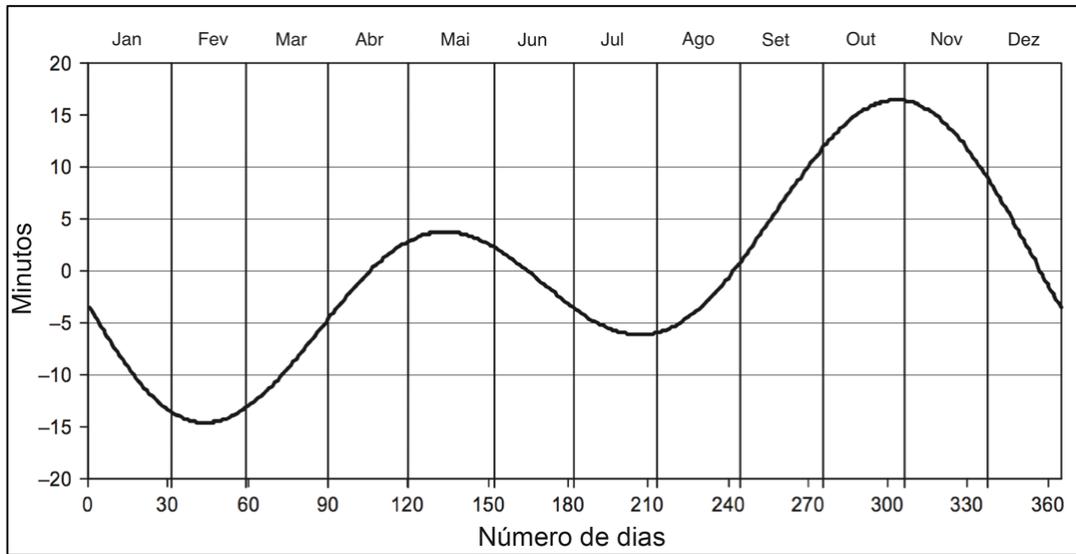
ET = Equação do tempo (graus);

B = em graus (graus);

Nd = o número de dias desde o início do ano (dias).

Pode-se verificar na representação gráfica plotada na Figura 39 uma variação anual de 30 minutos e, nos pontos mais críticos, esta variação é de 15 minutos. O ajuste nos cálculos se faz necessário para obter o posicionamento com a precisão mais aceitável.

Figura 39 - Equação do tempo



Fonte: Adaptação de (KALOGIROU, 2014).

3.8.1.3 Correção longitudinal

O tempo que conhecemos como do relógio padrão é contado a partir de um meridiano selecionado perto do centro de uma zona de tempo, ou a partir do meridiano padrão de Greenwich localizado na longitude de 0°. Apenas o relógio de Sol mede a hora verdadeira local, por isso a importância que se faça a correção de longitude através da Equação 14.

$$TC = 4(Longitude - LSTM) + ET \quad (14)$$

onde

TC = Fator de correção do tempo;

$LSTM$ = A longitude do meridiano padrão para o local;

ET = Equação do tempo (graus).

3.8.1.4 Ângulos solares

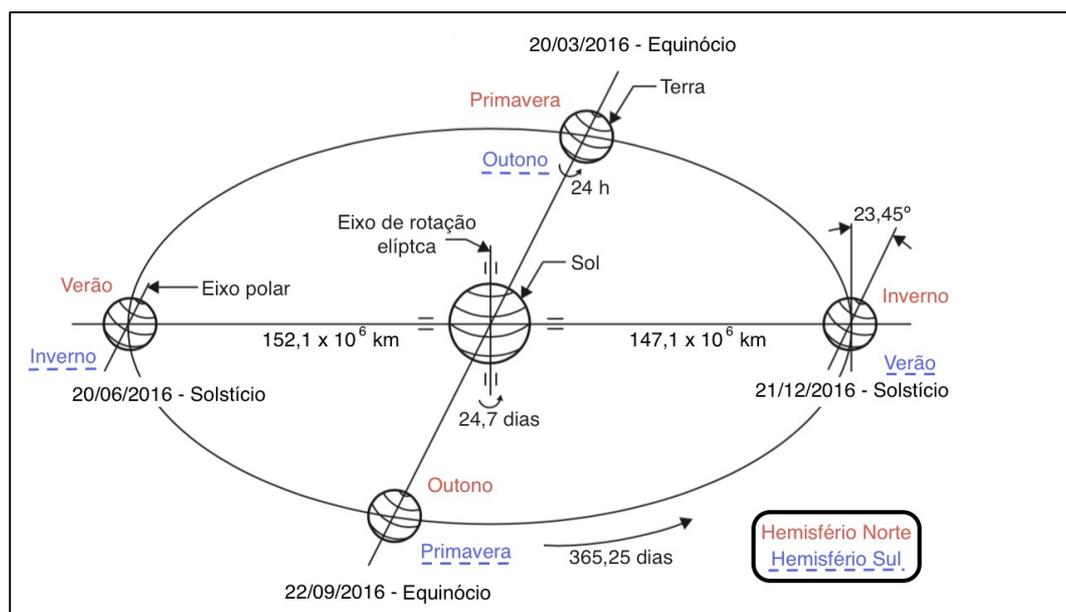
A Terra faz uma rotação completa em torno do seu próprio eixo a cada 24 horas, e uma revolução em torno do Sol de aproximadamente 365,25 dias. Esta revolução não é circular,

resultando de uma elipse com o Sol, como mostrado na Figura 40. A excentricidade da órbita da Terra é muito pequena, portanto, a órbita da Terra em torno do Sol é quase circular.

É notório que a inclinação do eixo de rotação da Terra apresentada na Figura 40, aliada ao seu movimento de translação, interfere na quantidade da incidência dos raios solares recebidos na superfície terrestre. Essa inclinação do eixo de rotação e a posição da Terra em relação ao Sol proporcionam incidências diferentes de raios solares nos hemisférios Norte e Sul. Em determinado momento, um hemisfério estará mais voltado para Sol e seis meses depois será o outro hemisfério.

Essas posições são chamadas de Solstício (do latim solstitiu, Sol parado) e esse movimento aparente do Sol no horizonte é o limite máximo alcançado por ele, seja mais ao Norte ou ao Sul. Os equinócios (do latim aequinoctiu, noites iguais), ou seja, acontecem quando os dois hemisférios se posicionam igualmente em relação ao Sol e recebem a mesma quantidade de luz, fazendo com que o dia e a noite tenham a mesma duração. Os equinócios acontecem dia 20 de março às 04 horas e 30 minutos e dia 22 de setembro às 14 horas e 21 minutos, e os solstícios acontecem dia 20 de junho às 22 horas e 34 minutos e dia 21 de dezembro às 10 horas e 44 minutos (OLIVEIRA e SARAIVA, 2013). Os dias e horas exatas em que acontecem esses fenômenos no ano de 2016 foram fornecidos pelo Departamento de Astronomia do Instituto de Física da UFRGS.

Figura 40 - Movimento da terra ao redor do Sol



Fonte: Adaptação de (KALOGIROU, 2014).

As distâncias Terra-Sol, R , no periélio (menor distância, em 3 de janeiro) e no afélio (distância mais longa, 4 de Julho) foram obtidas por Garg (GARG, 1982).

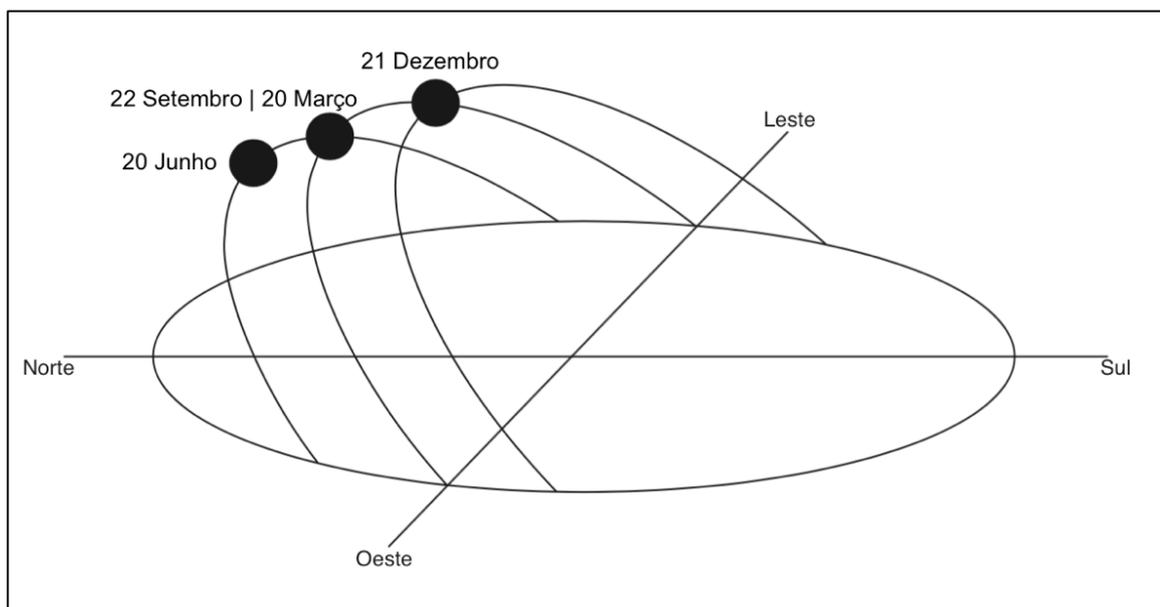
$$R = a(1 \pm e) \quad (15)$$

onde a = distância da Terra - Sol = $149,5985 \times 10^6$ km, $e = 0,01673$

O sinal positivo na Equação 15 é para a distância Terra-Sol, quando a Terra está na posição afélio, e o sinal negativo é para a posição periélio. A solução da Equação 15 dá os valores para a distância mais longa igual a $152,1 \times 10^6$ km e para a distância mais curta igual a $147,1 \times 10^6$ km.

O movimento visível mais óbvio do Sol que verificamos facilmente ao olhar para o céu, é que ele se move diariamente em um arco, atingindo o seu ponto mais alto ao meio-dia. Verifica-se na Figura 41 a situação das diferenças dos caminhos e declinações do Sol durante o ano em seus equinócios e solstícios.

Figura 41 - Mudanças anuais da posição do Sol no céu



Fonte: Adaptação de (KALOGIROU, 2014).

3.8.1.5 Declinação

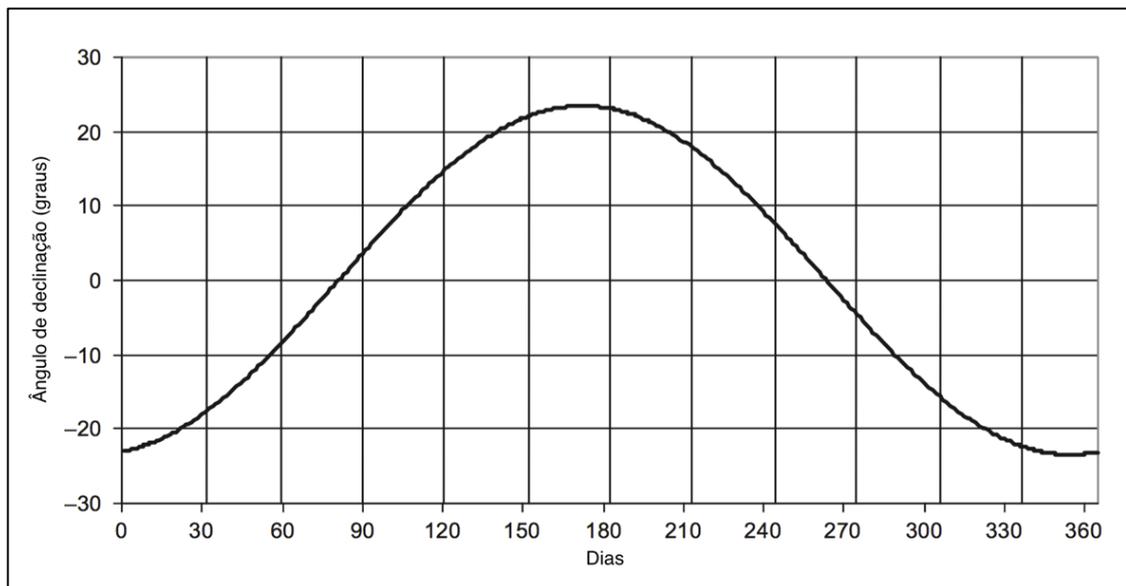
Como verificado anteriormente na Figura 40, nota-se que o eixo de rotação da terra é inclinado com um ângulo de $23,45^\circ$ a partir do eixo de rotação elíptica. A declinação varia de 0° no equinócio da primavera para $+23,45^\circ$ no solstício de verão, e 0° no equinócio de outono, e $-23,45^\circ$ no solstício de inverno. A variação da declinação do Sol ao longo do ano é apresentada na Figura 42. A declinação, δ , em graus para qualquer dia do ano (Nd) pode ser calculada aproximadamente pela equação:

$$\delta = 23,45 \text{sen} \left[\frac{360}{365} (284 + Nd) \right] \quad (16)$$

onde

Nd = Número de dias corridos do ano.

Figura 42 - Declinação do sol



Fonte: Adaptação de (KALOGIROU, 2014).

3.8.1.6 Ângulo horário

O ângulo horário é descrito pela seguinte equação

$$AH = 15 \left[\left(LT + \frac{TC}{60} \right) - 12 \right] \quad (17)$$

onde

AH = Ângulo horário (graus);

LT = Tempo solar local (horas);

TC = Fator de correção do tempo.

3.8.1.7 Ângulo de elevação

O Ângulo de elevação é calculado pela seguinte equação

$$Elev = \text{sen}^{-1}[\text{sen}\delta\text{sen}\varphi - \text{cos}\delta\text{cos}\varphi(\text{AH})] \quad (18)$$

onde

$Elev$ = Ângulo de elevação (graus);

δ = Ângulo de declinação (graus);

φ = Latitude (graus);

AH = Ângulo horário (graus).

3.8.1.8 Zênite

O zênite designa o ponto (imaginário) interceptado por um eixo vertical (imaginário) traçado a partir da cabeça de um observador (localizado sobre a superfície terrestre) e que se prolonga até a esfera celeste. Este ângulo pode ser calculado pela Equação 19 a seguir.

$$Zn = 90^{\circ} - Elev \quad (19)$$

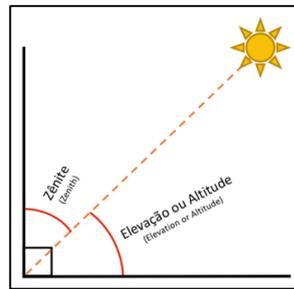
onde

Zn = Ângulo zênite (graus);

$Elev$ = Ângulo de elevação (graus).

Verifica-se na Figura 43 que o zênite é um complemento do ângulo de elevação.

Figura 43 - Ângulo zênite



Fonte: Autor.

3.8.1.9 Azimute

O azimute é calculado de acordo com a seguinte equação

$$Az = \cos^{-1} \left[\frac{\sin \delta \sin \phi - \cos \delta \sin \phi \cos (AH)}{\cos \alpha} \right] \quad (20)$$

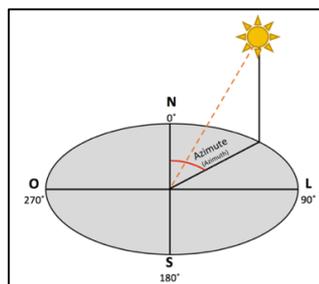
onde

Az = Ângulo azimute (graus);

ϕ = Longitude (graus);

α - Ângulo de elevação (graus).

Figura 44 - Azimute



Fonte: Autor.

