

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
CURSO DE ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO**

ALESSANDRO CANTONI

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE UM ALGORITMO FUZZY PARA
POSICIONAMENTO DE PLACAS FOTOVOLTAICAS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2017

ALESSANDRO CANTONI

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE UM ALGORITMO FUZZY PARA
POSICIONAMENTO DE PLACAS FOTOVOLTAICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso, do curso de Engenharia de Controle e Automação do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT), da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Dr. Amauri Amorin Assef

CURITIBA

2017

Alessandro Cantoni

Avaliação de um algoritmo fuzzy para o posicionamento de placas fotovoltaicas

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação foi julgado e aprovado como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro de Controle e Automação do curso de Engenharia de Controle e Automação do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Curitiba, 22 de novembro de 2017.

Prof. Paulo Sergio Walenia, Esp.
Coordenador de Curso
Engenharia de Controle e Automação

Prof. Amauri Amorin Assef, Dr.
Responsável pelos Trabalhos de Conclusão de Curso
de Engenharia de Controle e Automação do DAELT

ORIENTAÇÃO

Prof. Amauri Amorin Assef, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Orientador

BANCA EXAMINADORA

Prof. Amauri Amorin Assef, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Daniel Balieiro Silva, Me.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Profa. Mariana Antonia Aguiar Furucho, Ma.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

A folha de aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia de Controle e Automação.

AGRADECIMENTOS

À Deus por minha vida, família e amigos.

Ao Prof. e Orientador Dr. Amauri Amorin Assef pela oportunidade e apoio na elaboração deste trabalho.

Agradeço aos meus pais, pelo amor, carinho, paciência e seus ensinamentos.

À Lara Elisia Buchweitz Batalha pelo inestimável apoio, paciência e compreensão.

À todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

RESUMO

CANTONI, Alessandro. Avaliação do desempenho de um algoritmo de posicionamento de placas fotovoltaicas. 2017. 89p. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) – Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

A exploração da energia solar para geração de energia elétrica surge como um substituto interessante em relação às fontes fósseis. Neste cenário, métodos que otimizem a obtenção de energia elétrica pela via solar tornam-se indispensáveis. Para tal, este projeto objetiva o desenvolvimento de um algoritmo baseado em lógica fuzzy para o uso em sistemas de rastreamento solar, para posicionamento das placas fotovoltaicas. Para a avaliação do algoritmo, utilizou-se uma placa fotovoltaica e estrutura de pequeno porte. O sistema de posicionamento possui dois graus de liberdade: azimute e inclinação. O azimute indica a posição horizontal da placa, enquanto a inclinação indica a posição vertical. O sistema é movimentado através de dois servomotores. Usam-se quatro sensores fotoresistores para identificar a posição do Sol através do controlador fuzzy e, assim, mover a estrutura para a direção de maior eficiência energética para a placa fotovoltaica. O controle da estrutura é feito por Arduino, por meio de uma biblioteca fuzzy desenvolvida para sistemas embarcados. O projeto avalia o desempenho do sistema de rastreamento em relação a um sistema fixo para a verificação da viabilidade de implementação do algoritmo. O algoritmo obteve êxito para o posicionamento da placa fotovoltaica.

Palavras-chave: Lógica Fuzzy. Arduino. Rastreamento Solar. Placa Fotovoltaica.

ABSTRACT

CANTONI, Alessandro. Performance evaluation of a positioning algorithm for photovoltaic panels. 2017. 89p. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) – Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

The exploitation of solar energy to generate electricity is an interesting substitute to fossil sources of energy. With this in mind, methods that optimize electricity generation through solar power are essential. For that, this project focuses on the development of an algorithm based on Fuzzy logic for the usage of solar tracking systems, in order to position solar panels. The algorithm was evaluated using a photovoltaic panel and a small-sized structure. The positioning system operates two degrees of freedom: azimuth and inclination. The azimuth refers to the horizontal position of the panel, while the inclination refers to the vertical position. Two servomotors move the system. Four photoresistor sensors are used to identify the position of the Sun through the Fuzzy controller, and so, to move the structure to the correct position. The structure is controlled by Arduino, with a specifically developed library for embedded systems. The project evaluates the performance of the tracking system compared to a fixed one, in order to check the feasibility of the algorithm implementation. The algorithm succeeded in positioning the photovoltaic panel.

Keywords: Fuzzy Logic. Arduino. Solar Tracking. Solar Panel.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Crescimento cumulativo global da capacidade fotovoltaica.	19
Figura 2 – Média Anual do total diário de irradiação solar incidente no Brasil.	20
Figura 3 – Esquemático de ligação dos componentes de um sistema fotovoltaico.	23
Figura 4 – Circuito elétrico equivalente de uma célula fotovoltaica.	25
Figura 5 – Curva I-V de um módulo comercial.	27
Figura 6 – Curvas características de um painel para diferentes potências incidentes em temperatura ambiente.	28
Figura 7 – Curvas características de um painel para diversas temperaturas sob radiação incidente de 1000 W/m ²	28
Figura 8 – Efeito da resistência em série nas curvas I-V e P-V do painel.	29
Figura 9 – Efeito da resistência em paralelo nas curvas I-V e P-V do painel.	29
Figura 10 – Relações geométricas Sol-Terra-Painel Solar.	31
Figura 11 – Seguidor polar de eixo único.	33
Figura 12 – Seguidor de eixo horizontal.	34
Figura 13 – Seguidor de eixo vertical ou azimutal em edifício.	34
Figura 14 – Estrutura do seguidor polar de dois eixos comercial.	35
Figura 15 – Estrutura do seguidor de dois eixos com plataforma rotativa.	36
Figura 16 – Exemplo de funcionamento do seguidor solar passivo.	37
Figura 17 – Modelo de um seguidor solar terrestre baseado em células solares bifaciais.	39
Figura 18 – Aspecto construtivo do LDR e seu encapsulamento.	41
Figura 19 – Comportamento da Resistência pela Luminosidade num LDR de 5 mm.	42
Figura 20 – Comportamento da corrente pela tensão num diodo no escuro e na presença de luz, para dois valores de potência luminosa.	43
Figura 21 – Símbolo de um fotodiodo à esquerda e aplicação do mesmo num circuito simples para detecção de radiação à direita.	43
Figura 22 – Estrutura do foto-transistor, seu circuito equivalente e sua simbologia.	44
Figura 23 – Exemplo de variável linguística Temperatura.	47
Figura 24 – Estrutura de um controlador nebuloso.	47
Figura 25 – Representação de coordenadas esféricas.	51
Figura 26 – Representação do azimute e elevação solar.	52
Figura 27 – Deslocamento em relação a coordenadas cartesianas.	53
Figura 28 – Função Triangular - FuzzySet* fs = FuzzySet(10, 20, 20, 30).	56
Figura 29 – Função de Pertinência para o LDR norte.	58
Figura 30 – Função de pertinência para o LDR sul.	58
Figura 31 – Função de pertinência para o LDR leste.	59
Figura 32 – Função de pertinência para o LDR oeste.	59
Figura 33 – Função de pertinência relativa ao azimute.	60

Figura 34 – Função de pertinência relativa à elevação solar.	60
Figura 35 – Funções de pertinência totais para a entrada LDRN.....	62
Figura 36 – Funções de pertinência totais para a entrada LDRS.....	62
Figura 37 – Funções de pertinência totais para a entrada LDRL.	63
Figura 38 – Funções de pertinência totais para a entrada LDRO.	63
Figura 39 – Funções de pertinência totais para a saída Azimute.....	64
Figura 40 – Funções de pertinência totais para a saída Elevação.....	64
Figura 41 – Fluxograma do Algoritmo implementado.....	66
Figura 42 – Estrutura com sombreamento.	67
Figura 43 – Disposição dos sensores.	68
Figura 44 – Estrutura com os sensores.....	68
Figura 45 – Divisores de tensão dos LDRs.	69
Figura 46 – Circuito divisor de tensão para os LDR.	70
Figura 47 – Servomotor 9G SG 90.....	71
Figura 48 – Estrutura para servomotores.	71
Figura 49 – Placa Fotovoltaica.	72
Figura 50 – Esquemático elétrico de potência.....	74
Figura 51 – Circuito de potência para a placa fixa.	74
Figura 52 – Estrutura fixa.	75
Figura 53 – Esquema de montagem do protótipo: Visão superior.....	76
Figura 54 – Esquema de montagem do protótipo: Visão inferior.....	77
Figura 55 – Estruturas no local de teste.....	78
Figura 56 – Estrutura sob outra vista no local de teste.	79
Figura 57 – Avaliação do posicionamento para o dia 21/08/2017.	80
Figura 58 – Erro para o posicionamento para o dia 21/08/2017.....	80
Figura 59 – Avaliação do posicionamento para o dia 22/08/2017.....	81
Figura 60 – Erro do posicionamento para o dia 22/08/2017.....	81
Figura 61 – Avaliação do posicionamento para o dia 24/08/2017.....	82
Figura 62 – Erro do posicionamento para o dia 24/08/2017.....	82
Figura 63 – Avaliação de desempenho das placas para o dia 21/08/2017.	83
Figura 64 – Avaliação de desempenho das placas para o dia 22/08/2017.	83
Figura 65 – Avaliação de desempenho das placas para o dia 24/08/2017.	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Avanço nos mercados de energia fotovoltaica.	19
Tabela 2 – Comparativo da Eficiência dos Tipos de Células Fotovoltaicas.	25
Tabela 3 – Características dos Fotodetectores.	44
Tabela 4 – Valores usados para a construção das funções de pertinência.	61

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

A_e	Área Efetiva da Perna Central do Núcleo
AM	<i>Air Mass</i>
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
a_s	Ângulo azimutal do Sol
a-Si	Silício Amorfo
a_w	Ângulo Azimutal de Superfície
A_w	Área da Janela
AWG	<i>American Wire Gauge</i>
b	Constante característica do material do LDR
B_{max}	Máxima Densidade de Fluxo Magnético
CC	Corrente Contínua
CdS	Sulfeto de Cádmio
CdTe	Telureto de Cádmio
Cf	Capacitor do Circuito de Topologia Básica
CIGS	Disseleneto de Cobre e Índio Gálio
CIS	Disseleneto de Cobre e Índio
COA	<i>Center of Area</i>
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FOM	<i>First of Maximum</i>
I	Intensidade da radiação solar
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
I_{LDR}	Intensidade da radiação no LDR
Imp	Corrente em Máxima Potência
ISC	Corrente de Curto Circuito
I-V	Corrente por Tensão
K	Fator de Enrolamento
K	Fator de Conversão W/m^2 para Lux
L	Luminosidade que incide sobre o LDR
LDR	<i>Light Dependent Resistor</i>
LDRL	LDR Leste
LDRN	LDR Norte
LDRO	LDR Oeste
LDRS	LDR Sul
Lf	Indutor do Circuito de Topologia Básica
MOM	<i>Middle of Maximum</i>
MPP	Ponto de Máxima Potência
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
R	Resistência da carga para a placa fotovoltaica
R_{DARK}	Resistência do LDR sem presença de luminosidade
RISC	<i>Reduced Instruction Set Computer</i>
R_{LDR}	Resistência do LDR com presença de luminosidade

Rp	Resistência em Paralelo
Rs	Resistência em Série
RSE	Resistência Série Equivalente
STC	<i>Standard Test Condition</i>
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
USB	Universal Serial Bus
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
V	Distância entre a origem e o ponto de referência
V _{in}	Tensão de Entrada
V _L	Distância entre o ponto leste e o ponto de referência
V _{mpp}	Tensão Potência de Máxima
V _N	Distância entre o ponto norte e o ponto de referência
V _O	Distância entre o ponto oeste e o ponto de referência
V _{oc}	Tensão de Circuito Aberto
V _{out}	Tensão de Saída
V _S	Distância entre o ponto sul e o ponto de referência
X	Eixo das abscissas
Y	Eixo das ordenadas
Z	Eixo das cotas
α	Altura Solar
γ	Ângulo de Incidência
θ _z	Ângulo Zenital
ω	Hora Angular

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 PROBLEMAS E PREMISSAS	14
1.2 OBJETIVO GERAL	14
1.2.1 Objetivos específicos	14
1.3 JUSTIFICATIVA	15
1.4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	15
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO	16
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1 ENERGIA SOLAR	17
2.1.1 Histórico e panorama mundial da energia solar	18
2.1.2 Panorama fotovoltaico brasileiro e seu potencial	18
2.2 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	21
2.2.1 Componentes de um sistema fotovoltaico	22
2.2.2 Célula Fotovoltaica	22
2.2.2.1 Modelo elétrico da célula fotovoltaica	25
2.2.3 Painel fotovoltaico	26
2.2.3.1 Fatores que influenciam a eficiência	26
2.2.3.1.1 <i>Radiação solar</i>	26
2.2.3.1.2 <i>Temperatura</i>	27
2.2.3.1.3 <i>Resistências Internas</i>	27
2.3 POSICIONAMENTO SOLAR	29
2.4 MÉTODOS DE RASTREAMENTO SOLAR	31
2.4.1 Seguidor solar quanto a metodologia de movimentação	32
2.4.1.1 Seguidor polar de eixo único	33
2.4.1.2 Seguidor de eixo horizontal	33
2.4.1.3 Seguidor de eixo vertical ou azimutal	34
2.4.1.4 Seguidor polar de dois eixos	35
2.4.1.5 Seguidor de dois eixos com plataforma rotativa	36
2.4.2 Seguidor solar quanto a metodologia de controle	36
2.4.2.1 Seguidor solar passivo	37
2.4.2.2 Seguidor solar ativo	38
2.4.2.2.1 <i>Seguidor ativo com microprocessador e sensores optoeletrônicos</i>	38
2.4.2.2.2 <i>Seguidor ativo baseado em células solares bifaciais auxiliares</i>	38
2.4.2.2.3 <i>Seguidor ativo baseado em algoritmos cronológicos (data e horário)</i>	39
2.5 SENSORES DE LUMINOSIDADE	40
2.5.1 Foto-resistor (LDR)	40
2.5.2 Fotodiodo e Foto-transistor	42
2.6 MICROCONTROLADOR	44

2.7 LÓGICA FUZZY	45
2.7.1 Controladores nebulosos	46
2.7.1.1 Interface de fuzzyficação	48
2.7.1.2 Base de Conhecimento	48
2.7.1.3 Procedimento de Inferência	48
2.7.1.4 Interface de desfuzzyficação	49
3 MODELO DE PREVISÃO DO COMPORTAMENTO DOS LDR	51
4 LÓGICA FUZZY PARA RASTREAMENTO	56
4.1 BIBLIOTECA FUZZY	56
4.2 DESENVOLVIMENTO DO ALGORITMO FUZZY PARA RASTREAMENTO	57
5 PROTÓTIPO PARA TESTE	65
5.1 PLATAFORMA MICROCONTROLADORA ARDUINO®	65
5.1.1 Firmware	65
5.2 ESTRUTURA DE SENSORES	67
5.2.1 Circuito divisor de tensão para LDR	69
5.3 SERVOMOTORES	70
5.4 ESTRUTURA DE FIXAÇÃO PARA SERVOMOTORES	71
5.5 PLACA FOTOVOLTAICA	72
5.5.1 Circuito de Potência	72
5.5.2 Estrutura fixa	75
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO	78
7 CONCLUSÕES	85
8 REFERÊNCIAS	86
APÊNDICE A - CÓDIGO	90

1 INTRODUÇÃO

Ao longo de sua história, a humanidade dependeu de alguma forma de energia para sobreviver e se desenvolver. Entre tantas possibilidades, a principal fonte de energia foi, e ainda hoje é a de origem fóssil. Os combustíveis dessa natureza possuem um papel determinante na geração de energia mundial. Tal fato, entretanto, traz consigo problemas de cunho ambiental e econômico. Portanto, torna-se emergencial a necessidade de alterar a principal fonte energética mundial para fontes renováveis e sustentáveis. Nesse cenário, a energia solar surge como uma forte alternativa. De toda a radiação solar incidente no planeta Terra, cerca de 47% é absorvida pela superfície terrestre (TRENBERTH *et al.*, 2015). Isso equivale a 94 mil Tera-Watts/hora e, com tal potência absorvida, duas horas de irradiação supririam a demanda energética mundial anual (PINHO *et al.*, 2014).

Entretanto, mesmo com tamanho potencial, não é uma fonte renovável largamente difundida. As energias renováveis, como a solar, representam menos de 10% da geração de energia para consumo global, uma parcela muito pequena se comparada à potencialidade dessa fonte (BRITISH PETROLEUM, 2015).

O principal empecilho para o aproveitamento da energia solar é o custo elevado da tecnologia atual de captação e sua baixa eficiência. Outros sistemas, como coletores solares, utilizados para aquecimento de água, e sistemas termo solares, que trabalham com a concentração dos raios, para então transformá-los em energia elétrica, também são possibilidades para aproveitamento dessa fonte energética. Entretanto, nenhuma destas opções é utilizada em grande escala.

Tratando-se especificamente de placas fotovoltaicas, para geração de energia elétrica, o sistema fixo garante um máximo rendimento somente num período do dia, quando o sol está perfeitamente sobre a placa. Uma possibilidade de aprimoramento deste modelo está no desenvolvimento de um processo de rastreamento solar eficiente que possibilite às placas fotovoltaicas receber a incidência solar perpendicular pelo maior tempo possível.

1.1 Problemas e premissas

A demanda por energia no cenário brasileiro tende a dobrar até o ano de 2050, se comparada ao consumo do ano de 2013 (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2013), e é de fundamental importância refletir sobre os seus aspectos: como ela é utilizada, a forma como é gerada e de que maneira pode-se melhorar esse processo. Embora a energia solar venha ganhando espaço nas últimas décadas, ainda representa uma pequena porcentagem da energia gerada para o consumo global (BRITISH PETROLEUM, 2015). É esperado que surjam indagações sobre a utilização de sistemas de rastreamento solares, sobre sua viabilidade e vantagens em relação à estrutura fixa.

1.2 Objetivo geral

O objetivo do presente trabalho consiste em desenvolver um algoritmo de rastreamento solar baseado em lógica fuzzy. A estrutura usada para o teste do algoritmo é de pequenas dimensões, envolvendo dois servomotores e uma placa fotovoltaica acoplada à estrutura. Além disso, utilizou-se uma estrutura fixa com outra placa fotovoltaica de mesma capacidade, para posterior análise de desempenho em relação à móvel. Todo o sistema é controlado via microcontrolador.

1.2.1 Objetivos específicos

- a. Adaptar a estrutura física de modo a garantir a integridade dos circuitos eletrônicos que compõem o *hardware* de controle;
- b. Revisão do sistema de acionamento dos dispositivos eletromecânicos de modo a permitir o deslocamento simultâneo de ambos os eixos;
- c. Desenvolver um controlador nebuloso (fuzzy) que, a partir da combinação dos valores do diferencial de tensão promovido pela incidência luminosa sobre fotodetectores, mesmo com as incertezas condicionadas pela variação na amplitude dos sinais de tensão em cada sensor, seja capaz de identificar de maneira precisa a posição em que o painel fotovoltaico recebe radiação solar com melhor ângulo de perpendicularidade;

- d. Testar e comparar o comportamento dos fotodetectores de maneira a selecionar sistematicamente aquele que possui sensibilidade, tempo de resposta e circuito de aplicação mais adequado às necessidades do controlador nebuloso.

1.3 Justificativa

Tendo em vista o problema global de demanda energética, sabe-se que uma das soluções é a utilização da energia solar. Para que essa alternativa se firme diante das outras, sua eficiência deve ser maximizada e colocada à prova. Em paralelo com as características fotovoltaicas de um painel solar, uma das maneiras de potencializar seu desempenho pode ser um sistema de rastreamento da trajetória do sol eficaz e preciso. Para tal, é necessário que sejam realizados testes do sistema utilizado para a realização do rastreamento, comprovando a viabilidade para a sua aplicação em ambientes reais.

1.4 Procedimentos Metodológicos

O desenvolvimento deste projeto foi realizado a partir da pesquisa e desenvolvimento de uma forma de rastreamento mais eficaz em relação à atual, baseando-se nos seguintes passos:

- a. Seleção de uma estrutura pré-fabricada com a adaptação possível para a utilização neste projeto;
- b. Seleção de hardware que possibilite o acionamento simultâneo de dois motores, neste caso, de servomotores;
- c. Revisão dos fundamentos de lógica nebulosa de maneira a modelar a interface de fuzzyficação adequada ao comportamento dos sensores, escolher o modelo de procedimento de inferência mais adequado ao conjunto de dados e regras, selecionar um modelo de interface de desfuzzyficação de maneira a garantir uma única, precisa e consistente ação de controle.

1.5 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho será dividido da seguinte forma:

- a. Capítulo 2: Fundamentação teórica acerca do fenômeno fotovoltaico, estudo das variáveis intrínsecas à trajetória solar e apresentação dos modelos de rastreamento solar disponíveis atualmente (algoritmos e estrutura física);
- b. Capítulo 3: Modelo matemático para previsão do posicionamento;
- c. Capítulo 4: Desenvolvimento do modelo de rastreamento solar por meio da utilização de lógica fuzzy, a partir do modelo matemático de previsão do posicionamento;
- d. Capítulo 5: Construção do protótipo para teste do algoritmo fuzzy;
- e. Capítulo 6: Resultados e Discussão;
- f. Capítulo 7: Conclusão.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Energia solar

O sol é uma esfera incandescente de gás que realiza, em seu núcleo, fusões nucleares transformando partículas de hidrogênio em hélio (COSMICOPIA, 2012). Tem-se como produto deste fenômeno a geração de energia, que é dissipada na forma de calor e luz. Por este fato, o astro assume um fundamental papel na manutenção da vida na Terra. É responsável por manter a água do planeta em estado líquido, condição primordial para a existência de vida (COSMICOPIA, 2012).

Da energia solar, ainda, derivam-se outros tipos de energia, tais como a eólica e a hidrelétrica. O sol é quem rege os principais eventos atmosféricos. Por meio do aquecimento não uniforme da superfície terrestre, criam-se zonas com diferenças na pressão do ar. As regiões de ar sob altas pressões movimentam-se para aquelas de baixa pressão, criando-se assim os ventos. Estes podem ser usados para movimentar aerogeradores e gerar energia elétrica. Além disso, o ciclo da água ocorre pelo calor solar, pois faz com que água altere o seu estado físico e assim, retorne às represas podendo ser usada para a geração hidrelétrica (PINHO *et al.*, 2015).

O aproveitamento da energia solar dá-se de três formas (BLUESOL, 2014):

- a. Arquitetura Bioclimática: baseia-se em maneiras de usufruir da luz e calor solares por meio da integração arquitetônica da construção ao clima local. Desta forma, pode-se economizar energia elétrica ao se dispensar o uso da iluminação artificial durante o dia;
- b. Efeito Foto-térmico: trata-se da absorção da irradiação solar e sua transformação em calor. Este princípio é usado em sistemas de aquecimento solar. É um bom complemento aos sistemas fotovoltaicos, pois gera de forma eficaz e barata, a energia necessária ao aquecimento da água;
- c. Efeito Fotovoltaico: trata-se da transformação da energia luminosa do sol em energia elétrica. Ele consiste no surgimento de uma diferença de potencial nos terminais de um semicondutor, quando a luz é absorvida. Este é o funcionamento de uma célula fotovoltaica, a unidade básica de todo sistema fotovoltaico.

2.1.1 Histórico e panorama mundial da energia solar

O efeito fotovoltaico foi observado primeiramente em 1839, por Edmond Becquerel. Em 1876 foi desenvolvido o primeiro dispositivo fotovoltaico e, somente em 1956, iniciou-se a produção industrial (BLUESOL, 2014). O estudo da tecnologia se deu, inicialmente, por empresas do setor de telecomunicações que buscavam soluções para fornecer energia para sistemas situados em locais longínquos. O segundo foi a “corrida espacial”. O uso de células fotovoltaicas era, e continua sendo, a maneira mais efetiva para geração da energia necessária para alimentar equipamentos eletroeletrônicos no espaço (BLUESOL, 2014).

No final da década de 90, impulsionadas pelo comprometimento com a redução de dióxido de carbono (Protocolo de Kyoto) e por interesses econômicos, surgiram políticas de governo na Alemanha e Japão que estimularam o desenvolvimento do mercado fotovoltaico.

Segundo a Agência Internacional de Energia, desde 2003, a capacidade instalada de geração fotovoltaica cresceu a uma média de 49% por ano. Em 2013, cerca de 37 GW de nova capacidade foi instalada em cerca de 30 países, alcançando uma capacidade global acima de 135 GW, conforme ilustrado na Figura 1 e apresentado na Tabela 1 (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2014).