Verifica-se que é uma medida de abertura angular cujo valor em graus perfaz horizontalmente um círculo que vai do norte geográfico até a projeção de um alvo. Representa uma direção definida em função de sua separação angular a um ponto de origem definido.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

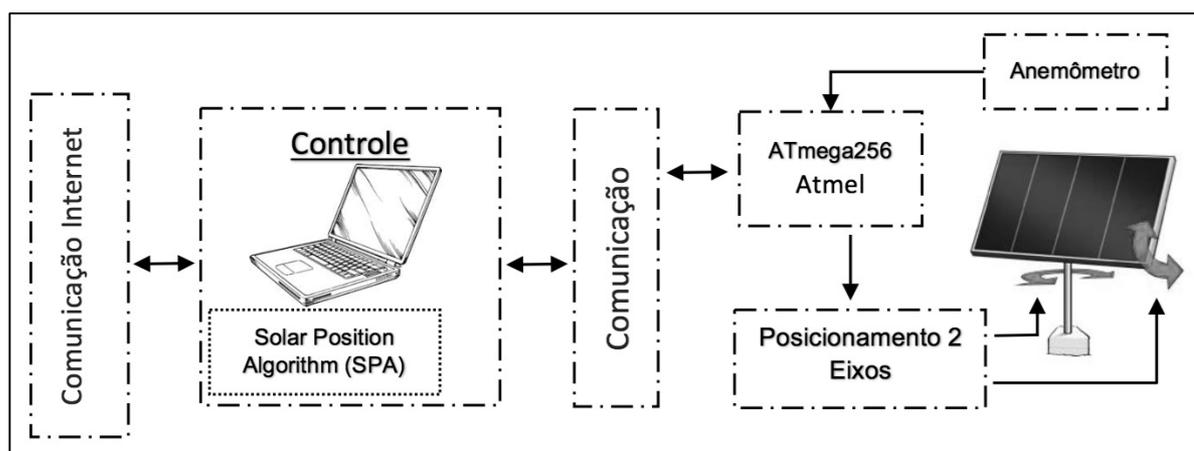
Para que se possa dar continuidade a este estudo e as discussões, foi necessário a construção de um protótipo real, o qual possibilitou os testes obrigatórios para as comprovações práticas. O espaço físico utilizado para o desenvolvimento do protótipo foi no laboratório do CEESP e a instalação no campo foi no INPE (UFSM-Santa Maria, RS).

Como apontado anteriormente, o rastreador solar desenvolvido e apresentado nesta dissertação não utiliza nenhum tipo de sensor para direcionar os painéis fotovoltaicos para o Sol. Com isto, houve apenas uma parte de montagem mecânica e outra eletrônica do protótipo, pois todo o algoritmo de controle foi via software, e o rastreamento solar foi feito em malha aberta através apenas do cálculo das coordenadas solares.

4.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA EXPERIMENTAL PROPOSTO

Para se ter uma ideia macro do sistema completo utilizado na parte experimental desta pesquisa, o diagrama de blocos na Figura 45 ilustra o funcionamento completo do sistema de rastreamento solar.

Figura 45 - Diagrama de blocos do protótipo



Fonte: Autor.

Pela Figura 45, verifica-se que o controle do rastreador está conectado através da comunicação, de tal forma que se possa examinar em tempo real o que está acontecendo no

rastreamento dos painéis e o quanto de energia os painéis estão gerando. O controle é feito através de um computador que terá o software permanentemente rodando. O SPA permitirá obter todos os parâmetros que definem a posição do Sol. É importante ressaltar que os painéis, sempre que possível, devem permanecer perpendiculares à radiação solar, pois desse modo será extraída a sua máxima potência. A comunicação entre o sistema de controle e o microcontrolador se dá através de um cabo *Universal Serial Bus* (USB), porém poderia ser utilizado um cabo de rede ou até mesmo rede sem fio, caso venha ser necessário em outras aplicações.

O microcontrolador utilizado no desenvolvimento do rastreador solar de dois eixos desta dissertação foi um Arduino Mega que será explicado posteriormente. Para o posicionamento do protótipo em dois eixos, foram empregados dois servos motores que podem ser substituídos facilmente por atuadores lineares para quilos ou até toneladas, e que movimentam em escala real o rastreamento fotovoltaico em dois eixos. O anemômetro propriamente dito não foi utilizado, porém no seu lugar foi empregado um potenciômetro para simular a velocidade do vento como entrada externa de sinal. Torna-se simples essa modificação para posterior uso com qualquer anemômetro real, digital ou analógico. Os painéis que serão utilizados na montagem do protótipo são discutidos a seguir juntamente com a carga.

4.2 PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

Os painéis fotovoltaicos são os responsáveis pela conversão direta da luz solar para eletricidade, como explicado anteriormente, porém a corrente que se cria nos painéis fotovoltaicos não está pronta diretamente para o uso domiciliar. Deve-se isto ao fato de os aparelhos de casa utilizarem corrente alternada (CA), porém os painéis fotovoltaicos fornecem apenas corrente contínua (CC). Neste estudo não se utilizou nenhum tipo de inversor CC/CA por não ter havido necessidade de se atuar diretamente na carga CA representada pelos atuadores lineares CC.

Os dois painéis utilizados na montagem do modelo são de pequenas dimensões e o mais semelhante possível um ao outro, pois o protótipo desenvolvido tem a função de simular o uso real de todo o sistema de rastreamento solar, e fazer uma comparação entre os painéis, fixo e o rastreado em dois eixos para que se possa utilizar posteriormente os dados em análises e resultados. A seguir na Tabela 5 os dados do painel solar fotovoltaico monocristalino utilizado.

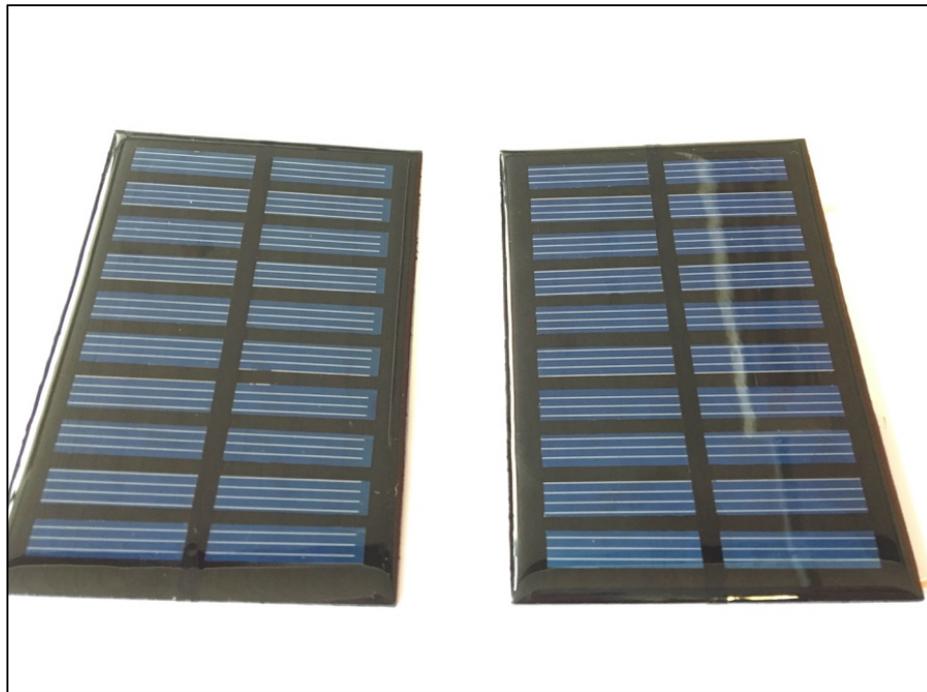
Tabela 5 - Dados do PV

Tensão	Corrente	Potência pico
5 V	0,14 A	0,7 W

Fonte: Autor.

A Figura 46 mostra as fotos dos dois painéis fotovoltaicos utilizados no protótipo. Estes dois painéis fotovoltaicos foram aferidos sem carga e com carga para verificar se eram iguais em suas características fundamentais como tensão e corrente.

Figura 46 - Painéis fotovoltaicos monocristalino



Fonte: Autor.

4.3 CARGA NOS PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

Para descobrir qual carga que deve ser aplicada nos painéis fotovoltaicos, utilizaram-se os cálculos da Equação 21 e 22:

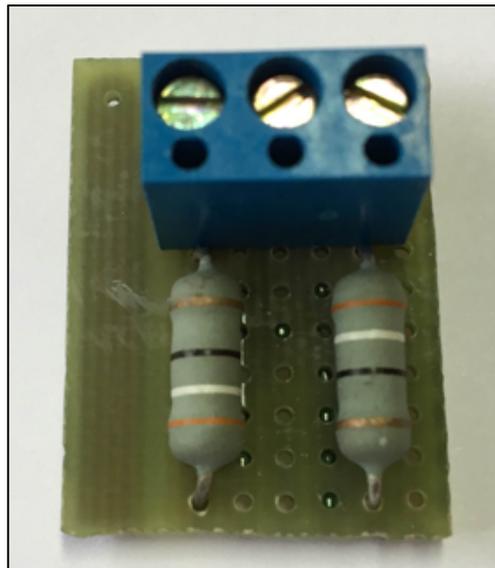
$$P = \frac{V^2}{R} \quad (21)$$

onde

$$R = \frac{5^2}{0,7} = 35,71 \, \Omega \cong 36 \, \Omega \quad (22)$$

Utilizou-se uma carga para cada um dos painéis fotovoltaicos de $36 \, \Omega$, o suficiente para dissipar toda a geração. Assim pode-se descobrir a corrente na carga e obter a potência por meio de cálculos. Os dois resistores comerciais foram montados em uma pequena placa como pode ser visto na Figura 47.

Figura 47 - Cargas



Fonte: Autor.

A medida da corrente é fornecida pelo módulo fotovoltaico de maneira indireta, através da amostragem da tensão sobre o resistor conectado como carga do sistema.

4.4 ESTRUTURA MECÂNICA

Inicialmente foi construído uma estrutura mecânica que pudesse movimentar apenas um painel fotovoltaico pequeno para os testes iniciais. O outro painel PV permaneceu numa

inclinação fixa calculada antecipadamente, lembrando que o movimento do sistema com rastreador solar tem que ser em ângulos zênites e azimutes, para que possa ser testado o algoritmo de posição solar em dois eixos. Esta estrutura consiste em uma base feita com ferro, para caso ocorram ventos fortes ou chuva, não se danifique ou envergue, assim impossibilitando os testes e obtenção de dados experimentais.

A base superior do protótipo foi feita de acrílico de 10 mm, que serve para sustentar o cano que apoia o suporte para o sistema móvel, onde foram postos os servos motores e o painel fotovoltaico. A Figura 48 mostra a estrutura de metal com a base inclinada de 39° fixada na estrutura geral do protótipo.

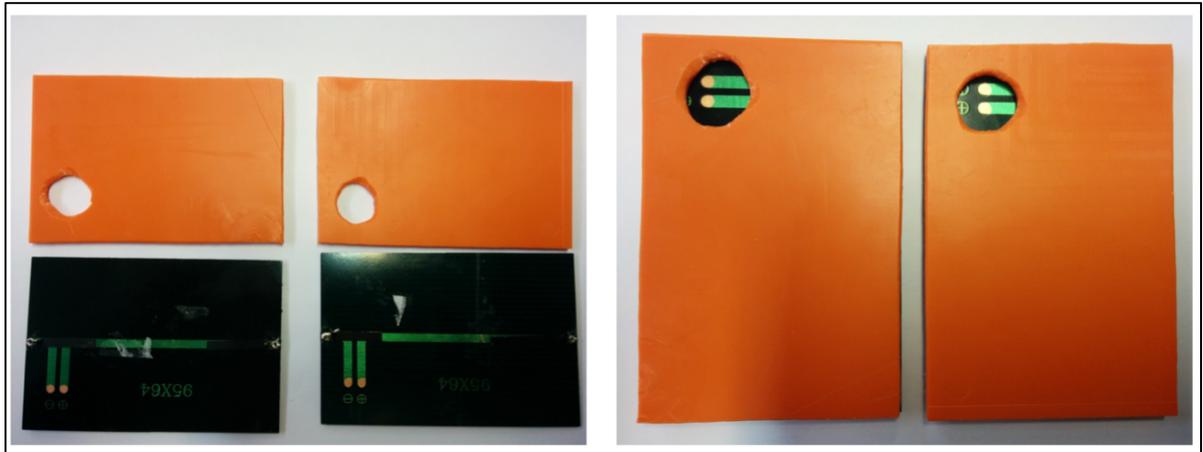
Figura 48 - Estrutura com ângulo de 39°



Fonte: Autor.

Os painéis fotovoltaicos solares foram colados em um plástico, para posteriormente serem colados na estrutura móvel e fixa do protótipo garantindo a mesma superfície de contato dos painéis. A Figura 49 mostra os plásticos usados atrás das placas fotovoltaicas.

Figura 49 - Painéis fotovoltaicas com proteção térmica



Fonte: Autor.

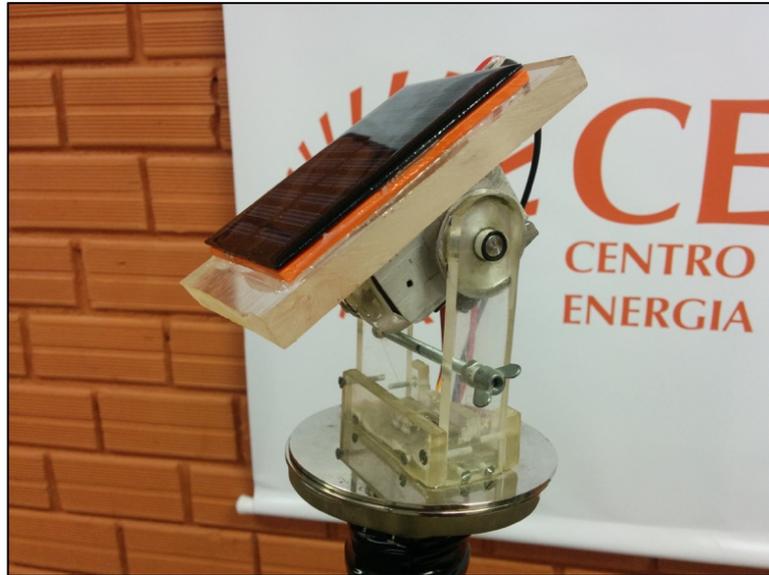
Na Figura 50 e na Figura 51 apresentam-se respectivamente a base fixa com 39° de inclinação, com o painel fotovoltaico devidamente fixado e o painel já fixado no sistema de rastreamento em dois eixos.

Figura 50 - Painel fotovoltaico fixo em 39 °



Fonte: Autor.

Figura 51 - Painel fotovoltaico com o rastreador de dois eixos



Fonte: Autor.

Alguns cuidados foram tomados para a construção do rastreador em dois eixos mostrado na Figura 51. Um deles, foi o de verificar se durante o percurso total do giro ele poderia varrer todo o azimute e o zênite e que não trancaria em nenhum obstáculo que pudesse comprometer o ângulo real que o painel deveria estar. A estrutura completa pode ser conferida na Figura 52.

Figura 52 - Protótipo completo montado



Fonte: Autor.

4.5 SISTEMAS ELÉTRICOS

O sistema elétrico correspondente a toda parte eletrônica do dispositivo de rastreamento solar foi desenvolvido no laboratório do CEESP incluindo o circuito de acionamento dos motores. O controle foi feito através de um computador rodando o SPA que envia os sinais para os motores através dos resultados gerados pelas simulações em tempo real. O sistema foi utilizado na realização de testes e experimentos para verificação do funcionamento geral de todos os itens do rastreador solar. A medida de tensão foi feita de modo direto na carga para que se tenham os valores salvos em um banco de dados e analisados em tempo real ou posteriormente. Este sistema foi implementado através das eletrônicas analógica e digital, priorizando sempre a simplicidade, sem comprometer sua confiabilidade, precisão, funcionalidade e eficiência.

4.5.1 Hardware

Na implementação do protótipo utilizou-se um microcontrolador Arduino Atmel Mega 2560, com a função principal de receber e enviar os sinais condicionados anteriormente no computador, onde ficam o controle com SPA e o banco de dados. A Figura 53 mostra o Arduino utilizado.

Figura 53 - Atmel Arduino Mega 2560



Fonte: Autor.

4.5.2 Anemômetro

Utilizou-se um potenciômetro conectado na porta analógica, simulando o funcionamento de um anemômetro real, que serve para monitorar a velocidade de vento para se prevenir de rajadas de ventos fortes, fazendo com que os painéis fotovoltaicos entrem num modo horizontal de segurança evitando assim que os efeitos de arrasto danifiquem sua estrutura mecânica. A Figura 54 mostra o potenciômetro usado para realizar esses testes e simulações.

O potenciômetro possui uma curva de variação de resistência constante (linear) em relação ao ângulo de giro do eixo. Com seu sinal analógico já condicionado via software para simulações entre 0 km/h e 250 km/h de velocidade de vento, o sistema reage automaticamente quando a velocidade do vento ultrapassa o valor estipulado pelo algoritmo que é de 150 km/h, podendo ser estipulado outro valor a qualquer momento pelo usuário do sistema.

Figura 54 - Potenciômetro

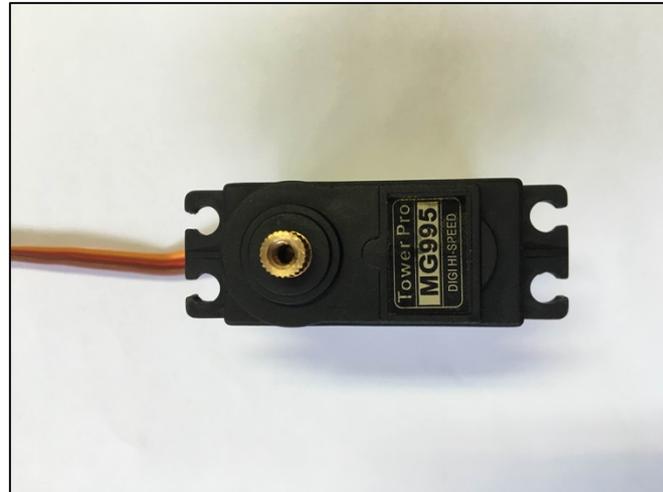


Fonte: Autor.

4.5.3 Atuadores

Os atuadores usados no protótipo são servos motores elétricos que possuem um conjunto de engrenagens de forma a garantir uma boa precisão quanto a sua utilização, como mostrado na Figura 55 e suas características apresentadas no ANEXO A – SERVO MOTOR MG995.

Figura 55 - Servo motor



Fonte: Autor.

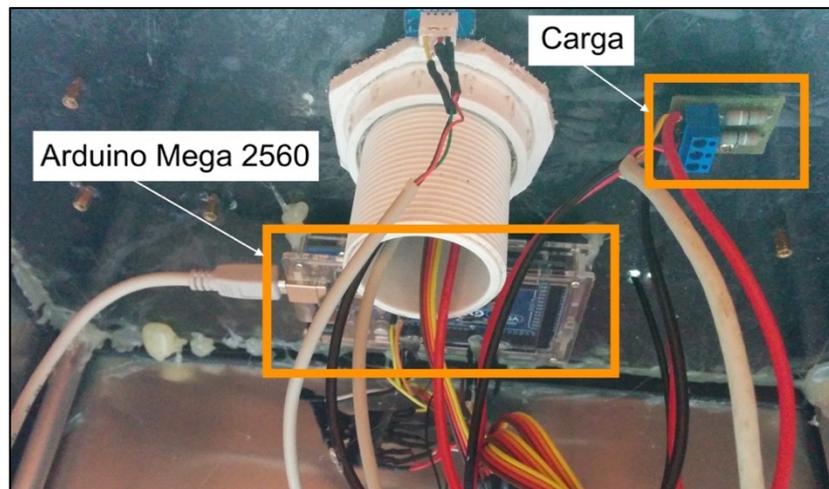
4.5.4 Software

O software de controle tem como principal função executar o algoritmo SPA que irá otimizar a produção de energia elétrica através do rastreamento solar em dois eixos nos painéis fotovoltaicos. Este software também é o responsável por obter as informações coletadas pelo microcontrolador, leituras dos dados de tensão nas cargas dos dois painéis fotovoltaicos, o fixo e no rastreado. A monitoração do anemômetro para a tarefa de segurança, tem base no dispositivo mencionado anteriormente entrando no modo de segurança do sistema, caso haja ventos acima do valor limite estipulado em 150 km/h.

4.5.5 Montagem

A montagem do sistema elétrico foi feita dentro da mesma estrutura de metal usada para posicionar os painéis fotovoltaicos, garantindo assim a segurança durante os testes em ambiente externo. A Figura 56 mostra detalhes da montagem das cargas devidamente instaladas e o Arduino já posicionado com todos as conexões ligadas.

Figura 56 - Sistema elétrico e de controle



Fonte: Autor.

4.6 DESENVOLVIMENTO DO ALGORITMO

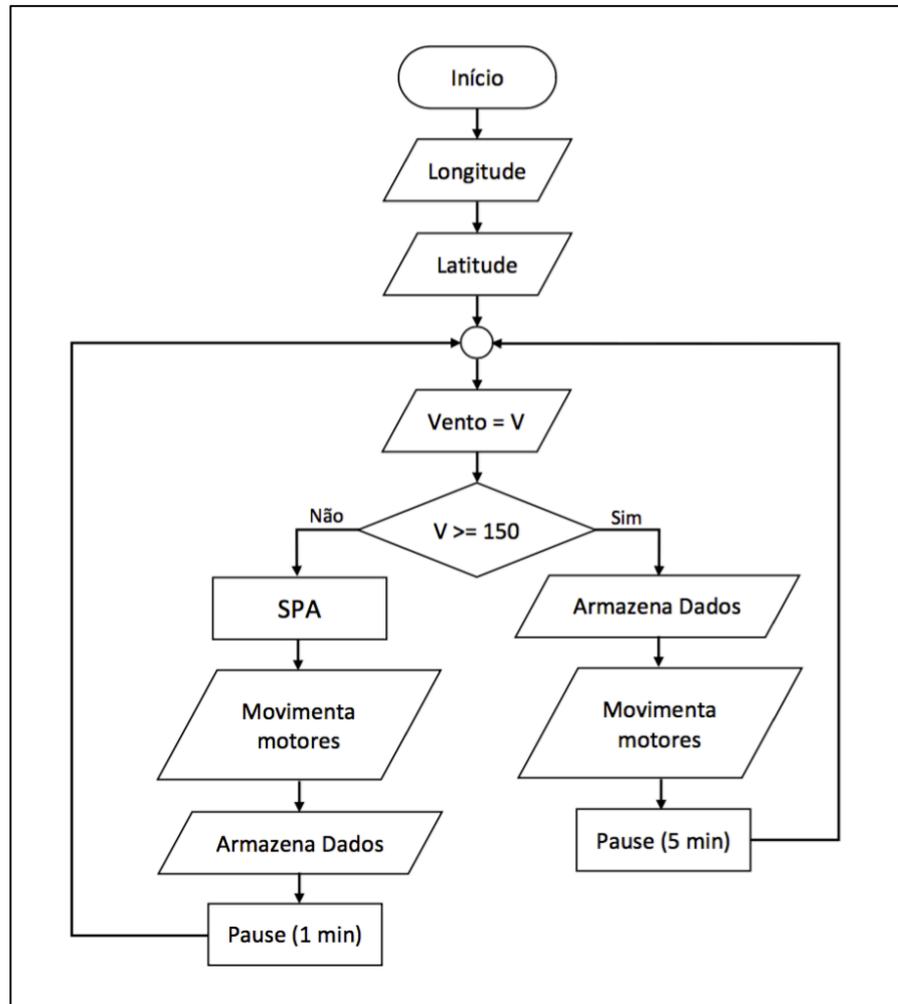
O fluxograma apresentado na Figura 57 mostra como o algoritmo de controle foi implementado no software Matlab, e pode ser utilizada qualquer outra linguagem de programação, porém por afinidade utilizou-se essa.

O sistema é iniciado primeiramente solicitando ao usuário as informações de localização geográfica das instalações, que são os dados de longitude e latitude. Com estes dados devidamente inseridos, o controle verifica a velocidade do vento.

Se o vento for superior a velocidade de 150 km/h, o rastreador solar entra no modo de segurança que posiciona o painel horizontalmente a Terra, e assim sofram a menor força de arrasto possível. Armazena-se os registros num banco de dados e aguarda-se 5 minutos até a próxima leitura, de tal forma que os painéis não fiquem oscilando a todo o momento.

Caso o vento esteja normal, neste caso ventos a baixo de 150 km/h, o controlador entra no SPA, gerando os valores de saída enviados para o servo motor. Com estes dados, a montagem eletrônica movimenta o painel fotovoltaico para a posição calculada pelo SPA. Os valores de zênite e azimute são armazenados no banco de dados, aguardando um minuto para refazer o *loop* de controle. Nota-se, que *setups*, como a velocidade do vento e o tempo de espera nas pausas, são ajustáveis de tal forma que permita o usuário a adaptar seu sistema para a melhor situação de cada projeto.

Figura 57 - Fluxograma do algoritmo de controle

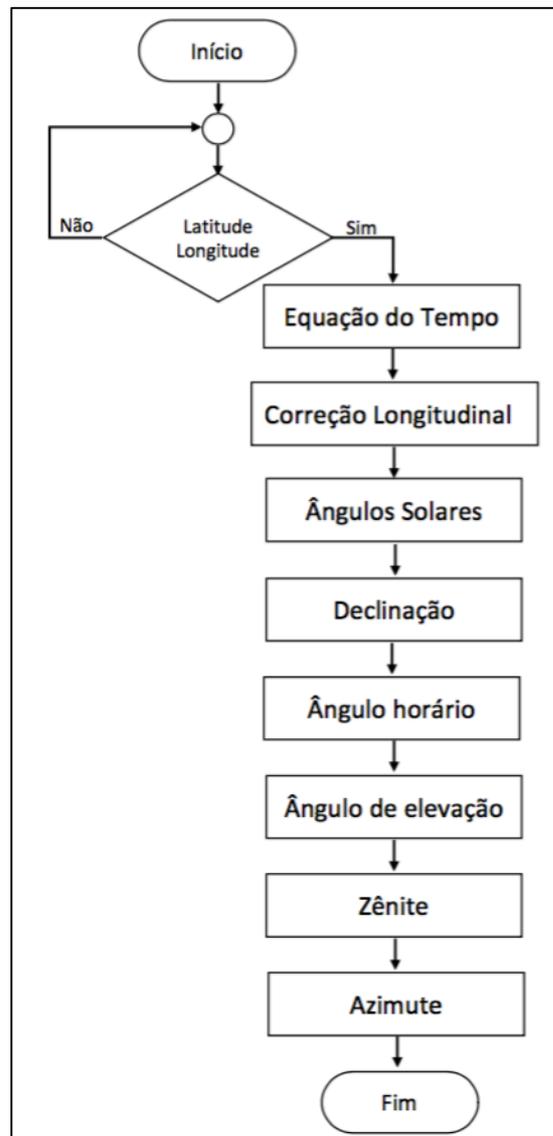


Fonte: Autor.

4.6.1 Algoritmo de posicionamento solar (SPA)

Quando o controlador acessa o SPA como representado no fluxograma da Figura 58, primeiramente ele verifica as informações de latitude e longitude. Caso não se tenha estas informações, o controlador retorna para o início da programação e solicita-as ao usuário. Tendo posse destas informações, o controle começa calculando a Equação 12 do tempo, que necessita do horário local que é obtido pelo computador. O computador reconhece essa informação, para em seguida calcular a correção longitudinal, os ângulos solares, a declinação, os ângulos horários, ângulo de elevação, o zênite e por fim o azimute. Estas informações são salvas posteriormente em um banco de dados e os valores dos ângulos zênite e azimute são aplicados aos servos motores.

Figura 58 - Fluxograma SPA

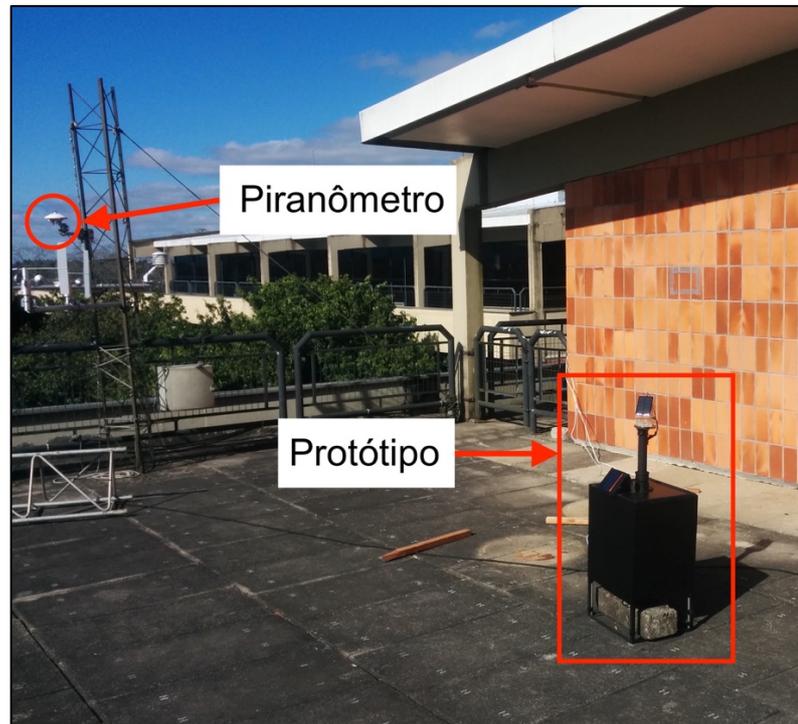


Fonte: Autor.

4.7 LOCALIZAÇÃO DA INSTALAÇÃO

A instalação de campo para os testes práticos foi no terraço do INPE (Santa Maria-UFSM, RS), como mostrado na Figura 59 e sua localização exata pode ser vista na Figura 60. O local é apropriado para instalações de equipamentos de testes, com facilidades de acesso a um ponto de rede, com conexão à internet e à rede elétrica, além de oferecer segurança e evitar furtos. Além disso, logicamente, este local recebe insolação durante maior parte do dia e do ano semelhante a usina fotovoltaica.

Figura 59 - Vista externa do local de instalação do protótipo



Fonte: Autor.

Figura 60 - Localização da instalação do protótipo

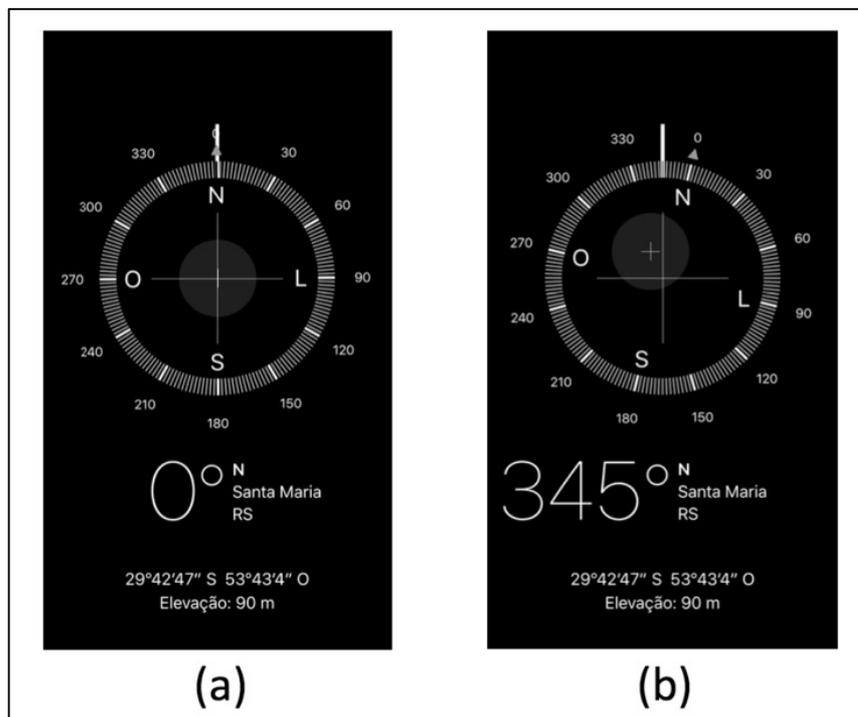


Fonte: Autor.