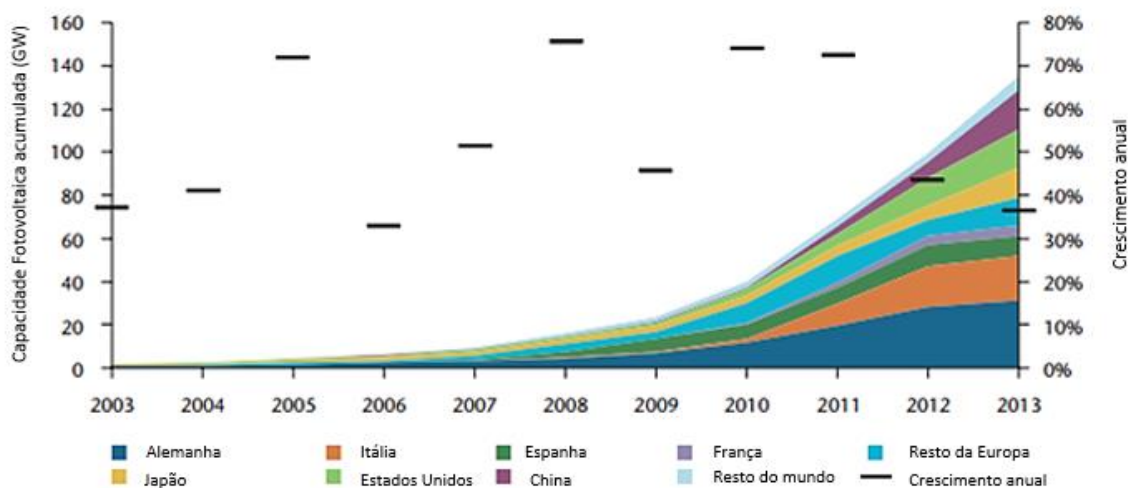
Ainda de acordo com a Agência Internacional de Energia, espera-se que a energia solar atinja uma parcela de 16% da matriz energética mundial em 2050 (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2014). Entretanto, para tal, é necessário superar alguns obstáculos, tais como: falta de políticas governamentais de incentivo ao uso por meio de subsídios para reduzir o custo do sistema ao consumidor final; redução de custos de fabricação por meio de desenvolvimento tecnológico; e aperfeiçoamento dos sistemas de transmissão e distribuição de energia, para que tenham condições de receber a energia de sistemas fotovoltaicos ligados à rede (*On-Grid*) (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2014).

2.1.2 Panorama fotovoltaico brasileiro e seu potencial

O território brasileiro recebe grandes quantidades de irradiação solar ao ser comparado com países europeus, locais onde existe maior disseminação da

tecnologia fotovoltaica. O mapa da Figura 2 ilustra a média anual do total diário de irradiação solar incidente no Brasil.

Figura 1 – Crescimento cumulativo global da capacidade fotovoltaica.



Fonte: Agência de Energia Internacional (2013).

Tabela 1 – Avanço nos mercados de energia fotovoltaica.

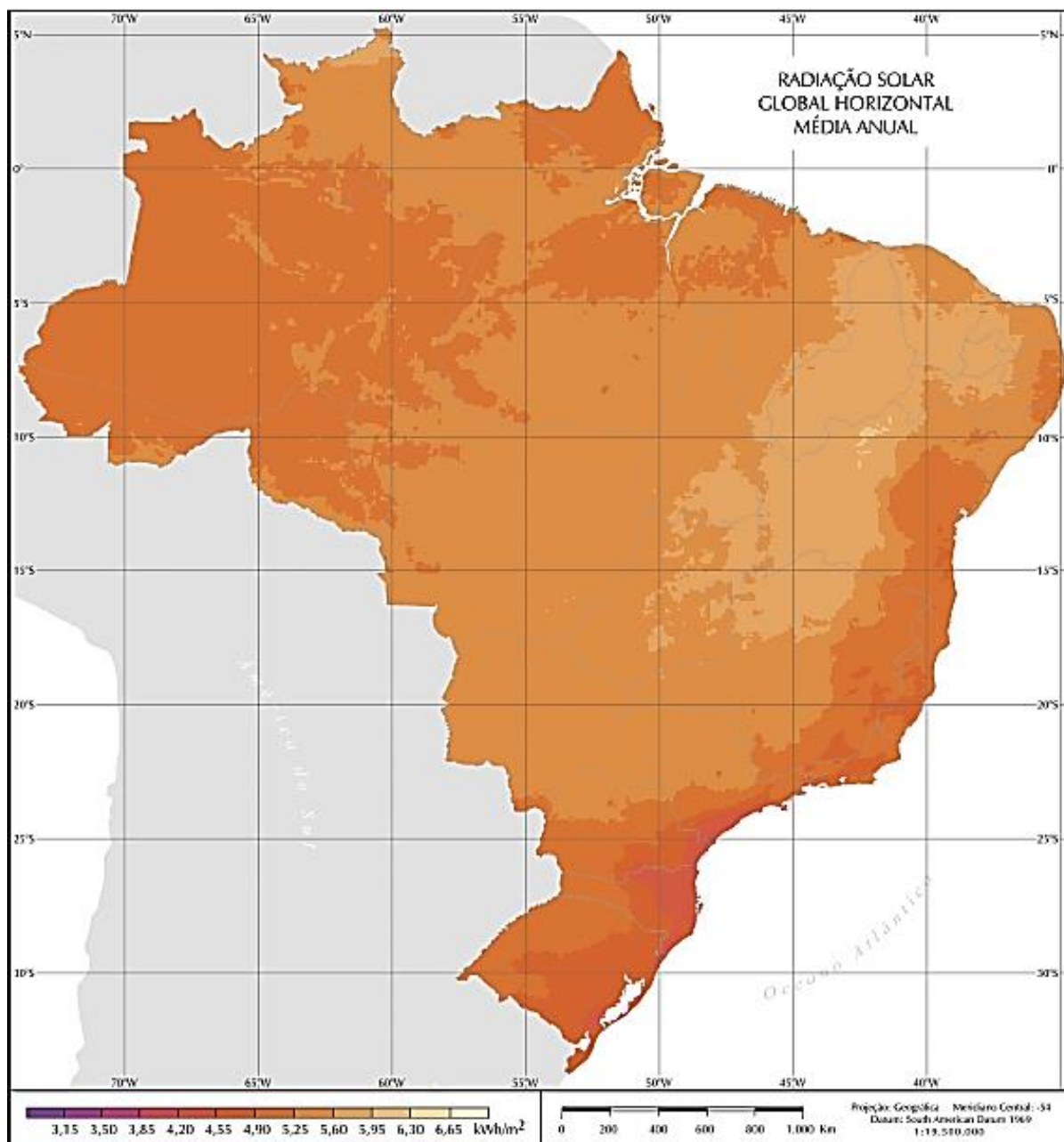
	Final de 2009	Final de 2013
Capacidade instalada total	23GW	135 GW
Capacidade instalada anual	7GW	37 GW
Investimento anual	\$48 bilhões	\$96 bilhões
Número de países com >1 GW instalado	5	17
Número de países com mercado anual >100 MW	9	23
Eletricidade fotovoltaica gerada durante o ano	20 TWh	139 TWh
Níveis de penetração fotovoltaica	% de consumo elétrico anual	
Europa		2,60%
Alemanha		5,30%
Itália		7%

Fonte: Adaptado de International Energy Agency (2013).

Mesmo com diversos aspectos climáticos presentes no Brasil, observa-se que a média anual de irradiação global tem boa uniformidade. Os índices de irradiação solar global incidente em qualquer região do território brasileiro (1500-2500 kWh/m²) são superiores aos da maioria dos países da União Europeia, como Alemanha (900-1250 kWh/m²), França (900-1650kWh/m²) e Espanha (1200-1850 kWh/m²) (PEREIRA

et al, 2006). Mesmo com tal potencial o desenvolvimento de sistemas fotovoltaicos no Brasil evolui lentamente.

Figura 2 – Média Anual do total diário de irradiação solar incidente no Brasil.



Fonte: Pereira et al. (2006).

Somente em 2011, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) lançou a chamada no 13/2011 para um projeto de pesquisa e desenvolvimento chamado “Arranjos Técnicos e Comerciais Para a Inserção da Geração Fotovoltaica na Matriz

Energética Brasileira” (PINHO *et al*, 2015). Foram escolhidos 18 projetos de sistemas fotovoltaicos centralizados conectados à rede elétrica totalizando uma potência instalada de 24 MW. Em 2013, ocorreu o primeiro Leilão de Energia (A-3) no qual os empreendimentos de geração fotovoltaicos foram permitidos pelo EPE (Empresa de Pesquisa Energética) (PINHO *et al*, 2015).

2.2 Sistemas fotovoltaicos

Um sistema fotovoltaico é uma fonte geradora de energia que transforma a energia luminosa solar em energia elétrica, graças ao efeito fotovoltaico.

As vantagens de se utilizar os sistemas fotovoltaicos são as seguintes (PINHO *et al*, 2015):

- a. Usar uma matéria-prima praticamente inesgotável: a energia solar. Estima-se que o Sol ainda tenha reservas de hidrogênio para realizar suas fusões nucleares por mais de 5 bilhões de anos;
- b. A produção de eletricidade não envolve a emissão de poluentes, aspecto imprescindível quando se vive em uma realidade cada vez mais preocupada com as mudanças climáticas oriundas do aquecimento global;
- c. Possibilidade de instalação em qualquer local, além da possibilidade de utilização em zonas afastadas da rede de distribuição elétrica;
- d. Possibilidade de aumento de potência instalada através da adição de módulos extras.

Por outro lado, também há limitações (PINHO *et al*, 2015):

- a. A energia solar disponível em um local varia ao longo do ano e sua captação pode ser afetada dependendo das condições climáticas;
- b. Os dispositivos de captação e conversão envolvem um alto investimento inicial.

Os sistemas fotovoltaicos são classificados de acordo com a maneira de geração ou entrega da energia elétrica. Nesta última classificação, os sistemas dividem-se em (BLUESOL, 2014):

- a. Isolados: não possuem contato com a rede elétrica de distribuição. Estes por sua vez podem ser divididos em híbridos, que trabalham em conjunto com um sistema

de geração auxiliar, como o eólico, e autônomos, que não possuem uma forma de geração complementar. Estes sistemas podem ou não ter um método de armazenamento de energia. Quando sim, o armazenamento tem autonomia menor ou igual a um dia;

- b. *On-Grid*: toda a energia gerada é escoada para as redes de distribuição. Estes sistemas não utilizam sistemas de armazenamento de energia.

Os sistemas fotovoltaicos podem ainda ser classificados quanto a sua mobilidade (TREVELIN, 2014):

- a. Fixos: caracterizam-se por possuir os módulos fotovoltaicos posicionados em um determinado ângulo fixo. Trata-se de uma angulação otimizada para permitir uma melhor incidência da radiação solar sobre os módulos. Normalmente, a nível do mar, este ângulo seria o ponto médio da variação de ângulo do posicionamento do Sol, sentido Norte-Sul e Leste-Oeste;
- b. Móveis: Estes sistemas contam com um método de rastreamento solar que permite que os painéis sejam incididos perpendicularmente pela radiação solar ao longo do dia. Desta forma, tem-se uma eficiência energética otimizada. Estes sistemas são também conhecidos por rastreadores ou seguidores solares.

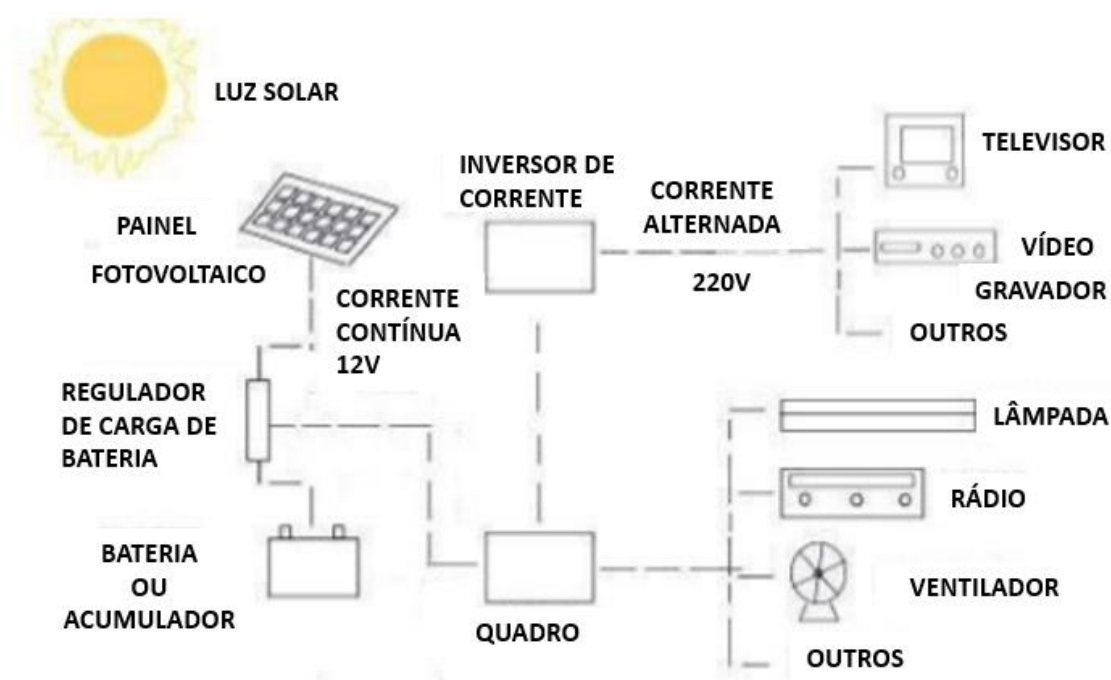
2.2.1 Componentes de um sistema fotovoltaico

Conforme apresentado na Figura 3, um sistema fotovoltaico é composto basicamente por painéis ou módulos de células fotovoltaicas, controlador de carga de baterias, banco de baterias e inversor de corrente.

2.2.2 Célula Fotovoltaica

É a unidade básica de um sistema fotovoltaico. As células solares mais comuns são feitas de silício, por se tratar do segundo material mais abundante da natureza e por possuir as características de um semicondutor. Este metal, porém, encontra-se naturalmente ligado a outros materiais como dióxido de silício e silicatos, na forma de areia e quartzo. (SOLARTERRA, 2008).

Figura 3 – Esquemático de ligação dos componentes de um sistema fotovoltaico.



Fonte: Solarterra Energias Alternativas (2008).

A obtenção do silício dá-se pela sua extração da areia. A areia possui um alto teor de impurezas, e, portanto, deve passar por um processo de purificação. Este processo resulta na elevação dos custos de produção das células.

Entretanto, o cristal de silício puro é ausente de elétrons livres, e assim, é um péssimo condutor elétrico. Para mudar este aspecto, adicionam-se porcentagens de outros elementos químicos. Essa alteração chama-se dopagem (SOLARTERRA, 2008).

Através da dopagem do silício com o fósforo, obtém-se um material com elétrons livres ou de carga negativa (Silício tipo N). Pelo mesmo processo, mas adicionando-se boro ao invés de fósforo, consegue-se um material com características contrárias, isto é, com falta de elétrons ou de cargas positivas livres (Silício tipo P) (SOLARTERRA, 2008).

Uma célula solar é constituída de uma fina camada de material tipo N e outra de maior espessura de material P. Estas capas sozinhas são eletricamente neutras, mas unidas, gera-se um campo elétrico. Os fótons da luz solar, ao incidirem sobre a

célula fotovoltaica, chocam-se com os elétrons presentes no silício fornecendo-lhes energia e transformando-os em condutores. Graças ao campo elétrico gerado na união P-N, os elétrons são direcionados, fluindo da camada “P” para a camada “N” (SOLARTERRA, 2008). Utilizando-se um condutor externo, a camada negativa é conectada à positiva, produzindo assim uma corrente elétrica.

Os tipos de células comercializadas com suas respectivas características são os seguintes (BLUESOL, 2014):

- a. Silício Monocristalino: o nome refere-se à cristalização do silício, uma única formação cristalina através do método de Czochralski. Possui uma eficiência de 15 a 18%. As células são fabricadas em forma arredondada com as seguintes medidas: 10x10 cm², 12,5x12,5 cm² com diâmetros de 10, 12,5 ou 15 cm. Possuem uma coloração usualmente azul-escuro ou quase preto (com tratamento antirreflexo);
- b. Silício Policristalino: Os cristais são compostos por outros tipos de materiais, além do silício. Isso confere um aspecto de vidro quebrado à célula. A eficiência varia de 13 a 15% e a célula possui forma quadrada, medindo: 10x10 cm², 12,5x12,5 cm² e 15x15 cm². Apresentam coloração azul ou cinza prateado;
- c. Células de Película Fina: O material semiconductor é inserido em uma base, geralmente vidro. Os semicondutores mais usados são o silício amorfo (a-Si), o disseleneto de cobre e índio (CIS), disseleneto de cobre e índio gálio (CIGS) e o telureto de cádmio (CdTe). Estas composições possuem uma alta absorção luminosa e, por isso, uma fina camada é suficiente para obter eletricidade. Células de silício-amorfo apresentam uma eficiência de 5% a 9%, coloração avermelhada a azul escuro. As de disseleneto de cobre e índio (CIS) possuem eficiência de 7,5% a 9,5% e coloração preta. Já as de Telureto de Cádmio têm eficiência de 6% a 9%, apresentando coloração de verde-escuro a preto.

Na Tabela 2 é apresentado de forma resumida um comparativo da eficiência dos tipos de células fotovoltaicas (BLUESOL, 2014).

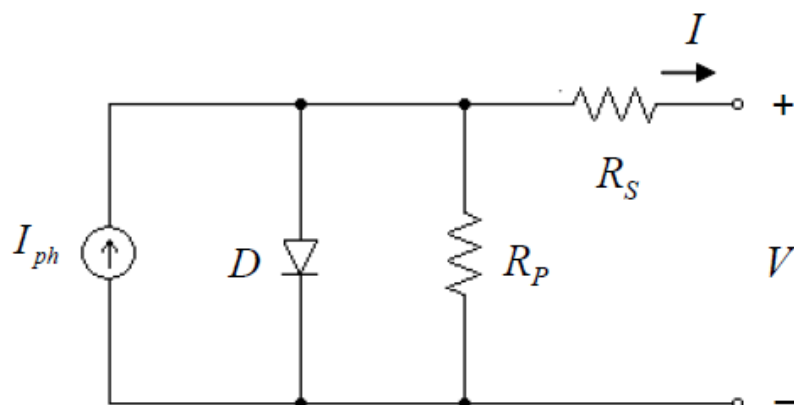
Tabela 2 – Comparativo da Eficiência dos Tipos de Células Fotovoltaicas.

Material	Eficiência em Laboratório	Eficiência em Produção	Eficiência em Produção em Série
Silício Mono	24,7%	18%	14%
Silício Poli	19,8%	15%	13%
Silício Amorfo	13%	10,5%	7,5%
CIS, CIGS	18,8%	14%	10%
CdTe	16,4%	10%	9%

Fonte: BlueSol Educacional (2014).

2.2.2.1 Modelo elétrico da célula fotovoltaica

Para compreender o funcionamento elétrico de uma célula e, posteriormente de um painel fotovoltaico, usa-se um circuito equivalente do sistema apresentado na Figura 4.

Figura 4 – Circuito elétrico equivalente de uma célula fotovoltaica.

Fonte: Seguel (2009).

A figura ilustra uma fonte de corrente em paralelo com um diodo, representando a célula fotovoltaica. Um conjunto real apresenta perdas, caracterizadas pelas resistências inseridas no circuito. A resistência em série R_s refere-se à queda de tensão oriunda das perdas ôhmicas do material semicondutor. Já a resistência em paralelo, R_p , refere-se às perdas das partes dianteiras e traseiras da célula, bem como ruídos pontuais na zona de união P-N (SEGUEL, 2009).

2.2.3 Painel fotovoltaico

Uma célula fotovoltaica, separadamente, possui uma baixa geração de eletricidade: uma tensão de 0,5 V com uma corrente de 2 a 4 A, produzindo uma potência de 1 a 2 W. Um painel ou módulo fotovoltaico é composto, então, por um conjunto de células fotovoltaicas que estão associadas de tal forma a gerar uma potência elétrica elevada (SEGUEL, 2009).

Um módulo possui especificações que obedecem a uma condição padrão de teste (STC – *Standard Test Condition*), definida pela norma IEC 61215: 1000 W/m² de incidência luminosa equivalente, assumindo uma distribuição espectral conhecida como massa de ar 1,5 e temperatura ambiente de 25°C (SEGUEL, 2009). Os principais parâmetros fornecidos pelo fabricante são:

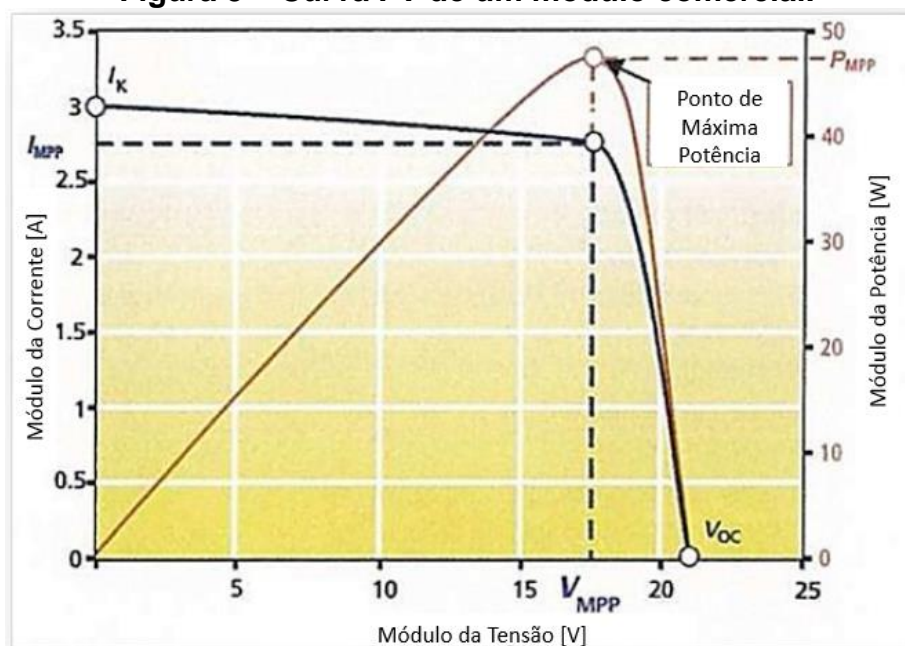
- a. Tensão nominal: tensão para o qual o módulo foi projetado para operar. Este valor varia de acordo com a quantidade de células que compõe o módulo;
- b. Tensão Máxima de Potência (V_{mpp}): tensão máxima fornecida em condições de teste;
- c. Tensão em Circuito Aberto (V_{oc}): tensão máxima gerada em seus terminais operando em vazio;
- d. Corrente em Máxima Potência (I_{mp}): corrente máxima fornecida em condições de teste;
- e. Corrente de Curto Circuito (I_{sc}): Corrente máxima gerada quando a célula está curto-circuitada em condições de teste;
- f. Ponto de Máxima Potência (MPP): Um módulo somente fornecerá a máxima potência quando submetido a uma resistência externa que gere os valores máximos de tensão e corrente. Ao analisar a curva I-V (Figura 5), o produto da corrente pela tensão determina a potência para aquele específico modo de funcionamento;
- g. Eficiência: representa o quanto de energia será fornecida do total absorvido pelo módulo durante a irradiação incidente.

2.2.3.1 Fatores que influenciam a eficiência

2.2.3.1.1 Radiação solar

A corrente gerada por um painel varia proporcionalmente com a intensidade da radiação solar incidente. A tensão sofre alterações significativas com a mudança da radiação, exclusivamente quando esta é pequena. A redução na incidência da radiação reduz o ponto de máxima potência (SEGUEL, 2009). Pode-se analisar tais fatos por meio dos gráficos da Figura 6.

Figura 5 – Curva I-V de um módulo comercial.



Fonte: BlueSol Energia Solar (2014).

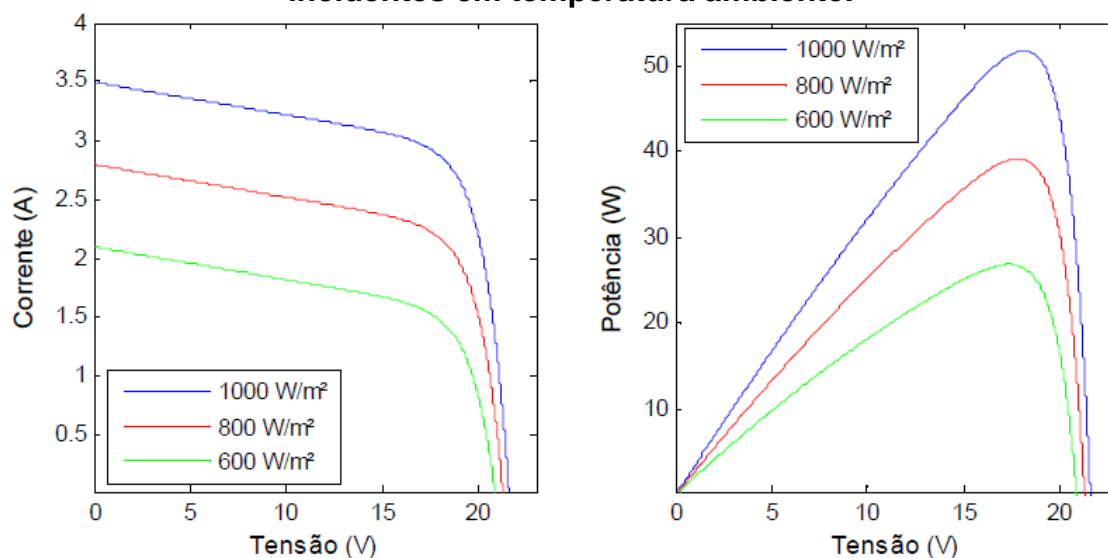
2.2.3.1.2 Temperatura

A tensão V_{oc} varia negativamente com o aumento da temperatura do painel. Por consequência, o ponto de máxima potência também sofre redução, conforme ilustrado na Figura 7 (SEGUEL, 2009).