4.7.1 Orientação magnética para instalação do protótipo

Na Figura 61 apresenta-se a correção que foi aplicada ao referencial magnético para a cidade de Santa Maria-RS. Essa correção tende a ajustar o Norte verdadeiro, levando em consideração o que foi descrito anteriormente. A correção é de aproximadamente 15° .

Figura 61 - Correção da declinação magnética



Fonte: Autor.

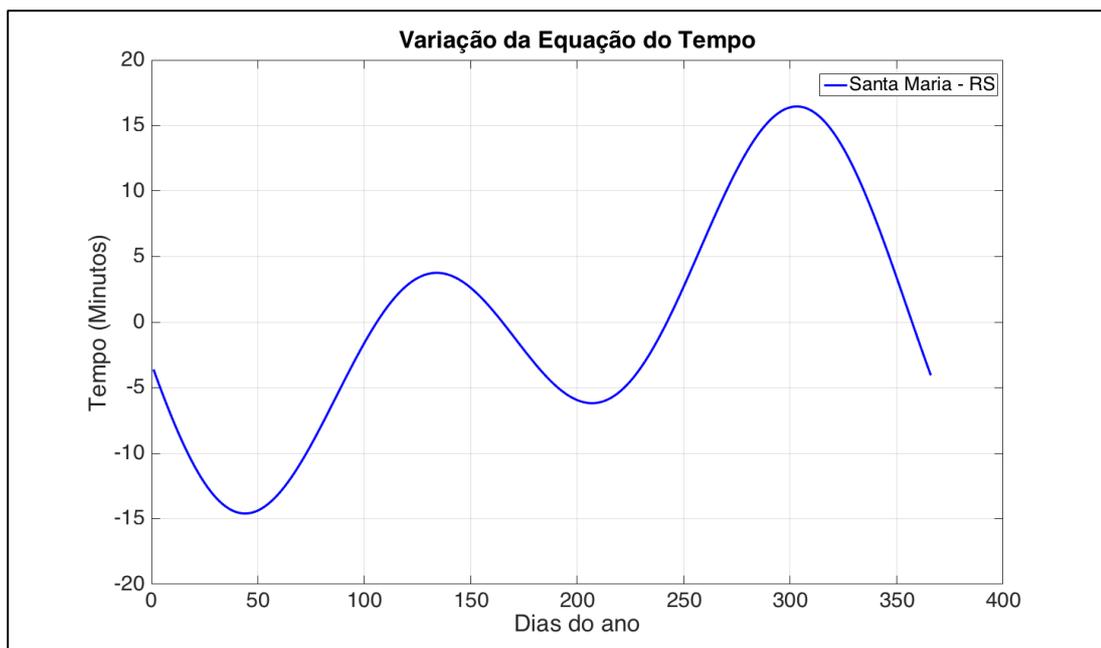
5 ANÁLISE E DISCUSSÕES DOS RESULTADOS

Todas as simulações e programações apresentadas nesta dissertação foram realizadas com o software Matlab R2016a® (MATHWORKS). O Algoritmo de Posicionamento Solar (SPA) tem como base os conceitos astronômicos traduzidos pelas equações anteriormente apresentadas. A informação contida no algoritmo SPA é a ferramenta necessária e suficiente para o microcontrolador executar a tarefa física indispensável de movimentação dos atuadores ou servo motores para rastreamento solar em dois eixos.

5.1 EQUAÇÃO DO TEMPO

Como já abordado, a Equação 12 corrige a excentricidade da órbita e a inclinação do eixo da Terra. A posição relativa do Sol no céu também depende da rotação terrestre. Como verificado na revisão bibliográfica, vamos aplicar essa equação do tempo para a cidade de Santa Maria no estado do Rio Grande do Sul e para se discutir a variação anual do direcionamento correto do painel.

Figura 62 - Equação do tempo



Fonte: Autor.

Com a plotagem da modelagem da Equação 12 do tempo mostrado na Figura 62, pode-se, agora, verificar claramente essa discrepância de tempo tal como descrita por Kalogirou (2014). Utilizou-se todos dias de um ano na fórmula para gerar a variação anual.

5.2 CORREÇÃO LONGITUDINAL

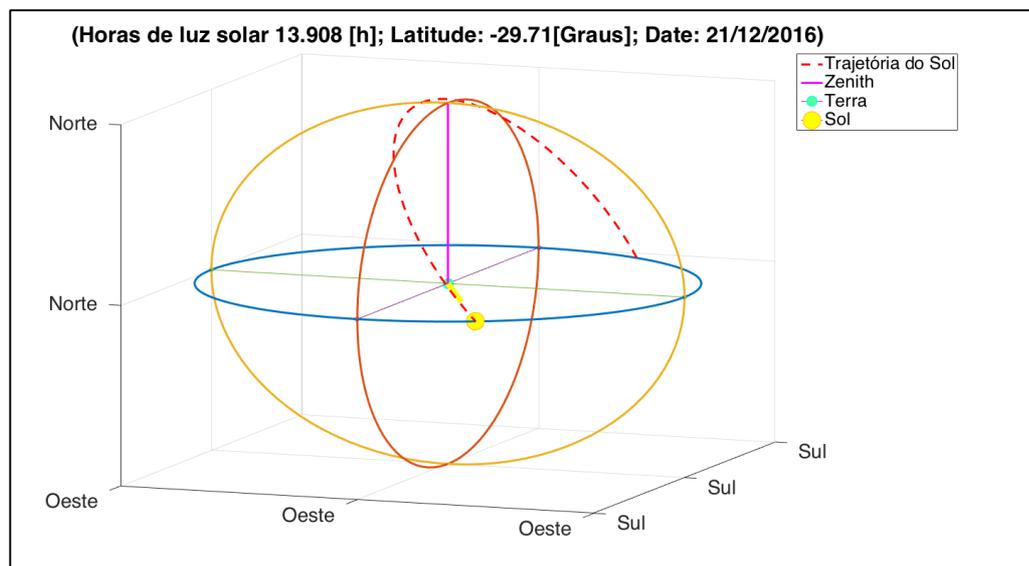
Com os valores já conhecidos pela equação do tempo e as condições locais, pode-se determinar o fator de correção longitudinal. Como as divisões dos fusos horários muitas vezes são políticas e econômicas, e não apenas geográficas, é preciso aplicar essa correção de longitude entre o meridiano no local e o fuso horário considerado pelo observador.

5.3 ÂNGULOS SOLARES

Para aplicações na engenharia é interessante determinar a posição solar de acordo com um sistema de coordenadas na origem em que se encontra o observador. Como demonstrado anteriormente, a revolução não é circular e resulta numa elipse entre o observador e o Sol.

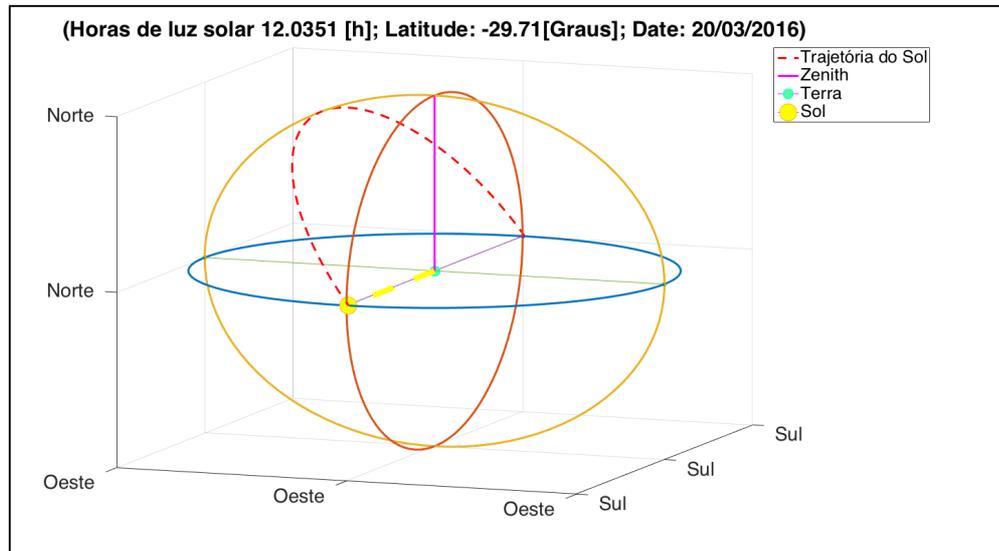
Foram demonstrados e verificados nas simulações os respectivos equinócios e solstícios, simulados e plotados. Primeiramente é apresentado o solstício de verão e posteriormente as outras três posições anuais do Sol no céu.

Figura 63 - Solstício de verão (21/12/2016)



Fonte: Autor.

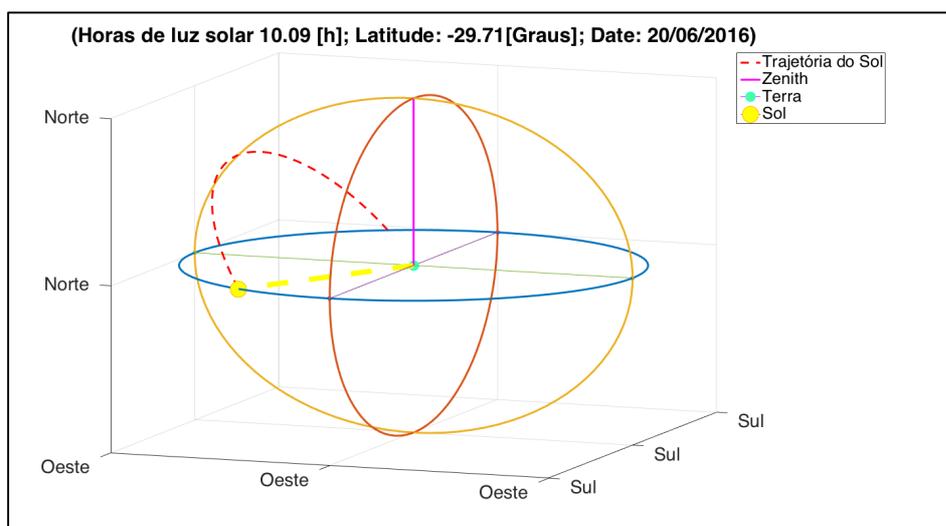
Figura 64 - Equinócio de outono (20/03/2016)



Fonte: Autor.

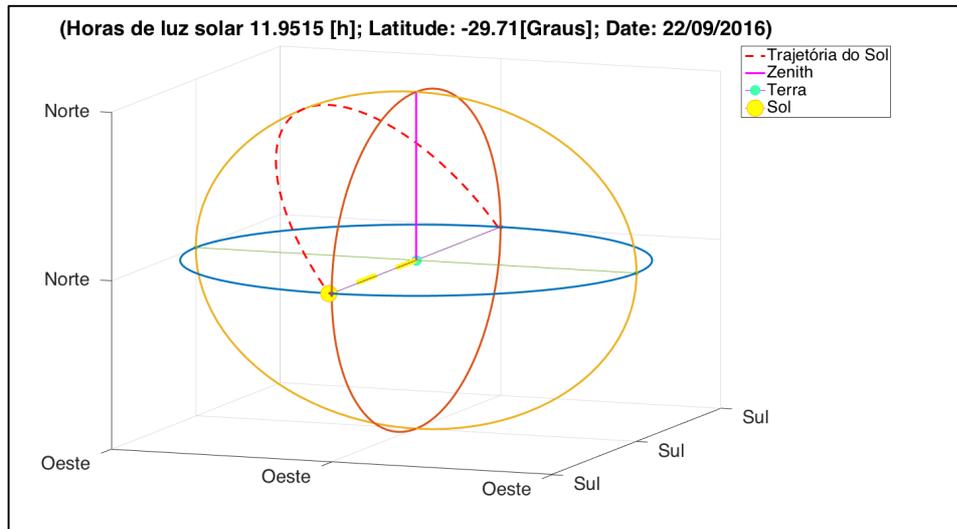
Percebe-se claramente que ao olharmos para o céu, o Sol se move diariamente em um arco, o qual pode ser visto nas Figura 63, Figura 64, Figura 65 e Figura 66. Verifica-se o quão importante é saber o caminho exato do Sol, para obter-se um rastreamento solar com precisão.

Figura 65 - Solstício de inverno (20/06/2016)



Fonte: Autor

Figura 66 - Equinócio de primavera (22/09/2016)

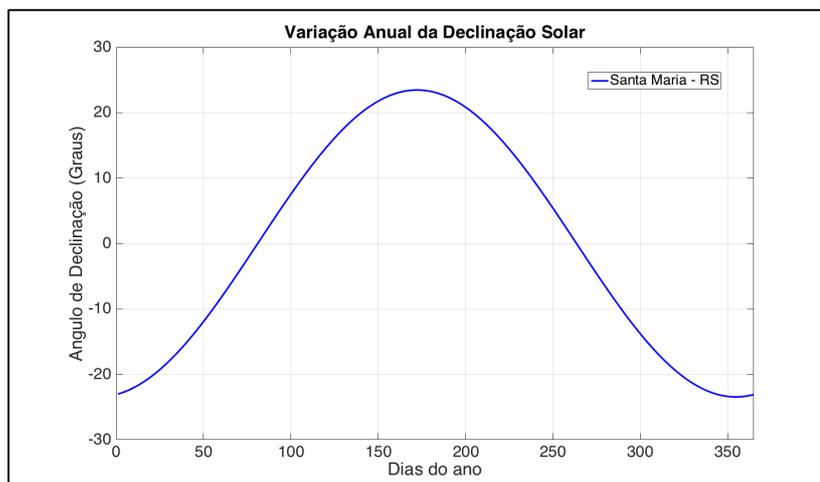


Fonte: Autor

5.4 DECLINAÇÃO

Devido a inclinação do eixo polar da Terra em relação à sua órbita visto na Figura 67 e nas referências já citadas, existe uma declinação (δ) para cidade de Santa Maria-RS de 23° e -23° com um delta de 46° para todo o ano de 2016. Essa variação se dá pela excentricidade da elipse que descreve a trajetória da Terra em torno do Sol ao longo do ano.