2.2.3.1.3 Resistências Internas

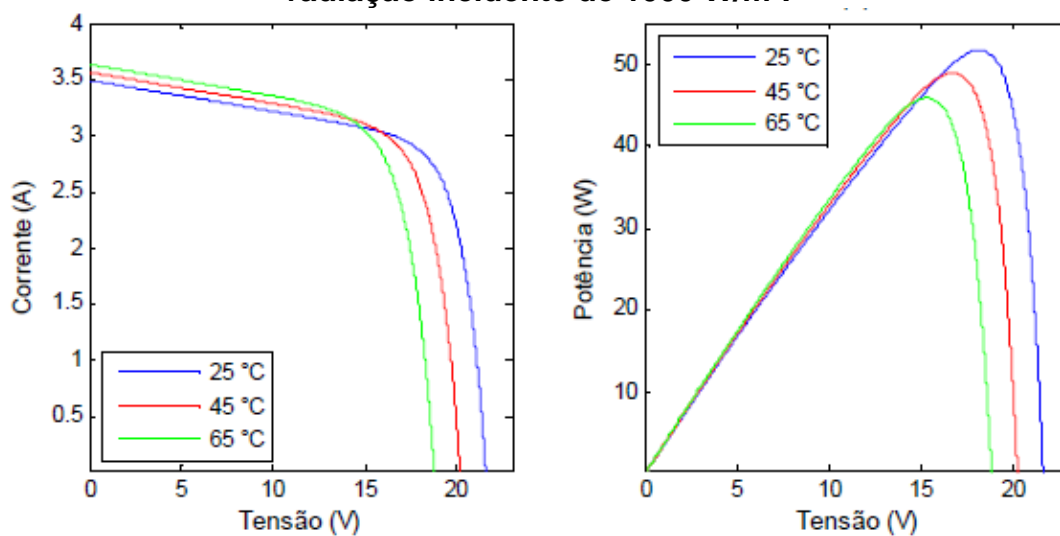
O valor da R_s afeta a inclinação da curva I-V quando o painel passa a operar como fonte de tensão, depois do ponto de máxima potência. O seu aumento desloca o ponto de máxima potência do painel. Já com a R_p , regula-se a inclinação antes do ponto de máxima potência. Consequentemente, reduz-se o ponto de máxima potência, conforme demonstrado na Figura 8 e na Figura 9 (SEGUEL, 2009).

Figura 6 – Curvas características de um painel para diferentes potências incidentes em temperatura ambiente.



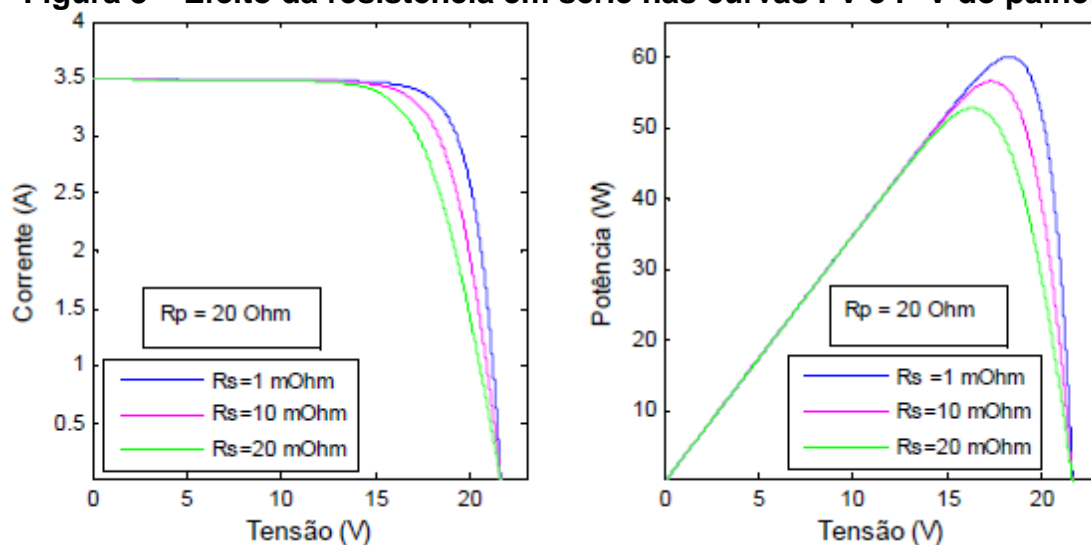
Fonte: Seguel (2009).

Figura 7 – Curvas características de um painel para diversas temperaturas sob radiação incidente de 1000 W/m².



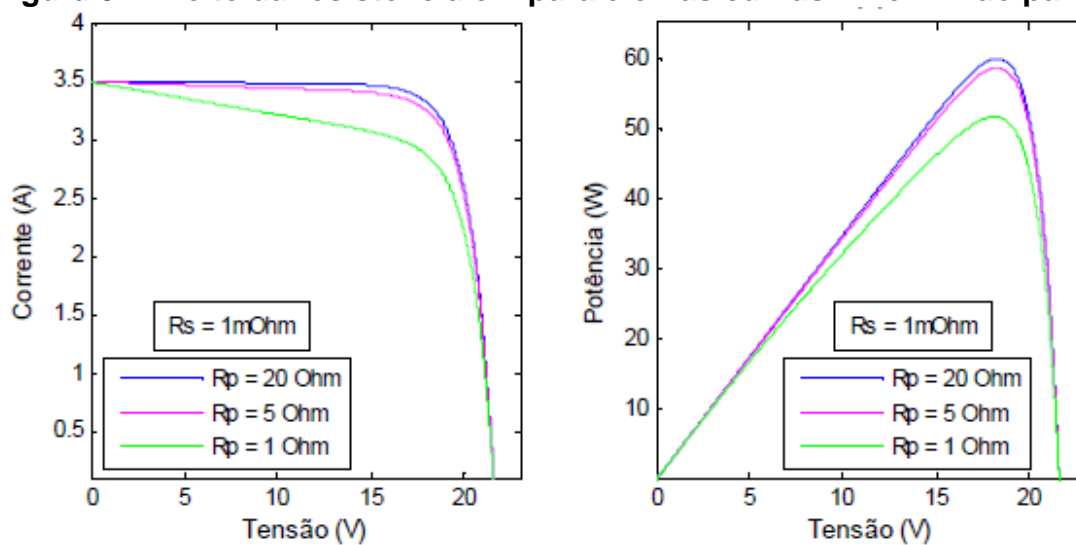
Fonte: Seguel (2009).

Figura 8 – Efeito da resistência em série nas curvas I-V e P-V do painel.



Fonte: Seguel (2009).

Figura 9 – Efeito da resistência em paralelo nas curvas I-V e P-V do painel.



Fonte: Seguel (2009).

2.3 Posicionamento solar

Conhecer a correta localização do Sol é necessário para encontrar os dados ligados à radiação e energia gerada por sistemas fotovoltaicos. Esta posição pode ser definida em qualquer ponto na superfície terrestre, sabendo-se a altura e azimuth (GREENPRO, 2004).

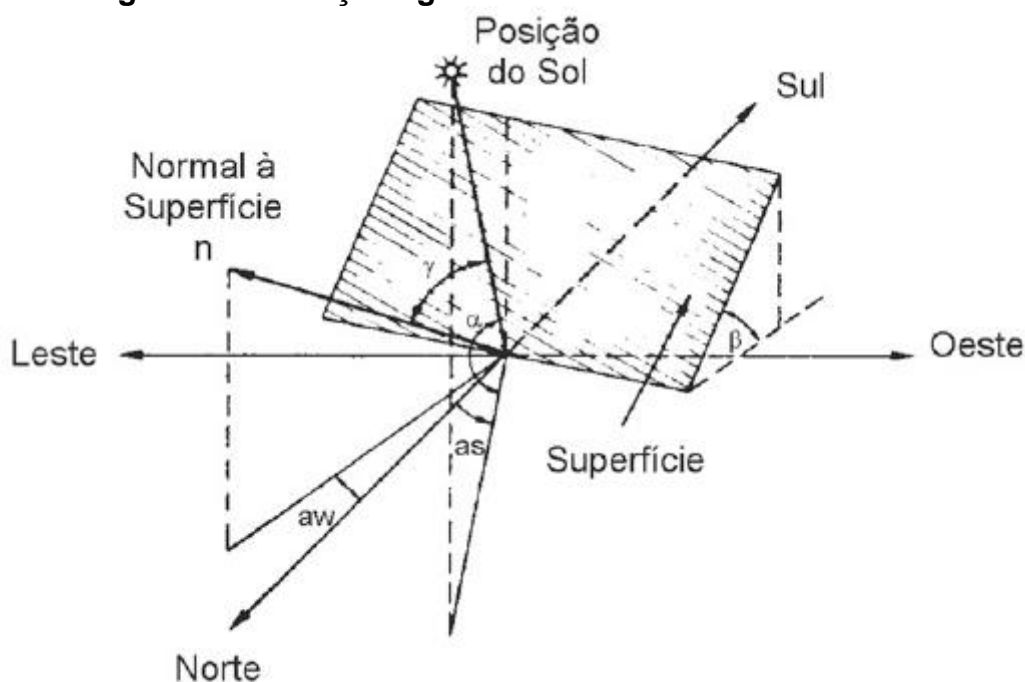
A seguir, têm-se os principais termos relacionados à geometria solar e, na Figura 10, sua representação em relação ao sistema fotovoltaico (GREENPRO, 2004):

- a. Ângulo de Incidência (γ): é concebido entre os raios solares e a normal à superfície de captação;
- b. Ângulo Azimutal de Superfície (a_w): formado entre a projeção da normal à superfície do painel e a direção norte-sul. Dentro do campo solar, sul é referido como $a_w = 0^\circ$. Temos o sinal negativo a ângulos situados a leste ($a_w = -90^\circ$) e positivos a oeste ($a_w = 90^\circ$). Na construção civil, o ângulo do azimute é 0° ao norte. Os outros ângulos são determinados pelo sentido horário (leste $a_w = -90^\circ$; sul $a_w = 180^\circ$; oeste $a_w = 270^\circ$);
- c. Ângulo azimutal do Sol (a_s): forma-se entre a projeção dos raios solares no plano horizontal e a direção norte-sul;
- d. Altura Solar (α): ângulo entre os raios solares e sua projeção sobre o plano horizontal;
- e. Inclinação (β): ângulo entre o painel solar e o plano horizontal;
- f. Hora Angular (ω). É o deslocamento angular de leste-oeste oriundo do movimento rotacional da Terra. Uma volta completa (360°) em 24 horas;
- g. Ângulo Zenital (θ_z): ângulo formado entre os raios solares e a vertical (zênite);
- h. A Massa de Ar (MA) indica um múltiplo da trajetória solar na atmosfera para um local determinado. Ela influencia através dos efeitos de absorção e dispersão. Quando mais elevado estiver o Sol, menores serão estes efeitos. A relação entre a altura do Sol e a massa de ar é dada da seguinte forma:

$$MA = \frac{1}{\text{sen } \alpha} \quad (1)$$

Por exemplo, quando $MA=1$, tem-se que o Sol está perpendicular à superfície. Isso corresponde à posição solar no Equador ao meio dia, no início da primavera ou outono (GREENPRO, 2004).

Figura 10 – Relações geométricas Sol-Terra-Painel Solar.



Fonte: Bluesol Energia Solar (2014).

2.4 Métodos de rastreamento solar

Um dispositivo capaz de rastrear e se posicionar, de forma autônoma, segundo a trajetória solar é denominado seguidor ou rastreador solar. Mecanismos com essa capacidade podem ser aplicados nas mais variadas atividades fundamentadas na coleta de energia solar, sendo que no princípio sua utilização mais comum, antes da redução dos custos de produção de energia fotovoltaica, era na produção de energia solar térmica, como, por exemplo, em concentradores solares e coletores planos (CORTEZ, 2013).

Quando um seguidor solar é aplicado a sistemas fotovoltaicos, sua principal função é garantir que o plano do painel se mantenha o maior período possível perpendicular à radiação solar incidente, garantindo maior aproveitamento da energia coletada e maior rendimento na geração. Ainda que essa perpendicularidade não seja perfeitamente garantida, no caso, por exemplo, de existir um desvio de posição angular na ordem de 10 graus, é possível obter aproximadamente 98,5% do aproveitamento esperado para um rastreamento com perpendicularidade teoricamente perfeita (MOUSAZADEH *et al.*, 2009).

A utilização de seguidores solares em áreas de nebulosidade característica pode garantir ganho no rendimento anual abaixo dos 20%, mas em áreas com considerável incidência de radiação solar os ganhos anuais podem variar entre 30% e 40% (MOUSAZADEH *et al.*, 2009). Levando-se em conta que atualmente o custo de instalação de seguidores solares pode implicar num aumento de 20% sobre o projeto, ao passo que elevam a renda em 40%, e envolvem custos de manutenção baixos, a rentabilidade da sua instalação é facilmente perceptível, principalmente em países com elevados níveis de radiação solar (GIL *et al.*, 2009).

Seguidores solares podem ser projetados para trabalhar segundo um único eixo de deslocamento ou, no caso da necessidade de maior precisão durante o rastreamento, dois eixos. Um dispositivo ideal de rastreamento solar permite que a célula fotovoltaica seja orientada com precisão segundo a posição do sol, compensando as mudanças no ângulo de altitude do sol, isto é, deslocamento latitudinal do sol (alterações sazonais) e mudanças no ângulo de azimute (MOUSAZADEH *et al.*, 2009).

2.4.1 Seguidor solar quanto a metodologia de movimentação

De acordo com a estratégia de movimentação utilizada, os seguidores solares mais utilizados podem ser classificados por (GIL *et al.*, 2009):

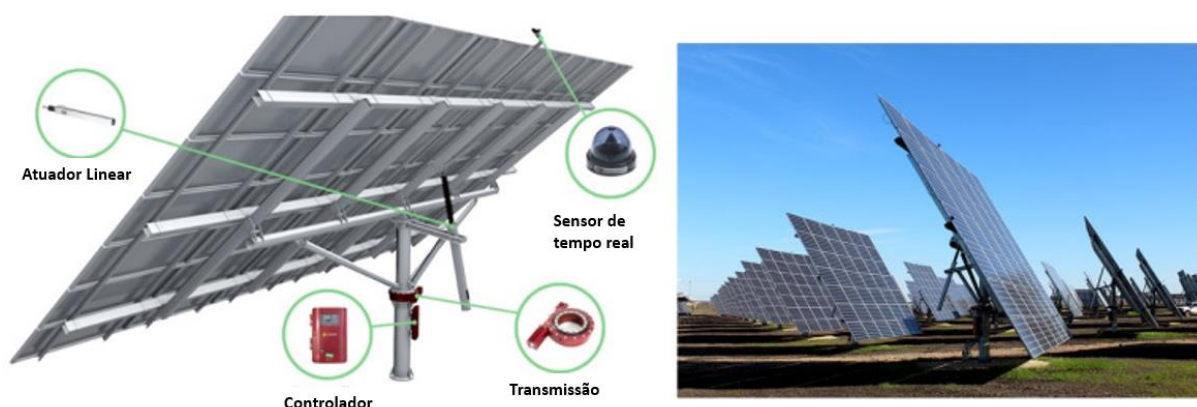
- a. Seguidor polar de eixo único;
- b. Seguidor de eixo horizontal;
- c. Seguidor de eixo vertical ou azimutal;
- d. Seguidor polar de dois eixos;
- e. Seguidor de dois eixos com plataforma rotativa.

2.4.1.1 Seguidor polar de eixo único

O seguidor polar de eixo único é um dispositivo com o eixo norte-sul fixado com ângulo apropriado, geralmente a latitude do local de instalação, atuando como eixo de rotação do painel fotovoltaico de modo a seguir a trajetória solar durante o dia (GIL *et al.*, 2009). A Figura 11 apresenta um conjunto de painéis dotados desse tipo de estratégia de rastreamento.

Os raios solares incidem perpendicularmente sobre o painel fotovoltaico em todos os dias dos equinócios de primavera e de outono, em contrapartida, nos demais dias do ano ocorre um pequeno desvio de perpendicularidade na incidência, principalmente nos equinócios de verão e de inverno (GIL *et al.*, 2009).

Figura 11 – Seguidor polar de eixo único.



Fonte: Paru Solar (2017).

2.4.1.2 Seguidor de eixo horizontal

Os mecanismos com essa estratégia de rastreamento possuem um eixo horizontal que atua como um pivô para o painel fotovoltaico, permitindo o rastreamento sazonal do sol (GIL *et al.*, 2009). A Figura 12 ilustra a utilização desse tipo de mecanismo junto de painéis solares.

Ao contrário de muitos outros mecanismos de rastreamento, esse tipo não requer um sistema seguidor automático, mas pode ter um determinado número de posições pré-fixadas, permitindo que um operador ajuste a inclinação dos painéis ao longo do ano (GIL *et al.*, 2009).

2.4.1.3 Seguidor de eixo vertical ou azimutal

Nessa estratégia de rastreamento o conjunto de painéis gira ao redor de um eixo vertical de modo a seguir o sol no sentido leste-oeste, apresentando melhor desempenho em latitudes e estações que possuem dias mais longos. Além disso, a inclinação dos painéis é realizada manualmente ao longo do ano (OLIVEIRA, 2008). A Figura 13 apresenta um exemplo de aplicação desse mecanismo.

Figura 12 – Seguidor de eixo horizontal.



Fonte: Gil *et al.* (2009).

Figura 13 – Seguidor de eixo vertical ou azimutal em edifício.



Fonte: Gil *et al.* (2009).

Do modo como o seguidor foi adaptado para a fachada circular do prédio em questão, os painéis fotovoltaicos deslizam ao redor da estrutura do edifício através de trilhos de maneira a acompanhar o sol durante o dia (GIL *et al.*, 2009).

2.4.1.4 Seguidor polar de dois eixos

O dispositivo caracterizado por essa estratégia de rastreamento possui um tipo de poste como eixo vertical que permite o movimento no sentido leste-oeste e um segundo poste na transversal que garante o movimento de rotação no sentido norte-sul. A estrutura em que os painéis são montados é fixada junto ao poste na transversal. A transmissão mecânica desse tipo de dispositivo é efetuada por um par de motores elétricos, um para cada eixo ou poste, de maneira a coordenar seus movimentos. Em função de sua simplicidade é o tipo de seguidor mais utilizado, principalmente em parques solares e outras instalações de grande porte, mas também são adequados a pequenas aplicações que exigem um número reduzido de coletores, possuindo, portanto, grande versatilidade (GIL *et al.*, 2009). A Figura 14 apresenta um dos vários modelos de seguidores que adotam essa estratégia.

Figura 14 – Estrutura do seguidor polar de dois eixos comercial.

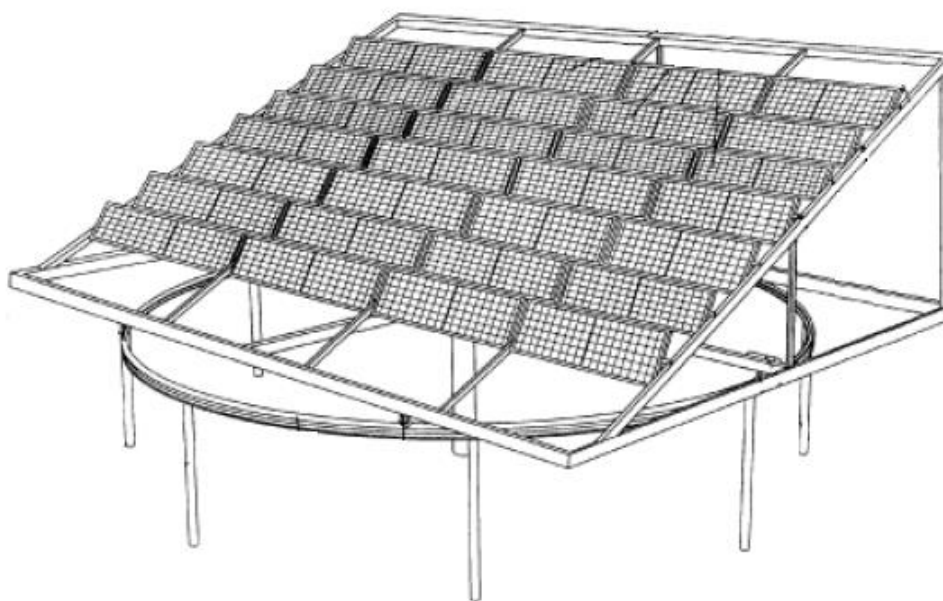


Fonte: Gil *et al.* (2009).

2.4.1.5 Seguidor de dois eixos com plataforma rotativa

Esse tipo de seguidor possui uma plataforma que rotaciona sobre uma base fixa de modo a executar o movimento no sentido leste-oeste. Os painéis são montados sobre essa mesma plataforma junto do respectivo eixo horizontal que garante a movimentação no sentido norte-sul. Quando essa estratégia é aplicada, deseja-se realizar o posicionamento de um grande número de painéis de uma única vez e através de um único sistema de rastreamento, mas é necessário que uma grande área livre de obstáculos esteja disponível para instalação do seguidor (CORTEZ, 2013). A Figura 15 ilustra a estrutura de um dispositivo como esse.

Figura 15 – Estrutura do seguidor de dois eixos com plataforma rotativa.



Fonte: Adaptado de Gil *et al.* (2009)

2.4.2 Seguidor solar quanto a metodologia de controle

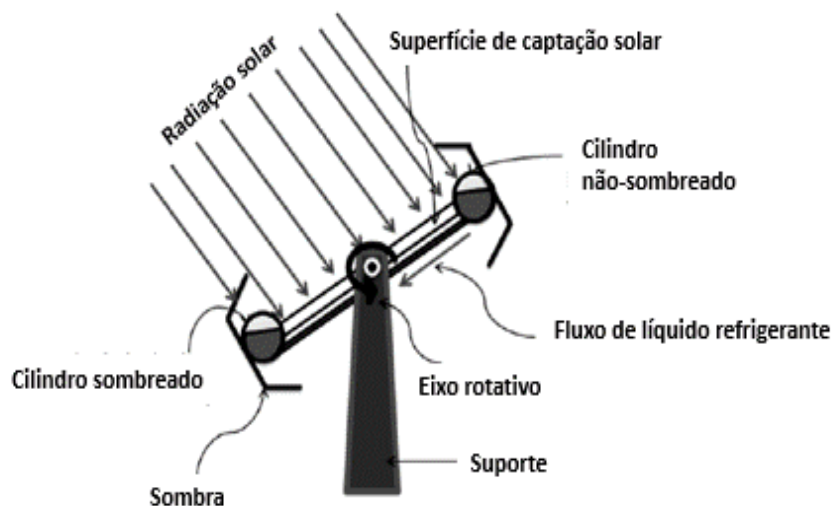
Os sistemas de rastreamento solar, segundo o tipo de controle, são geralmente classificados em duas categorias (MOUSAZADEH *et al.*, 2009):

- a. Seguidor passivo (mecânico por expansão térmica ou liga bi-metálica);
- b. Seguidor ativo (controlado com auxílio de sensores, algoritmos cronológicos e atuadores).

2.4.2.1 Seguidor solar passivo

O seguidor solar do tipo passivo é fundamentado na expansão térmica de um líquido, geralmente Freon, ou em ligas com memória de forma (MOUSAZADEH *et al.*, 2009). Quando é empregado o princípio da expansão térmica do líquido, o seguidor solar é composto por dois cilindros interligados com o líquido adequado em seu interior, um orientado em relação à extremidade leste e outro em relação à extremidade oeste do sistema de rastreamento, de forma que o líquido no cilindro com maior incidência de radiação solar aquece e evapora. Assim, desloca-se através do tubo de interligação até o outro cilindro, onde condensa e se deposita, provocando maior concentração de líquido numa das extremidades e o deslocamento do centro de massa do sistema, reorientado por ação da gravidade. Portanto, o painel pára em uma posição mais adequada à captação de energia solar. A Figura 16 ilustra o princípio de funcionamento do mecanismo.

Figura 16 – Exemplo de funcionamento do seguidor solar passivo.



Fonte: Adaptado de Kanyarusoke *et al.* (2015).

Seguidores solares passivos, em comparação com seguidores ativos, são menos complexos, sendo mais baratos sob o ponto de vista do projeto e implantação. No entanto, possuem baixa precisão, funcionando de maneira mais efetiva em altas

temperaturas e em locais onde a variação térmica seja suficiente para que o líquido evapore e se expanda na forma gasosa (MOUSAZADEH *et al.*, 2009).