Figura 67 - Declinação do Sol

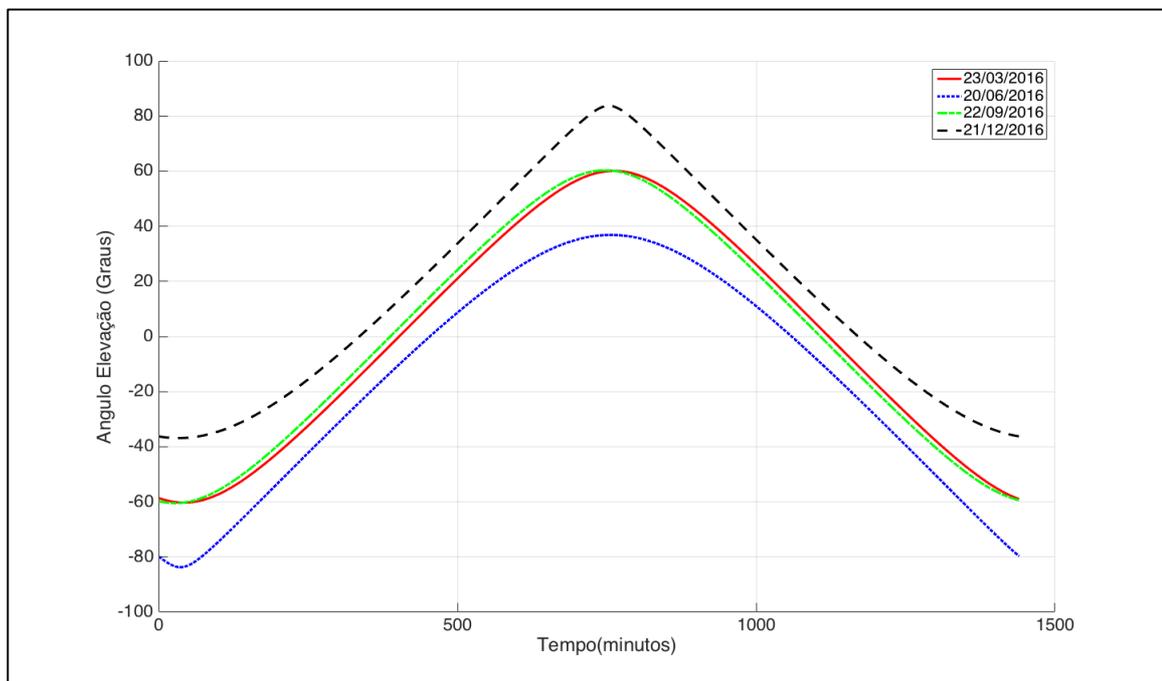


Fonte: Autor.

5.5 ÂNGULO DE ELEVAÇÃO

Os gráficos mostrados a seguir foram gerados e calculados através da Equação 18. Os ângulos de elevação foram simulados nos dois solstícios e equinócios, nas suas respectivas datas 23/03/2016, 20/06/2016, 22/09/2016 e 21/12/2016. Verifica-se uma diferença entre junho e dezembro de 40° , e por isso é importante estipular-se a elevação com precisão.

Figura 68 - Comparação entre os ângulos de elevação nos solstícios e equinócios



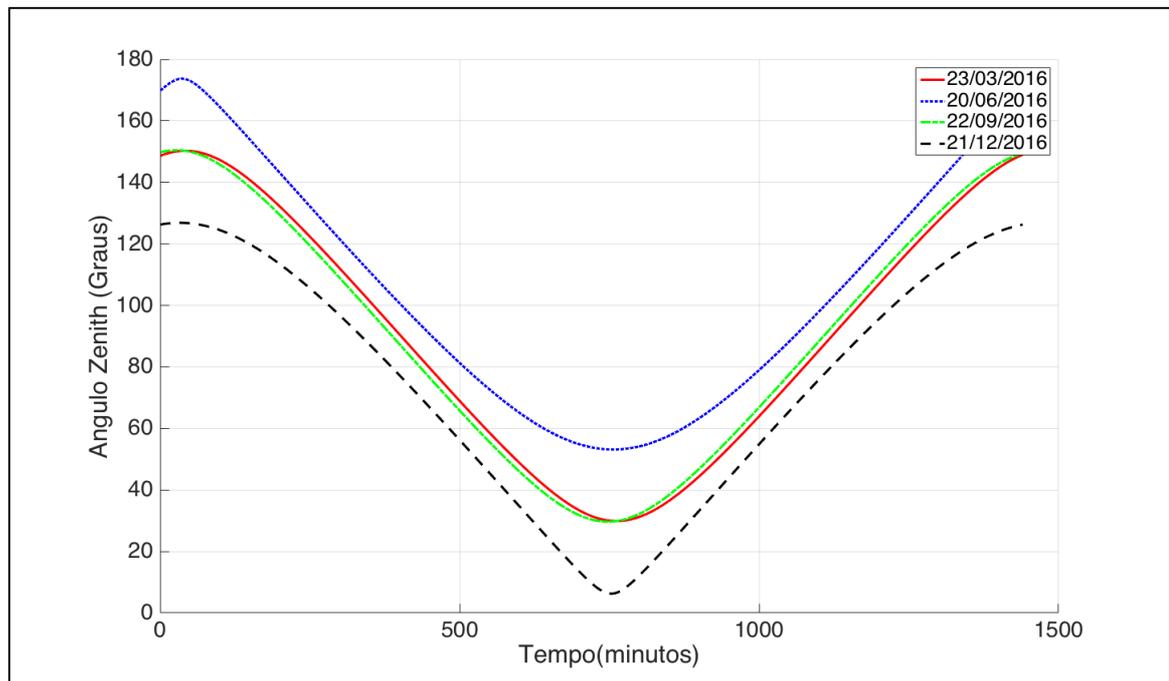
Fonte: Autor.

A variação da elevação do Sol em um dia é grande, por isso a importância do rastreamento solar diário da elevação, para se garantir o melhor apontamento dos painéis fotovoltaicos para o Sol.

5.6 ZÊNITE

O ângulo zênite é o complementar do ângulo da elevação.

Figura 69 - Comparação dos ângulos zênite

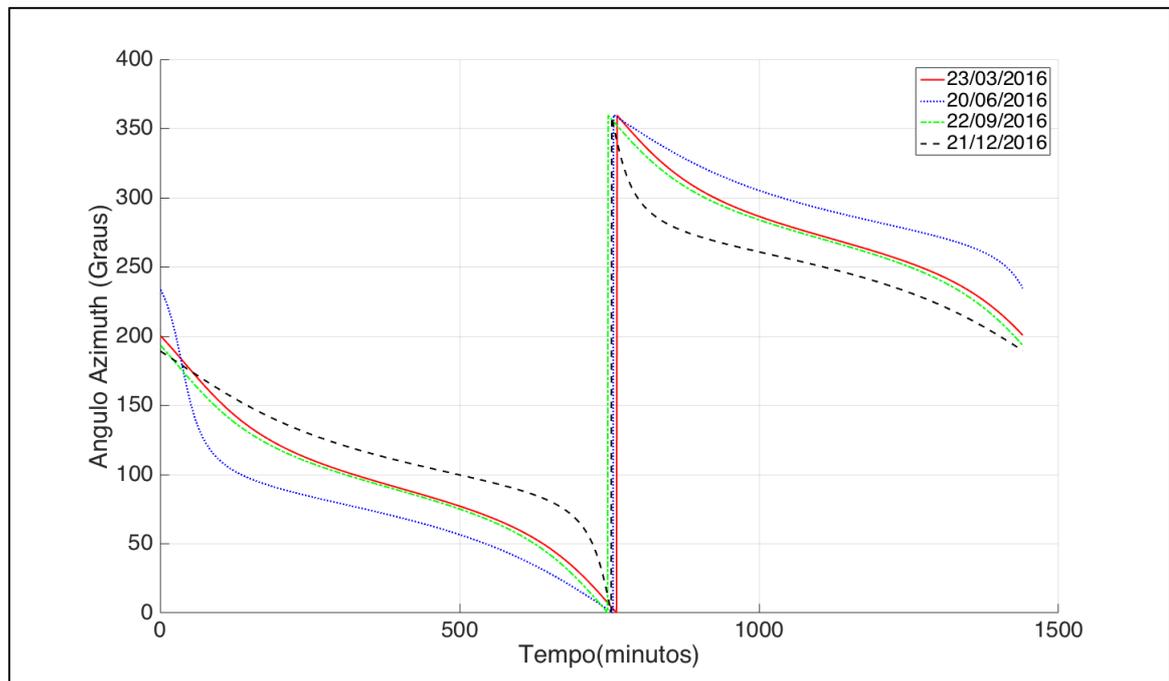


Fonte: Autor.

5.7 AZIMUTE

Pode-se verificar na representação do ângulo azimute da Figura 70 uma quebra na linha quando chega próximo ao 0° . Isso se dá por que o ângulo vai de 0° até 360° , porém como o experimento foi realizado na região Sul, o Sol nasce no Leste (L) e se põem ao Oeste (O), correndo no sentido anti-horário. Quando está se aproximando do Norte (N) que é 0° , ele varia de 1° , 0° , 360° , 359° e assim por diante acontecendo então esse salto no gráfico. O sistema trabalha apenas com números positivos, em nenhum momento ele ultrapassa o eixo de zero graus.

Figura 70 - Comparação dos ângulos azimute nos solstícios e equinócios

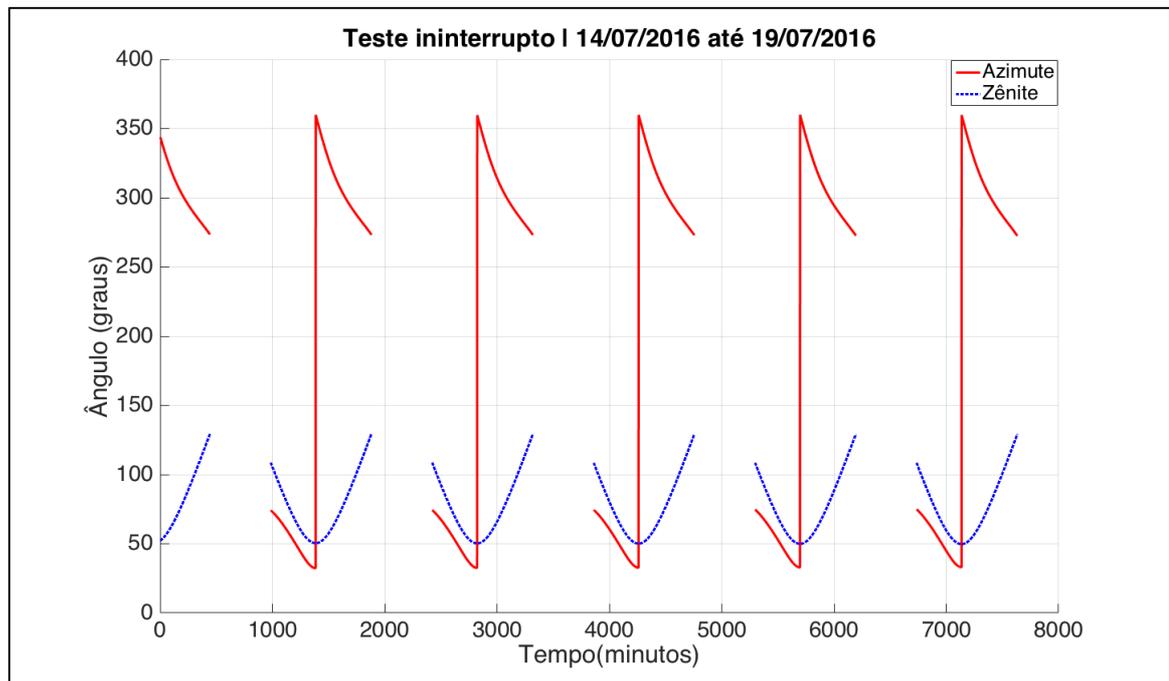


Fonte: Autor.

5.8 VERIFICAÇÃO DOS DADOS DO SPA COM OS DO NOAA

Foi feita uma verificação da precisão do rastreamento solar usando-se comparações dos dados do NOAA em um dia escolhido. Selecionou-se uma data qualquer, dentro das que o sistema ficou rodando ininterruptamente no laboratório do CEESP, em um ambiente controlado, que funcionou do meio da tarde do dia 14/07/2016 até o dia 19/07/2016. Como pode ser visto na Figura 71, o rastreador apresentou bom funcionamento visto que não houve nenhuma falha durante esses dias. O horário de claridade do dia de funcionamento é das 6 horas da manhã até às 20:59 de cada dia. O controlador roda a cada 1 minuto, assim atualizando as tabelas e enviando comandos para os atuadores. Nesse caso utilizou-se os dados do dia 15/07/2016 para as validações, comparações e discussões dos níveis de erros em comparação com os da tabela gerada pelo NOAA. Esta comparação garantiu um resultado satisfatório de funcionamento do rastreador solar com uma precisão de até 1° (um grau) como pretendido inicialmente.

Figura 71 - Teste ininterrupto no laboratório CEESP

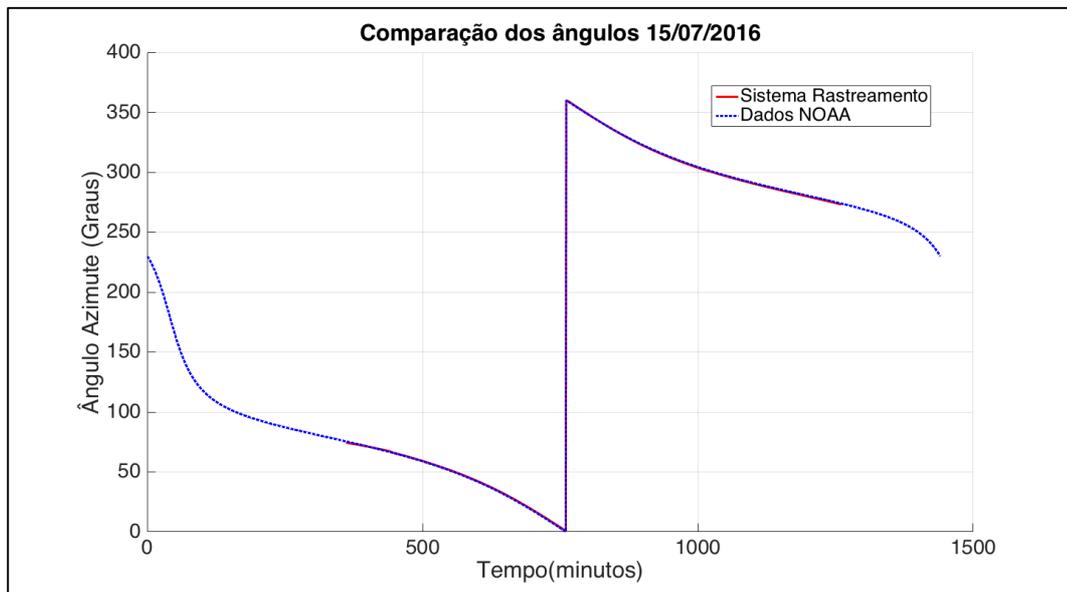


Fonte: Autor.

Após selecionado o dia 15/07/2016, baixou-se a tabela de dados de azimute e zênite desta data de referência no site do NOAA para as devidas validações do controlador desenvolvido para esta dissertação. Notou-se que os dados vão de 0:00 horas até às 23:59 do dia, observando que para a geração fotovoltaica, o horário de rastreamento do Sol não acontece durante o período da noite.

Como pode ser verificado na Figura 72, o controlador do rastreamento solar garantiu uma boa precisão no ângulo azimute ao longo de todo o tempo útil de rastreio. O controlador entrou em operação as 6:00 horas da manhã e desligou às 20:59 horas de cada dia, podendo alterar-se os horários de funcionamento do protótipo via programação. O maior valor onde este erro acontece é quando o NOAA indica $74,64^\circ$ e o sistema proposto calcula um ângulo de $73,75^\circ$ essa diferença é o erro $0,89^\circ$, portanto menor do que a precisão máxima do erro prevista para este controlador que é de 1° .