2.4.2.2 Seguidor solar ativo

Os principais tipos de seguidores solares ativos podem ser microprocessados com sensores optoeletrônicos (fotoresistências, fotodiodos, fototransistores), podem ser fundamentados em algoritmos cronológicos (baseados em data e horário), podem usar células solares bifaciais que auxiliam na orientação da posição desejada ou uma combinação desses três tipos (MOUSAZADEH *et al.*, 2009). Cada uma dessas metodologias, com o sistema de controle adequado, fornece base para orientação do módulo solar a partir do acionamento de atuadores tais como servomotores ou motores de passo.

2.4.2.2.1 Seguidor ativo com microprocessador e sensores optoeletrônicos

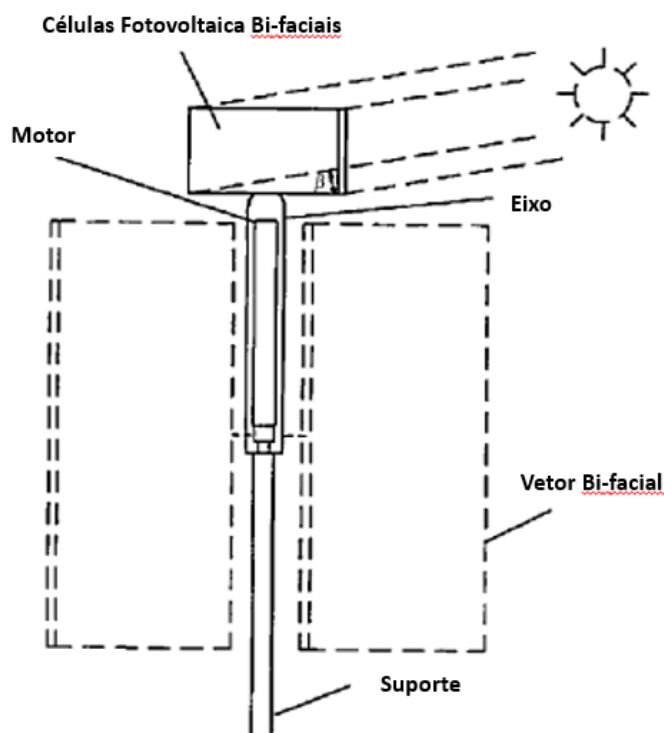
Esse modelo é fundamentado em sinais de controle definidos a partir da iluminação diferencial de sensores optoeletrônicos. Dessa forma, motores são acionados de maneira a orientar o dispositivo na direção em que os sensores tenham incidência luminosa uniforme. Para aumentar a sensibilidade desses sensores é possível instalá-los em superfícies inclinadas, e para impedir que a irradiação solar difusa influencie na detecção precisa da posição solar, os sensores são inseridos num tubo colimador. Ainda que seguidores com essa metodologia possuam alta precisão no processo de rastreamento, acabam por se tornar complexos e relativamente caros (MOUSAZADEH *et al.*, 2009).

2.4.2.2.2 Seguidor ativo baseado em células solares bifaciais auxiliares

Células solares auxiliares conectadas a um motor de corrente contínua (CC) de ímã permanente são fixadas ao eixo de rotação do seguidor, garantindo a orientação e a energia necessária para o rastreamento, desde que não exceda os limites de operação do motor. Há modelos relativamente simples desse dispositivo, como apresentado na Figura 17, que dispensam baterias e dispositivos eletrônicos de

acionamento mais caros, sendo adequados a aplicações espaciais e terrestres. (MOUSAZADEH *et al.*, 2009).

Figura 17 – Modelo de um seguidor solar terrestre baseado em células solares bifaciais.



Fonte: Mousazadeh *et al.* (2009).

2.4.2.2.3 Seguidor ativo baseado em algoritmos cronológicos (data e horário)

Nessa estratégia de rastreamento, um computador, um microprocessador ou mesmo um controlador lógico programável usa algoritmos e rotinas de cálculo para inferir a posição solar com base em datas e horários, além de dados geográficos, permitindo que um sistema de controle estabeleça os sinais de acionamento de motores responsáveis por posicionar o dispositivo. Em alguns casos, sensores são necessários para garantir orientação específica (MOUSAZADEH *et al.*, 2009).

2.5 Sensores de luminosidade

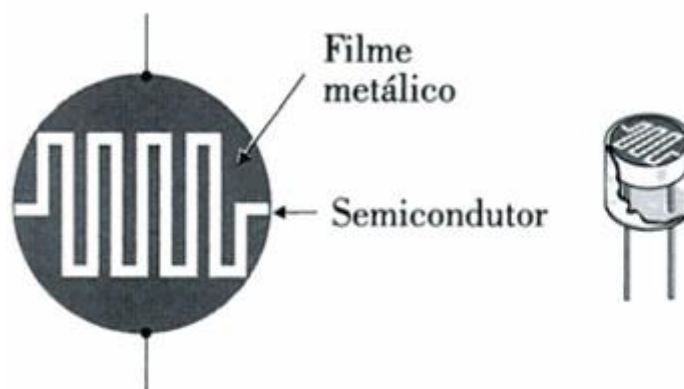
Detectores de radiação eletromagnética na faixa espectral do ultravioleta ao infravermelho são chamados de sensores de luminosidade. Dependendo do modo como o sensor foi projetado e do material do qual foi construído, a resposta ao absorver fótons pode ser de ordem quântica, operando da faixa espectral do ultravioleta ao médio infravermelho, ou de ordem térmica, operando da faixa espectral do médio ao distante infravermelho (FRADEN, 2010).

Um aspecto muito importante durante o projeto de um rastreador solar é a escolha de um sensor de luminosidade compatível com as características do sistema de controle, com melhor custo benefício possível e que seja facilmente encontrado no mercado no caso da necessidade de substituição. Como o objetivo é rastrear a trajetória solar detectando a luz visível, os modelos mais indicados são o foto-resistor (LDR), o fotodiodo e foto-transistor.

2.5.1 Foto-resistor (LDR)

O fenômeno que ocorre quando a condutividade de um determinado tipo de material se altera, ao passo que a intensidade luminosa varia, chama-se fotocondutividade. O fotoresistor é um fotodetector fundamentado no princípio da fotocondutividade. Como sua denominação em inglês é *Light Dependent Resistor*, o foto-resistor é comumente conhecido como LDR (REZENDE, 2004). A Figura 18 apresenta o aspecto construtivo do LDR e também seu encapsulamento.

Figura 18 – Aspecto construtivo do LDR e seu encapsulamento.



Fonte: Rezende (2004).

Quando não há luz, a resistência do LDR é consideravelmente alta, mas pode diminuir muito no caso da exposição à luminosidade (REZENDE, 2004).

A relação entre a resistência e a luminosidade num LDR é a seguinte (KUMAR, 2002):

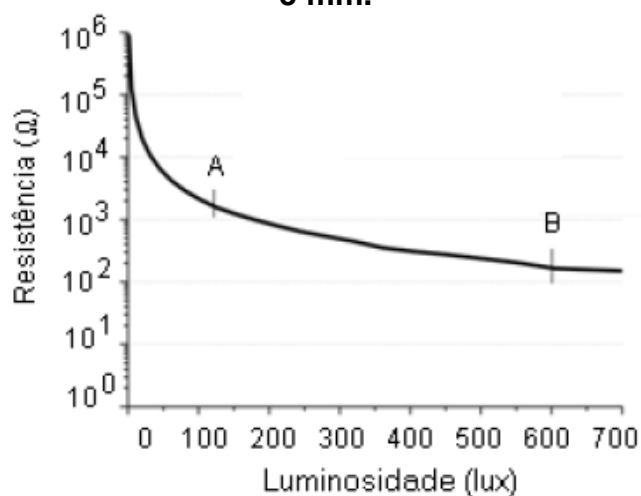
$$R_{LDR} = R_{DARK} \cdot L^{-b} \quad (2)$$

onde R_{LDR} é a resistência do LDR (em Ohm) com presença de luminosidade, R_{DARK} é a resistência do LDR (em Ohm) sem presença de luminosidade, L é a luminosidade (em Lux) que incide sobre o LDR e b é a constante característica do material utilizado para construção do LDR (em Ohm/Lux).

O comportamento da resistência em função da luminosidade num LDR de 5 mm pode ser visualizado no gráfico apresentado na Figura 19. Os pontos A e B no gráfico delimitam o intervalo em que o comportamento da resistência pela luminosidade é aproximadamente linear (MENDES, 2013).

O material mais utilizado para construção de um LDR é o sulfeto de cádmio (CdS), o qual é geralmente aplicado a fotodetectores que devem operar na região da luz visível, ou seja, a faixa de comprimentos de onda compreendida entre 400 nm e 700 nm (MENDES, 2013).

Figura 19 – Comportamento da Resistência pela Luminosidade num LDR de 5 mm.



Fonte: Mendes (2013).

Um aspecto importante sobre o LDR, e que deve ser lembrado, é sua resposta consideravelmente lenta (tempo de resposta na ordem de 50 ms quando construído com sulfeto de cádmio), pois os semicondutores utilizados na sua construção possuem tempos de recombinação elevados (REZENDE, 2004).

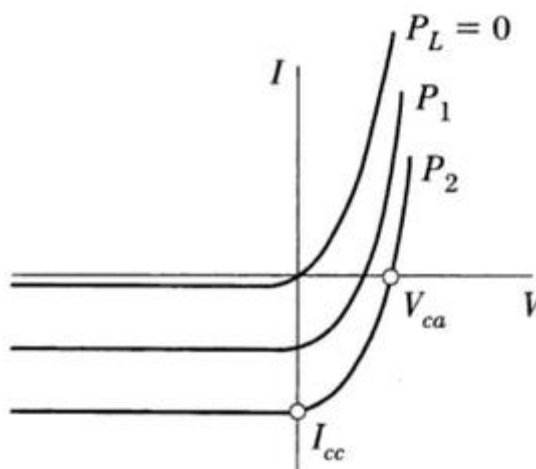
2.5.2 Fotodiodo e Foto-transistor

Um fotodiodo é um detector de radiação que ao absorver fótons nas proximidades da região de depleção da junção P-N gera pares elétron-lacuna produzindo um sinal elétrico. Assim, num fotodiodo a foto-corrente é produzida sem a necessidade de aplicação de uma diferença de potencial em seus terminais e essa característica é a principal diferença que possuem em relação a um foto-resistor (REZENDE, 2004). Portanto, um fotodiodo é basicamente um dispositivo capaz de converter a luz que incide sobre ele numa certa intensidade de corrente elétrica.

A Figura 20 apresenta o comportamento da corrente pela tensão num fotodiodo no escuro e na presença de luz, para dois valores de potência luminosa.

Um fotodiodo possui características que se destacam em relação a um foto-resistor como detector de radiação, tais como a linearidade e velocidade de sua resposta, estabilidade e maior faixa dinâmica de operação (REZENDE, 2004). Além disso, em aplicações que não necessitem grande velocidade de resposta, existe a possibilidade de utilizá-lo como detector de radiação num circuito relativamente simples, como apresentado na Figura 21.

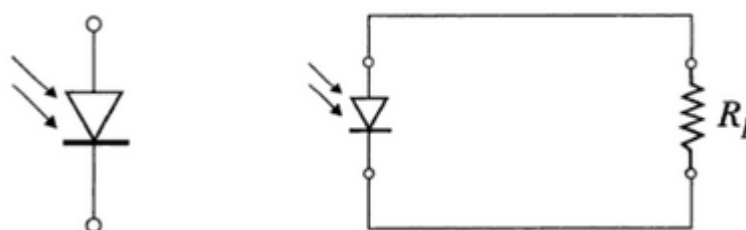
Figura 20 – Comportamento da corrente pela tensão num diodo no escuro e na presença de luz, para dois valores de potência luminosa.



Fonte: Rezende (2004).

O foto-transistor é basicamente um fotodiodo com amplificação. No momento em que a junção emissor-base de um foto-transistor é iluminada possibilita a geração de pares elétron-lacuna, resultando numa corrente de emissor que varia em função da incidência luminosa e que permite, dessa forma, a detecção de luz com um determinado ganho de corrente (REZENDE, 2004).

Figura 21 – Símbolo de um fotodiodo à esquerda e aplicação do mesmo num circuito simples para detecção de radiação à direita.