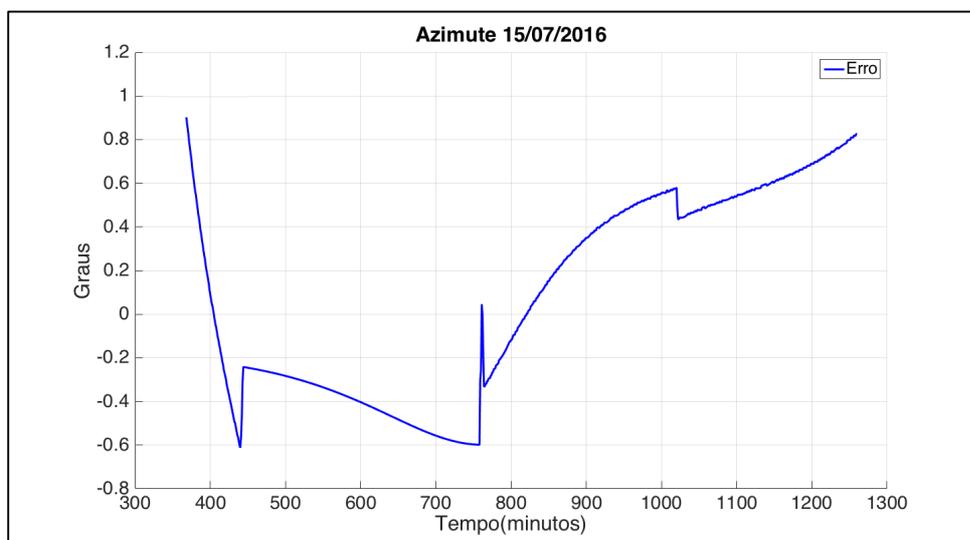
Figura 72 - Comparação (azimute)



Fonte: Autor.

A Figura 73 descreve todos os pontos e seus respectivos erros. O ponto de máximo erro foi em 369 minutos do dia 15/07/2016, que é 06 horas e 15 minutos onde chegou a $0,89^\circ$. Conclui-se que o controlador no eixo azimute teve uma boa precisão de rastreamento.

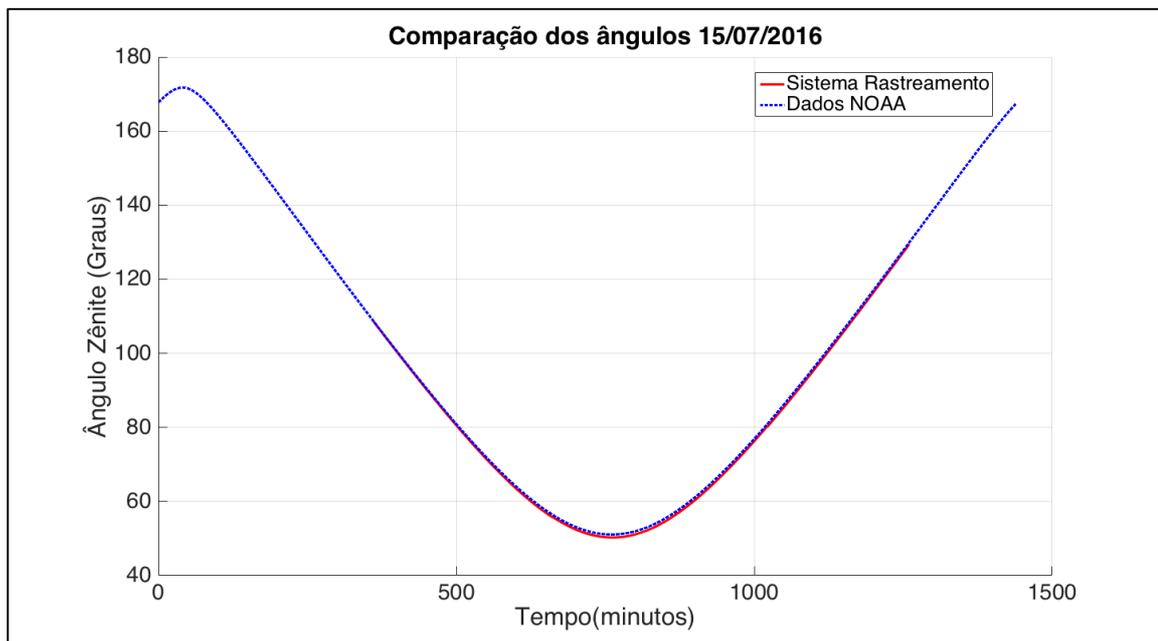
Figura 73 - Erro azimute



Fonte: Autor.

A seguir foi realizada uma comparação semelhante com a anterior, utilizando novamente os dados do NOAA para comprar os ângulos, porém agora com estudos voltados para ângulo zênite de rastreamento solar. Pode-se verificar na Figura 74 que a indicação de posicionamento, ficou praticamente alinhado aos dados fornecidos pelo NOAA.

Figura 74 - Comparação (zênite)

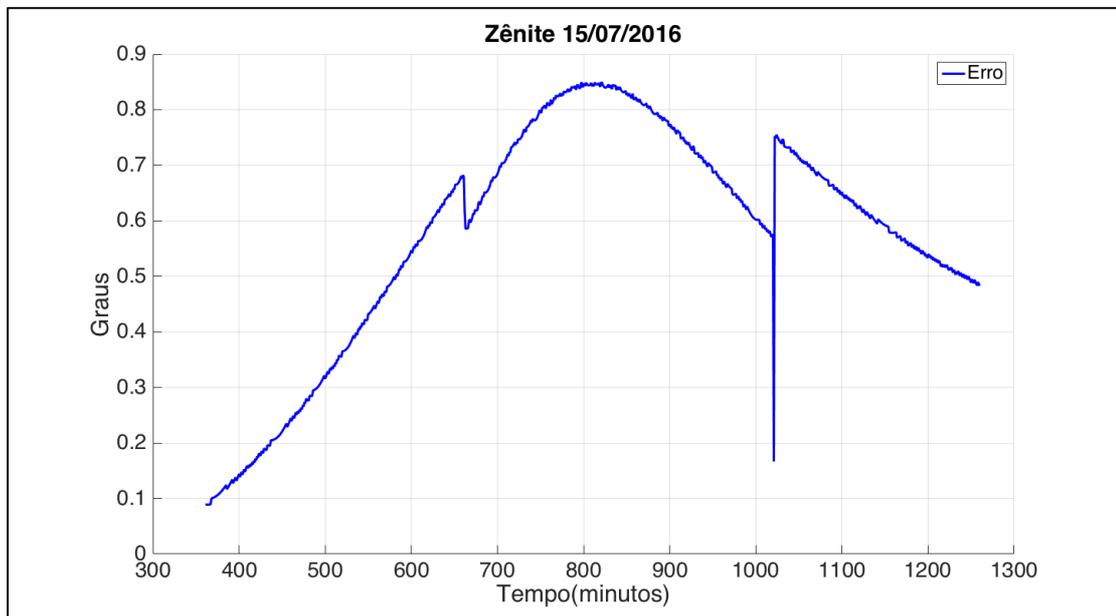


Fonte: Autor.

O controlador de rastreamento teve seu ponto mais crítico no valor de angulação de $51,64^\circ$ em relação ao da tabela gerada no NOAA que é de $52,49^\circ$. Consta mais uma vez que o maior erro foi de $0,85^\circ$, como pode ser conferido a seguir.

A Figura 75 mostra os pontos mais críticos de posicionamento, onde pode-se também verificar os demais erros. Com estes resultados, pode-se considerar que o controlador é adequado para o posicionamento dos painéis conforme os dados do NOAA, pois não se obteve nenhum erro maior que 1° no ângulo zênite.

Figura 75 - Erro zênite



Fonte: Autor.

5.9 COMPARAÇÕES ENTRE AS POTÊNCIAS

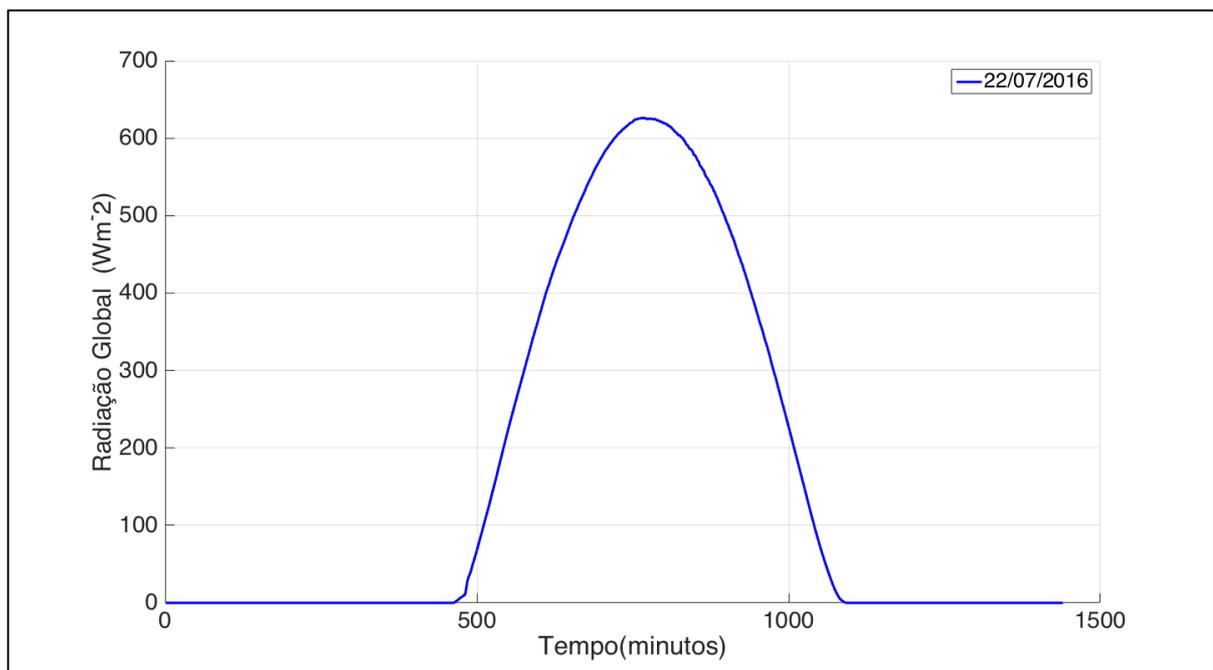
Nesta seção são apresentadas as comparações das potências elétricas geradas nos painéis fotovoltaicos do protótipo instalados entre os dias 20/07/2016 à 26/07/2016 no terraço do INPE. Inicialmente mostra-se e discute-se cada curva plotada separadamente com seus respectivos dados, começando com a geração do painel fixo, logo em seguida do painel rastreado em dois eixos com uma comparação de ganho real de energia fotovoltaica. Note-se que os testes foram realizados com ventos típicos da região, o que quer dizer, que em nenhum momento foi utilizado o recurso de proteção. Levou-se em conta que o vento sempre esteve abaixo dos 150 km/h, para não haver necessidade de ativação do sistema de segurança e poder comparar continuamente dados de funcionamento 100% do tempo rastreado.

A data escolhida para apresentar e discutir os dados foi o dia 22/07/2016, pois teve poucas interferências de nuvens ou sombras. Micros interferências aconteceram, o que ocasionou variações no sensor de radiação do INPE, que se alteraram ligeiramente no período inicial da manhã, quando se observou a possível passagem de nuvens e pássaros. O dia escolhido teve poucas interferências e assim os melhores índices de radiação para se poder discutir o rastreador solar em dois eixos comparado ao de eixo fixo.

5.9.1 Análise dos dados do INPE

A plotagem apresentada na Figura 76, foi feita com base nos dados obtidos do piranômetro instalado no INPE (UFSM-Santa Maria-RS) no mesmo dia que o protótipo de rastreamento permaneceu em testes no local. Um ponto evidente do dia escolhido para os testes e análise das curvas de geração foi de permitir uma verificação de qualidade dos dados do período da manhã e do período da tarde, pois o céu estava claro.

Figura 76 - Radiação solar em 22/07/2016



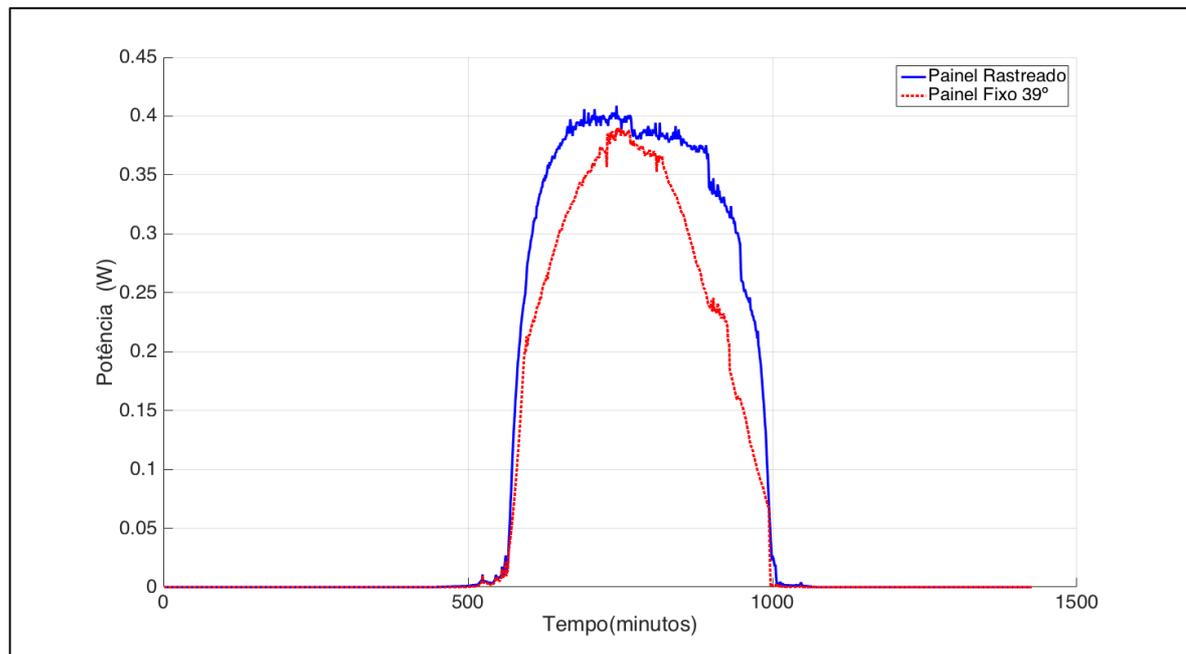
Fonte: Autor.

5.9.2 Comparações entre as potências geradas

A partir dos dados coletados com o protótipo instalado externamente no dia 22/07/2016 (inverno nesta localização), foram traçados gráficos que permitem uma melhor visualização dos resultados de geração dos dois geradores fotovoltaicos (fixo e rastreado). As duas curvas a seguir representam as potências instantâneas geradas e entregues às cargas equivalentes, considerando que não haja perdas entre a geração e o consumo (carga). Nestes casos, os painéis fotovoltaicos trabalharam em condições idênticas de operação, mas um é rastreado em dois

eixos e o outro está fixo na angulação já discutida. Na Figura 77 pode-se observar o ganho com o rastreamento solar em dois eixos. Este aumento de ganho deu-se à presença do rastreador solar que estendeu o período de máxima incidência solar sobre o painel fotovoltaico.

Figura 77 - Comparação das potências geradas pelos painéis fotovoltaicos em 22/07/2016



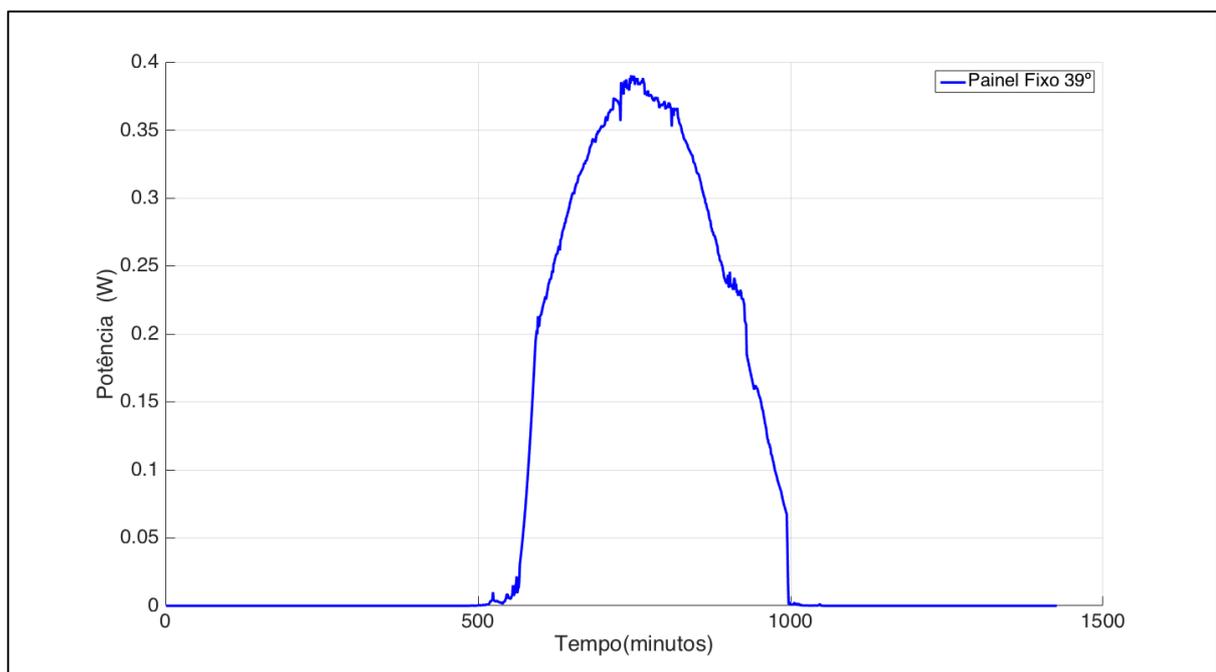
Fonte: Autor.

Nesta mesma Figura 77, é possível verificar o comportamento típico esperado entre os painéis. A curva vermelha tracejada é a do painel fixo em 39° e a curva com linha contínua em azul é a do painel rastreado em dois eixos. Nota-se que a potência gerada no início é zero antes do nascer do Sol, aumentando assim gradativamente após 450 minutos do dia 22/07/2016, que é referente às 7 horas e 50 minutos, atingindo seu valor máximo em aproximadamente 746 minutos do dia de 12 horas e 43 minutos horário local que é aproximadamente o meio dia solar. Verifica-se também que existe apenas um pico de potência entregue pelo sistema fixo, e quando utilizado o rastreamento, esse pico prolonga-se de maneira entregar mais potência para a carga.

5.9.3 Potência gerada no painel fixo em 39°

A curva de potência do painel fixo em 39° pode ser conferida na Figura 78, onde o resultado de energia gerada é de 117,74 Wmin/dia = 1,96 Wh/dia e apresentou sua potência de pico de 0,37 Wp, lembrando que a potência de pico máximo entregue pelo painel fotovoltaico é de 0,7 Wp.

Figura 78 - Potência gerada pelo painel fixo em 22/07/2016

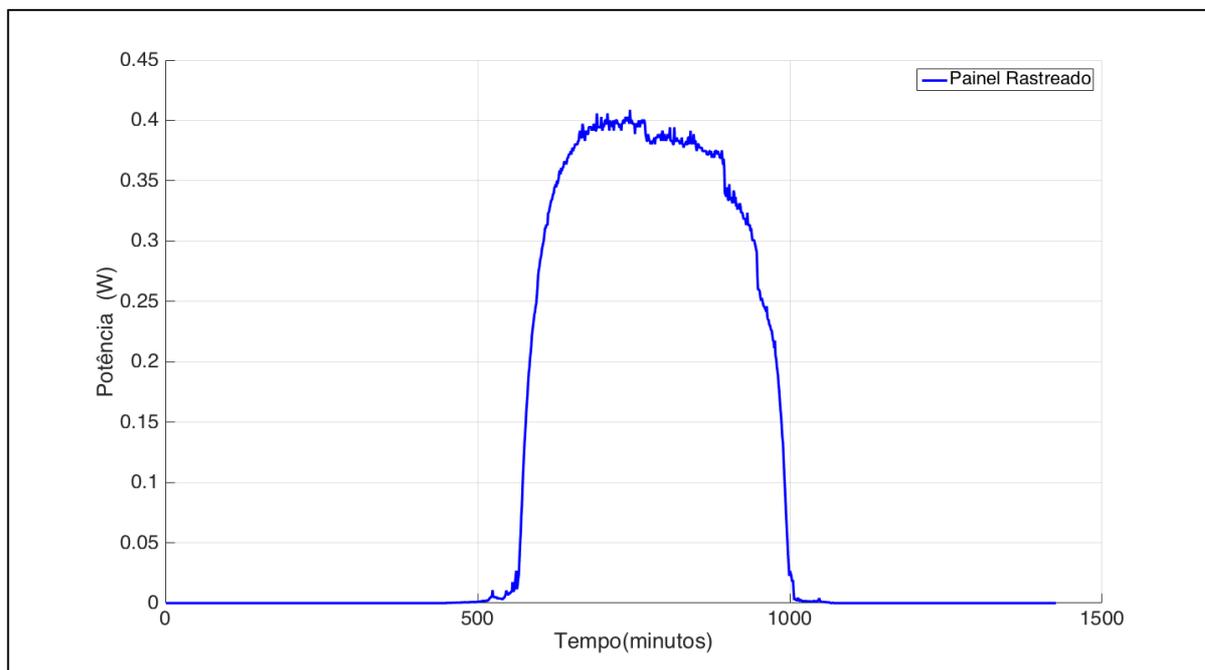


Fonte: Autor.

5.9.4 Potência gerada do painel rastreado em dois eixos

A Figura 79 representa a entrega de potência feita pelo painel fotovoltaico com rastreamento em dois eixos onde verifica-se que a energia gerada no dia 22/07/2016 foi de 145,46 Wmin/dia = 2,42 Wh/dia, alcançando o ponto máximo em uma de potência pico de 0,41 Wp. Mesmo com o rastreamento solar em dois eixos o painel solar não conseguiu entregar toda a potência, pois a radiação do dia estava baixa como mostrado anteriormente através dos dados de radiação do INPE do dia 22/07/2016.

Figura 79 - Potência gerada do painel rastreado 22/07/2016

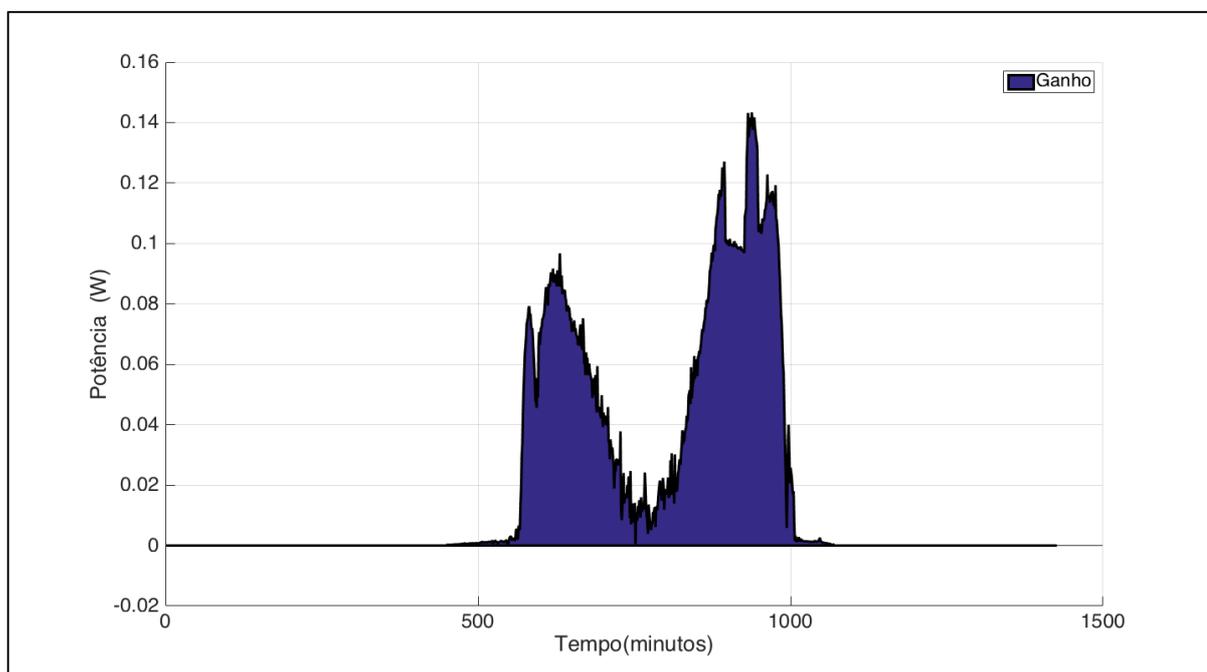


Fonte: Autor.

5.9.5 Análise do ganho energético

Para completar o conjunto de resultados sob análise, apresentam-se a integração da diferença entre os painéis fotovoltaicos com e sem o rastreo solar, para que se possa analisar a curva da diferença de potências ao longo do dia. Como já era previsível, o rastreamento solar proposto nesta dissertação obteve um ganho real como pode ser visualizado na Figura 80, onde a geração com rastreamento obteve 2,42 Wh/dia enquanto que o painel fixo gerou apenas 1,96 Wh/dia. O ganho em relação ao painel fotovoltaico fixo foi 0,46 Wh/dia o que representa um ganho bruto de 19% na produção de energia.

Figura 80 - Ganho fotovoltaico diferencial com o rastreamento em dois eixos no dia 22/07/2016



Fonte: Autor.

6 CONCLUSÕES

Com base nas revisões bibliográficas realizadas nesta dissertação e nos resultados experimentais obtidos, foram reunidas importantes conclusões sobre o direcionamento solar de painéis fotovoltaicos. A partir delas, este texto apresenta uma metodologia completa para implementação do rastreamento solar de dois eixos para posicionamento de módulos fotovoltaicos.

Em questões de geração com energia solar, os resultados apresentados nesta pesquisa demonstram a superioridade da geração fotovoltaica usando rastreamento solar em relação ao painel com apontamento fixo. Porém, o rastreamento solar eleva a complexidade construtiva, possíveis interrupções na geração, tem os custos de manutenção e de instalação maiores se comparados com o sistema fixo que não necessita nenhum componente mecânico ou eletromecânico adicional a ser controlado.

O controle do mecanismo para rastreamento solar nos testes práticos não usou sensores para rastrear o Sol, tendo sido implementado via algoritmo, o que permitiu um apontamento com erro menor que um grau. Com estes resultados, a geração recebeu maior radiação incidente sobre a superfície dos painéis fotovoltaicos, aproveitando a energia solar nos períodos com maior incidência de radiação. O rastreador solar desenvolvido para esta pesquisa teve um funcionamento satisfatório pois se manteve o tempo todo dentro das margens de erro previstas em relação aos padrões internacionais, e também visto que não falhou em nenhum dos testes de laboratório e nem de campo.

Todos os resultados e dados para as conclusões foram obtidos mediante observações do funcionamento e pela realização de medições na direção do rastreamento que funcionou de acordo com os critérios adotados na elaboração inicial do projeto. Seu emprego em diferentes latitudes e longitudes não requereu correções adicionais para o algoritmo de posicionamento, pois com os dados da localização, os ajustes e os parâmetros operaram de forma automatizada, permitindo uma grande flexibilidade em sua utilização.

O protótipo de rastreamento solar montado para esta pesquisa, embora simples, foi capaz de testar os principais fatores do algoritmo de controle e de toda a metodologia proposta. Não foram levados em conta durante as análises, alguns fatores como o custo dos painéis, a degradação e o tempo de vida útil. Tal verificação foge do escopo desta dissertação que focou o desenvolvimento de uma metodologia detalhada para rastreador solar automatizado de dois eixos para sistemas fotovoltaicos autônomos

Em resumo, este trabalho cumpriu todos os seus objetivos, permitindo conhecer mais sobre a área de rastreadores solares. A demonstração da operacionalidade do algoritmo SPA implantada em Matlab poderá beneficiar futuros desenvolvimentos nesta área.

A não utilização de sensores para determinação da posição do Sol representa uma inovação tecnológica funcional, pois evita movimentos desnecessários em casos de sombras, causadas por nuvens, ou algum animal que por ventura possa pousar nos sensores, por exemplo. O programa de controle executa rotinas que convertem a hora do relógio local em hora solar, utilizando as equações de posicionamento da Terra em relação ao Sol, podendo prever com precisão de menos 1° a localização do Sol no céu. Com isto, pode-se acionar os motores de passo para direcionar o painel fotovoltaico na posição perpendicular aos raios solares incidentes.

6.1 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Baseado neste trabalho, na experiência acumulada e nas dificuldades, pode-se sugerir os seguintes temas para futuros trabalhos:

1. Acompanhar o rastreamento solar automatizado em dois eixos por aproximadamente 10 anos, para que se determine a viabilidade econômica e o real ganho energético anual em relação ao painel fixo.
2. Aprimorar o algoritmo SPA para que calcule o melhor posicionamento dos painéis um dia antes juntamente com horário do nascer e do pôr do Sol, assim ligando o acionamento do painel e desligando-o nos exatos horários em que o Sol nasce e se põe. Tal procedimento, minimizaria as perdas para o rastreamento em horários fora do dia sem radiação.
3. Levar em considerações os gastos com a movimentação dos rastreadores, motores e atuadores lineares, para se fazer um levantamento do real consumo para verificar se o ganho é substancial em comparação ao não rastreado.
4. Outro ponto que pode ser averiguado são os intervalos de correção do posicionamento em relação ao proposto nesta dissertação que foi de um minuto; poderiam ser investigados intervalos de 5, 10 ou 15 minutos.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A.K.SURIA; IDRIS, R. M. Dual-Axis Solar Tracker Based On Predictive Control Algorithms. **IEEE Conference on Energy Conversion (CENCON)** , Outubro 2015. 238-243.

ABDALLAH, S.; NIJMEH, S. Two axes sun tracking system with PLC control. **Energy Conversion and Management**, v. 45, p. 1931–1939, 14 Outubro 2003. ISSN 10.1016/j.enconman.2003.10.007.

ALEXANDRU, C.; C., P. Different tracking strategies for optimizing the energetic efficiency of a photovoltaic system. **Automation, Quality and Testing, Robotics, 2008. AQTR 2008**, 22 Maio 2008. 434 - 439.

AL-MOHAMAD, A. Efficiency improvements of photo-voltaic panels using a Sun-tracking system. **Applied Energy**, p. 345–354, Novembro 2004. ISSN 10.1016/j.apenergy.2003.12.004.

ANEEL. ANEEL. **Agência Nacional de Energia Elétrica**, 24 nov. 2015. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/noticias/Output_Noticias.cfm?Identidade=8955&id_ara=90>. Acesso em: 15 abril 2016.

ANEEL. BIG. **BIG - Banco de Informações de Geração**, 16 junho 2016. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em: 18 junho 2016.

AT&T ARCHIVES AND HISTORY CENTER. The Bell Solar Battery (Bonus Edition). **AT&T Archives**, 18 Abril 2011. Disponível em: <<http://techchannel.att.com/play-video.cfm/2011/4/18/AT&T-Archives-The-Bell-Solar-Battery>>. Acesso em: 10 maio 2016.

BAKOS, G. C. Design and construction of a two-axis Sun tracking system for parabolic trough collector (PTC) efficiency improvement. **Renewable Energy**, v. 31, p. 2411–2421 , 15 Dezembro 2006. ISSN 10.1016/j.renene.2005.11.008.

BASNAYAKE, B. A. D. J. C. K. et al. Smart solar tracking and on-site photovoltaic efficiency measurement system. **2016 Moratuwa Engineering Research Conference (MERCon)**, p. 54-59, 5-6 Abril 2016. ISSN 10.1109/MERCon.2016.7480115.

BECERRA, F. Dual Axis Solar Tracking System. **Team Internationals**, 2016. Disponível em: <<http://carnot.mech.columbia.edu/~sd/2014/Design2014/Team2/#!prettyPhoto>>. Acesso em: 06 Junho 2016.

CHAPIN, D. M.; FULLER, C. S.; L., P. G. A New Silicon pn Junction Photocell for Converting Solar Radiation into Electrical Power. **Journal of Applied Physics**, 11 Janeiro 1954. ISSN 10.1063/1.1721711.

CLIFFORD, M. J.; EASTWOOD, D. Design of a novel passive solar tracker. **Solar Energy**, 77, 28 Julho 2004. 269–280.

DEGER. DEGER. **DEGERenergie GmbH & Co. KG**. Disponível em: <<http://www.degerenergie.de/en/solar-tracking.html>>. Acesso em: 23 abr. 2016.

DUERR, F.; MEURET, Y.; HUGO, T. Tailored free-form optics with movement to integrate tracking in concentrating photovoltaics, 21, 2013.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar Engineering of Thermal Processes**. 4ª Edição., v. 1, 2013. 936 p. ISBN 9780470873663.

ELAGIB, S. B.; OSMAN, N. H. Design and implementation of dual axis solar tracker based on solar maps. **Computing, Electrical and Electronics Engineering (ICCEEE), 2013 International Conference on**, p. 697 - 699, 26-28 Agosto 2013. ISSN 10.1109/ICCEEE.2013.6634025.

ENERGY, A. Dual Axis Solar Tracker - Aurora Solar Energy. **Aurora Solar Energy**, 2016. Disponível em: <<http://www.aurorasolarenergy.com/dual-axis-solar-tracker-3/>>. Acesso em: 11 julho 2016.

ENGIN, M.; ENGIN, D. Optimization Mechatronic Sun Tracking System Controller's for Improving Performance. **Advances in Mechanical Engineering**, 17 nov. 2013. ISSN 10.1155/2013/146352.

EPE. **Balanco Energético Nacional 2015**: Ano base 2014 / Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro, 2015. 292 p.

ESA; NASA. SOHO. **SOHO, the Solar & Heliospheric Observatory**. Disponível em: <<http://sohowww.nascom.nasa.gov/gallery/>>. Acesso em: 19 março 2016.

FARRET, F. A. **Aproveitamento de pequenas fontes de energia elétrica**. 1ª Edição. ed. Santa Maria: Editora UFSM, v. 1, 1999. 245 p. ISBN 9788573911268.

FARRET, F. A.; SIMÕES, M. G. **Integration of Alternative Sources of Energy**. 1º Edição. ed. A JOHN WILEY & SONS, INC., PUBLICATION, v. 1, 2006. ISBN 9780471755616.

FATHABADI, H. Novel high efficient offline sensorless dual-axis solar tracker for using in photovoltaic systems and solar concentrators. **Renewable Energy**, p. 485e494, 20 Abril 2016.

FATHPOUR, S.; TSIA, K. K.; JALALI, B. Two-Photon Photovoltaic Effect in Silicon. **IEEE Journal of Quantum Electronics**, v. 43, p. 1211 - 1217, 27 Novembro 2007. ISSN 10.1109/JQE.2007.907545.

FEKSA, R. L. **Sistema de monitoramento da tensão em uma célula fotovoltaica**. v. 1, 2015. ISBN 9783639849516.

FRAAS, L.; PARTAIN, L. **Solar Cells and Their Applications**. 2º Edição. ed. Wiley, 2010. 648 p. ISBN 9780470446331.

GARG, H. P. **Treatise on Solar Energy: Fundamentals of Solar Energy**. 1ª Edição. ed. New York:, v. 1, 1982. 608 p. ISBN 9780471101802.

GIL, F. J. G. et al. A review of solar tracker patents in Spain. **Proceedings of the 3rd WSEAS Int. Conf. on RENEWABLE ENERGY SOURCES**, 1-3 Julho 2009.

GREEN, M. A. et al. Solar cell efficiency tables (version 37). **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, 2011. ISSN 10.1002/pip.1088.

GRENA, R. An algorithm for the computation of the solar position. **Elsevier - Solar Energy**, v. 82, n. 5, p. 462-470, 2008.

I. R.; , A. A. Solar position algorithm for solar radiation applications. **Elsevier - Solar Energy**, v. 76, n. 5, p. 577–589, 2004.

IEC. IEC 60904:2015 SER Series. **IEC (International Electrotechnical Commission)**, 2016. Disponível em: <<https://webstore.iec.ch/publication/3881#additionalinfo>>. Acesso em: 29 maio 2016.

JAMES, A. S. Global PV Demand Outlook, 2015-2020: Exploring Risk in Downstream Solar Markets. **Market Research Report GTM Research**, 2016. Disponível em: <<https://www.greentechmedia.com/research/report/global-pv-demand-outlook-2015-2020>>. Acesso em: 20 maio 2016.

KALOGIROU, S. A. **Solar Energy Engineering, 2nd Edition Processes and Systems**. 2ª Edição. ed. San Diego v. 1, 2014. 840 p. ISBN 9780123972705.

LENZ, J. M. **Análise da solução ótima no uso de rastreadores mecânicos em painéis fotovoltaicos**. Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS). Santa Maria. 2015.

LINEYKIN, S.; AVERBUKH, M.; ALON, K. Issues in Modeling Amorphous Silicon Photovoltaic Modules by Single-Diode Equivalent Circuit. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 61, p. 6785 - 6793, 12 Dezembro 2014. ISSN 10.1109/TIE.2014.2317138.

MATHWORKS. MathWorks Accelerating the pace of engineering and science. Disponível em: <<http://www.mathworks.com/products/matlab/>>. Acesso em: 25 Fevereiro 2016.

MEREDDY, D.; V, V. R. R.; SADULA, T. Smart Dual Axes Solar Tracking. **2015 International Conference on Energy Systems and Applications**, p. 370 - 374, 1 novembro 2015. ISSN 10.1109/ICESA.2015.7503373.

MERTENS,. **Photovoltaics: fundamentals, technology and practice**. Tradução de Gunther Roth. 1º Edição. ed. John Wiley & Sons, v. 1, 2014. 297 p. ISBN 9781118634165.

MIT. **The Future of Solar Energy**., v. 1, 2015. ISBN 978-0-928008-9-8.

MME. MME. **Ministério de Minas e Energia**, 15 dez. 2015. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/en/web/guest/pagina-inicial/outras-noticias/-/asset_publisher/32hLrOzMKwWb/content/programa-de-geracao-distribuida-preve-movimentar-r-100-bi-em-investimentos-ate-2030;jsessionid=263E403BE2FE3D7BB95B1D0A61348058.srv154>. Acesso em: 19 abril 2016.

MOUSAZADEH, H. et al. A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** , p. 1800–1818, 20 jan. 2009.

MOUSAZADEH, H. et al. A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, p. 1800–1818, 20 Janeiro 2009. ISSN 10.1016/j.rser.2009.01.022.

MUNNA, M. et al. Design, Implementation and Performance Analysis of a Dual-Axis Autonomous Solar Tracker. **Green Energy and Technology (ICGET), 2015 3rd International Conference on**, p. 1 - 5, 11 set. 2015. ISSN 10.1109/ICGET.2015.7315104.

NANJANNAVAR, V.; GANDHI, P.; PATEL, N. LabVIEW based PV Cell Characterization and MPPT under Varying Temperature and Irradiance Conditions. **2013 Nirma University International Conference on Engineering (NUiCONE)**, Ahmedabad, 28-30 Novembro 2013. 1 - 6.

NCEI, N. Magnetic Declination Estimated Value. **National Oceanic and Atmospheric Administration**, 2016. Disponível em: <<http://www.ngdc.noaa.gov/geomag-web/#declination>>. Acesso em: 10 maio 2016.

NETO, C. P.; MOREIRA, J. L. K. Observatório Nacional. **Declinação Magnética - ON**, 2015. Disponível em: <<http://extranet.on.br/jlkm/magdec/index.html>>. Acesso em: 09 abr. 2016.

NREL. National Renewable Energy Laboratory (NREL). **Photovoltaic (PV) research and development (R&D)**, 2016. Disponível em: <<http://www.nrel.gov/pv/>>. Acesso em: 08 mar. 2016.

OLIVEIRA, K. ; SARAIVA, M. F. O. astro.if.ufrgs. **Departamento de Astronomia do Instituto de Física da UFRGS**, 2013. ISSN 978-85-7861-187-3. Disponível em: <<http://astro.if.ufrgs.br/index.htm>>. Acesso em: 17 abril 2016.

PEREIRA, E. B. **Atlas brasileiro de energia solar**. 1ª Edição. ed. São José dos Campos: INPE, v. 1, 2006. 60 p. ISBN 9788517000300.

PEREIRA, E. B. et al. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 1ª Edição. ed. São José dos Campos: INPE, v. 1, 2006. 60 p. ISBN 8517000307.

PILLAI, U. Drivers of cost reduction in solar photovoltaics. **Energy Economics**, 30 maio 2015. 9.

PINHO, J. T.; BARRETO, E. J. F. **Sistemas Híbridos - Soluções Energéticas para a Amazônia**. 1º Edição. ed. Brasília: Ideorama, v. 1, 2008. 396 p. ISBN 9788598341026.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. 1. ed. Rio de Janeiro: CEPEL-DTE-CRESEB, v. 1, 2014. 530 p. ISBN 9788599714102.

POULEK, V.; LIBRA, M. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, n. 51, p. 113 - 120, 1998.

REDA, I.; ANDREAS, A. Solar position algorithm for solar radiation applications. **Elsevier - Solar Energy**, v. 76, n. 5, p. 577–589, 2004.

REN21. Renewables 2016 - Global Status Report. **REN21 Renewable Energy Policy Network for the 21st Century**, 2016. Disponível em: <<http://www.ren21.net/status-of-renewables/global-status-report/>>. Acesso em: 23 maio 2016.

RITEK. RITEK Corporation. **riteksolar**. Disponível em: <http://www.riteksolar.com.tw/eng/p2-solar_modules.asp>. Acesso em: 2016 junho 18.

ROHDE, R. A. Solar Spectrum. **Wikimedia**, 14 maio 2009. Disponível em: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Solar_Spectrum.png>. Acesso em: 28 maio 2016.

ROHDE, R. A. Phys. **Phys.org**, 07 Janeiro 2015. Disponível em: <<http://phys.org/news/2015-01-sun-lifespan-birth.html>>. Acesso em: 13 março 2016. GNU General Public License.

ROTH, P.; GEORGIEV, A.; BOUDINOV, H. Design and construction of a system for sun-tracking. **Renewable Energy**, p. 393–402, 29 Julho 2003. ISSN 10.1016/S0960-1481(03)00196-4.

SHALÍMOVA, K. V. **Física de los Semiconductores**. [S.l.]: Mir, 1975. ISBN 84-401-0947-4.
SOHAG, H. A. et al. An accurate and efficient solar tracking system using image processing and LDR sensor. **Electrical Information and Communication Technology (EICT), 2015 2nd International Conference on**, p. 522 - 527, 10-12 dezembro 2015. ISSN 10.1109/EICT.2015.7392008.

SOLARGIS. GIS data and maps. **SOLARGIS solar resource maps**, 21 maio 2014. Disponível em: <<http://solargis.com/products/maps-and-gis-data/free/download/latin-america>>.

SOLARGIS. GIS data and maps. **SOLARGIS solar resource maps**, 2015. Disponível em: <<http://solargis.com/products/maps-and-gis-data/free/download/>>. Acesso em: 21 maio 2016.

SURIA, A. K.; IDRIS, R. M. Dual-axis solar tracker based on predictive control algorithms. **2015 IEEE Conference on Energy Conversion (CENCON)**, p. 238 - 243, 19-20 Outubro 2015. ISSN 10.1109/CENCON.2015.7409546.

TIBA, C. et al. **Atlas Solarimétrico do Brasil: banco de dados solarimétricos**. 1ª Edição. ed. Recife: Universitária da UFPE, v. 1, 2000. 111 p. ISBN 621.31244.

TOLMASQUIM, M. T. **Fontes renováveis de energia no Brasil**. 1ª Edição. ed. Rio de Janeiro: CENERGIA, COPPE, v. 1, 2003. 515 p. ISBN 9788571930957.

VIDEIRA, A. A. P. **As descobertas astronômicas de Galileu Galilei**. 1ª Edição. ed. [S.l.]: [s.n.], v. 1, 2009. 119 p. ISBN 9788588782617.

WILLIAMS, D. Sun Fact Sheet. **Space Science Data Coordinated Archive**, 29 fevereiro 2016. Disponível em: <<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/sunfact.html>>. Acesso em: 30 maio 2016.

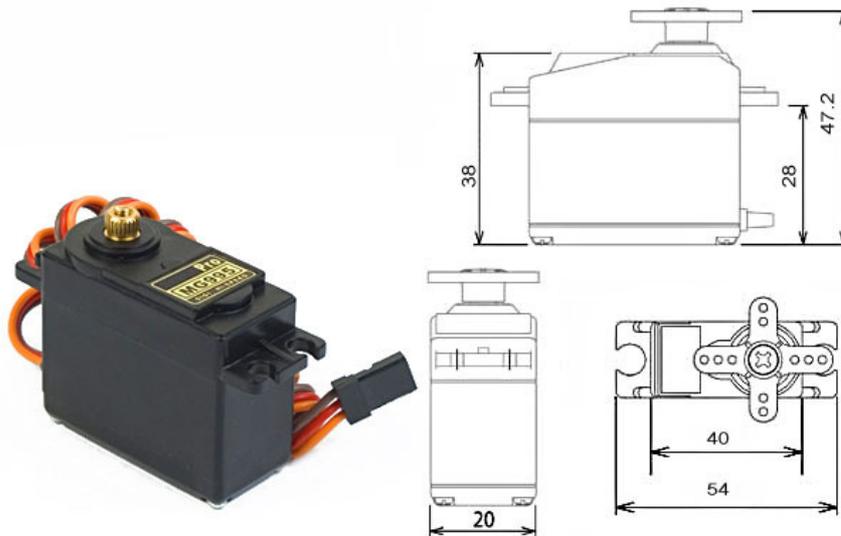
YAO, Y. et al. A multipurpose dual-axis solar tracker with two tracking strategies. **Renewable Energy**, v. 72, p. 88–98, Dezembro 2014. ISSN 10.1016/j.renene.2014.07.002.

YILMAZ, S. et al. Design of two axes sun tracking controller with analytically solar radiation calculations. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 43, p. 997–1005, Março 2015. ISSN 10.1016/j.rser.2014.11.090.

ZHENG, C.; M.CHENG, D. An Innovation-Focused Roadmap for a Sustainable Global Photovoltaic Industry. **Energy Policy**, Abril 2014. 159–169.

ANEXO A – SERVO MOTOR MG995

MG995 High Speed Metal Gear Dual Ball Bearing Servo



The unit comes complete with 30cm wire and 3 pin 'S' type female header connector that fits most receivers, including Futaba, JR, GWS, Cirrus, Blue Bird, Blue Arrow, Corona, Berg, Spektrum and Hitec.

This high-speed standard servo can rotate approximately 120 degrees (60 in each direction). You can use any servo code, hardware or library to control these servos, so it's great for beginners who want to make stuff move without building a motor controller with feedback & gear box, especially since it will fit in small places. The MG995 Metal Gear Servo also comes with a selection of arms and hardware to get you set up nice and fast!

Specifications

- Weight: 55 g
- Dimension: 40.7 x 19.7 x 42.9 mm approx.
- Stall torque: 8.5 kgf·cm (4.8 V), 10 kgf·cm (6 V)
- Operating speed: 0.2 s/60° (4.8 V), 0.16 s/60° (6 V)
- Operating voltage: 4.8 V a 7.2 V
- Dead band width: 5 μs
- Stable and shock proof double ball bearing design
- Temperature range: 0 °C – 55 °C