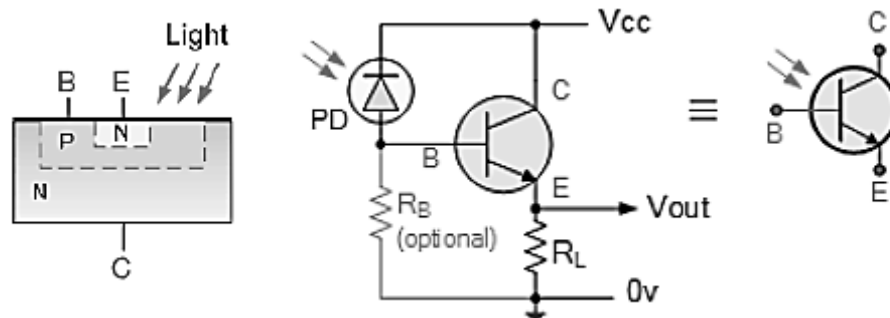


Fonte: Rezende (2004).

O foto-transistor tem como principal desvantagem a baixa linearidade quando comparado a um fotodiodo e a sua resposta é relativamente mais lenta devido às capacitâncias construtivas entre base-coletor e base-emissor que atuam como fatores limitadores de velocidade (FRADEN, 2010).

A Figura 22 apresenta a estrutura do foto-transistor, seu circuito equivalente e sua simbologia (GOODWIN, 2012).

Figura 22 – Estrutura do foto-transistor, seu circuito equivalente e sua simbologia.



Fonte: Adaptado de Goodwin (2012).

A Tabela 3 apresenta as principais características dos dispositivos fotodetectores mencionados.

Tabela 3 – Características dos Fotodetectores.

Tipo	Dispositivo	Resposta(μm)	Tempo de Resposta	Vantagens	Desvantagens
Fotocondutora	Fotoresistor de Cds	0,6-0,9	100 ms	Pequeno, alta sensibilidade, custo reduzido	Lento, histerese, temperatura limitada
	Fotoresistor de CdSe	0,6-0,9	10 ms	Pequeno, alta sensibilidade, custo reduzido	Lento, histerese, temperatura limitada
Semicondutor	Fotodiodo	0,4-0,9	1 ns	Muito rápido, boa linearidade, nível reduzido de ruído	Saída com nível reduzido
	Fototransistor	0,25-1,1	1 μs		Resposta em frequência reduzida, não linear
Fotovoltaico	Célula solar	0,35-0,75	20 μs	Linear, alimentação própria	Lento, saída com nível reduzido

Fonte: Adaptado de Dunn (2013).

2.6 Microcontrolador

Basicamente, um microcontrolador é uma unidade computacional composta por um processador, memória, periféricos de entrada e saída, temporizadores,

dispositivos de comunicação serial, sistema de clock. Tudo isto está integrado em um mesmo componente (PENIDO & TRINDADE, 2013).

Existem muitos modelos de microcontroladores disponíveis no mercado, cada qual com suas respectivas características. A escolha de um destes deve basear-se inicialmente nos requerimentos do projeto em questão. Os principais fatores a serem levados em conta na escolha do equipamento são: arquitetura, consumo energético, periféricos, velocidade e capacidade de processamento, tamanho e custo (PENIDO & TRINDADE, 2013).

2.7 Lógica fuzzy

A teoria dos conjuntos e a teoria de probabilidades são as teorias mais utilizadas para tratamento da incerteza e da imprecisão e, mesmo sendo úteis, possuem grandes limitações quando aplicadas na captação da informação humana (SANDRI & CORREA., 1999).

Desenvolvida por Lotfi Zadeh a partir de 1965, a teoria dos conjuntos nebulosos é aplicada no tratamento da natureza imprecisa que a informação pode assumir e a teoria dos conjuntos clássica é um caso particular dessa teoria mais abrangente. A partir de 1978, Lotfi Zadeh trabalhou na teoria das possibilidades que lida com a incerteza da informação, sendo comparada à teoria de probabilidades, com a vantagem de ser menos restritiva o que a torna mais adequada quando aplicada à informação fornecida por seres humanos (SANDRI & CORREA., 1999).

Ambas teorias, a dos conjuntos nebulosos e a de probabilidades, possuem forte ligação entre si, o que é muito importante uma vez que essa ligação torna possível o tratamento da imprecisão e da incerteza da informação num único ambiente formal. Além disso, a utilização dessas teorias em sistemas que dependem de informação fornecida por seres humanos tem se tornado cada vez mais comum, como por exemplo, na automação de controle de processos ou na tomada de decisão (SANDRI & CORREA., 1999).

Quando a teoria de conjuntos nebulosos é aplicada num contexto lógico, passa a ser chamada de lógica nebulosa, lógica difusa ou lógica fuzzy. Com a lógica nebulosa é possível programar procedimentos relativamente complexos em controladores mais simples, reduzindo, portanto, o custo da aplicação. Sistemas

fundamentados nessa técnica são denominados de controladores nebulosos (SANDRI & CORREA., 1999).

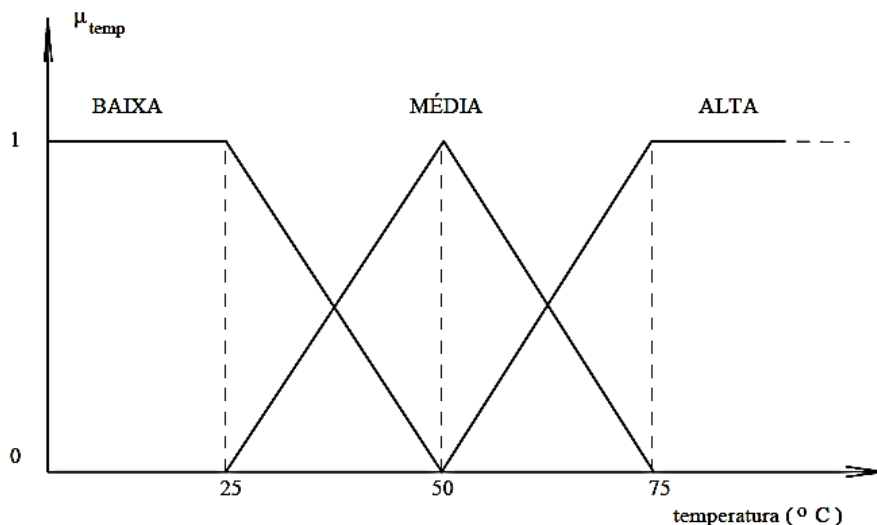
2.7.1 Controladores nebulosos

No controle nebuloso o algoritmo de controle é desenvolvido com base em regras lógicas de modo a descrever a experiência humana, a intuição e a heurística como uma rotina, ao contrário do que acontece com controladores convencionais fundamentados em modelos matemáticos (SANDRI & CORREA., 1999).

A variável linguística é aquela que possui valores pertencentes a um conjunto de termos linguísticos, assumindo instâncias linguísticas ao invés de instâncias numéricas o que ocorre em sistemas mais comuns. Um exemplo desse tipo de caracterização seria um controle de temperatura onde a variável linguística pode assumir como valor um dos elementos do conjunto {baixa, média, alta}, de modo que o significado atribuído ao termo linguístico, em questão, fundamenta-se na associação com um conjunto nebuloso definido sobre um universo de discurso comum (GOMIDE & GUDWIN., 1994). A Figura 23 ilustra esses conceitos aplicados à variável linguística temperatura, usada como exemplo. Ainda nesta figura, representa-se os níveis de pertinência para cada um dos elementos do conjunto temperatura.

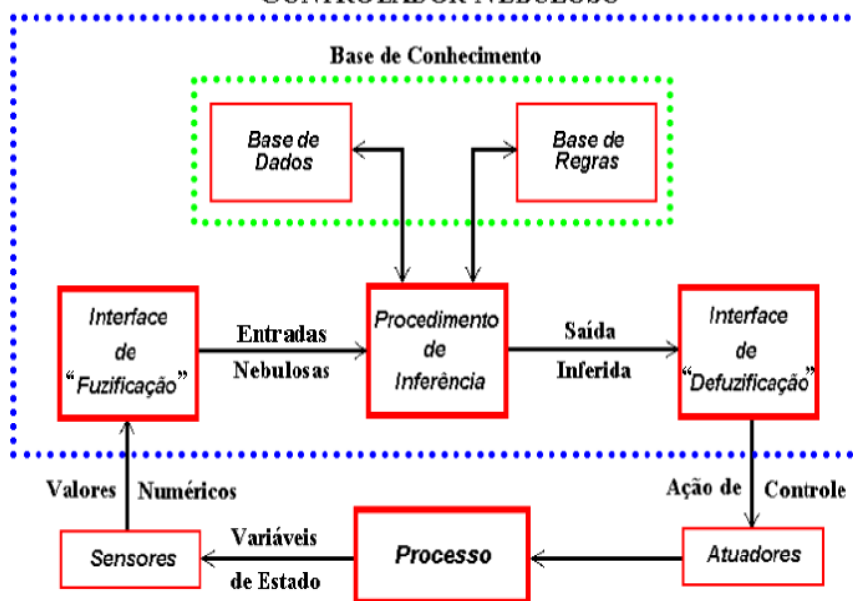
Um controlador nebuloso possui como componentes fundamentais a interface de fuzzyficação, a base de conhecimento (regras e dados), o procedimento de inferência e a interface de defuzzyficação (GOMIDE & GUDWIN., 1994). A estrutura de um controlador nebuloso é apresentada na Figura 24.

Figura 23 – Exemplo de variável linguística Temperatura.



Fonte: Gomide e Gudwin (1994).

Figura 24 – Estrutura de um controlador nebuloso.
CONTROLADOR NEBULOSO



Fonte: Sandri e Correa. (1994).

Os controladores nebulosos possuem grande robustez e adaptabilidade, sendo que suas principais aplicações se encontram em sistemas não lineares, contornando perturbações e níveis de ruídos (SANDRI & CORREA., 1999).

2.7.1.1 Interface de fuzzyficação

A interface de fuzzyficação identifica os valores de entrada, os condiciona a um universo de discurso padronizado e então fuzzifica esses valores. Há uma conversão da variável linguística tratada para índices de pertinência aos conjuntos em questão (GOMIDE & GUDWIN., 1994).

2.7.1.2 Base de Conhecimento

A base de conhecimento fundamenta as metas e a estratégia de controle a ser utilizada estruturando-se numa base de dados e numa base de regras (SANDRI & CORREA., 1999).

A base de dados contém as definições das técnicas de discretização e normalização pertinentes aos universos de discurso empregados, além das definições de funções de pertinência dos termos nebulosos (SANDRI & CORREA., 1999).

A base de regras é formada por estruturas tais como (SANDRI & CORREA., 1999):

Se <premissa> Então <conclusão>

As regras definidas conforme esse tipo de estrutura, junto dos dados de entrada, são processadas pelo procedimento de inferência de maneira a inferir as ações de controle necessárias ao sistema controlado, ou seja, estabelece-se uma correspondência das variáveis linguísticas de entrada para as de saída (GOMIDE & GUDWIN., 1994).

2.7.1.3 Procedimento de Inferência

No controle nebuloso, o procedimento de inferência consiste em (SANDRI & CORREA., 1999):

- a. Verificação do grau de compatibilidade entre os fatos e as cláusulas nas premissas das regras;
- b. Determinação do grau de compatibilidade global da premissa de cada regra;

- c. Determinação do valor da conclusão, em função do grau de compatibilidade da regra com os dados e a ação de controle constante na conclusão (precisa ou não);
- d. Agregação dos valores obtidos como conclusão nas várias regras, obtendo-se uma ação de controle global.

Os controladores nebulosos mais utilizados são:

- a. Os modelos clássicos, de Mamdani e de Laersen, onde cada termo nebuloso, pertencente a um conjunto fixo de termos (geralmente em número inferior ao de regras), é especificado com a conclusão de uma regra. Os termos em questão normalmente se apresentam como conjuntos nebulosos convexos tal como trapézios, funções em forma de sino e triângulos. Além disso, os controladores desse tipo dependem de uma interface de desfuzzyficação para gerar a ação de controle (SANDRI & CORREA, 1999);
- b. Os modelos de interpolação, onde a conclusão de uma regra é dada por uma função estritamente monotônica e geralmente diferente para cada regra, sendo que no modelo de Takagi-Sugeno a função é uma combinação linear das entradas e seus parâmetros são um conjunto de constantes, enquanto no modelo de Tsukamoto a função geralmente é não linear e seu domínio é definido pelo grau de compatibilidade entre premissas e entradas. Nesses modelos, obtém-se, para cada regra, apenas um valor para a variável de controle, de modo que a ação de controle é definida a partir de uma média ponderada dos valores individuais determinados (SANDRI & CORREA, 1999).

2.7.1.4 Interface de desfuzzyficação

A interface de desfuzzyficação é utilizada em controladores nebulosos do tipo clássico com o intuito de obter uma única ação de controle precisa (SANDRI & CORREA., 1999).

Dentre os métodos de desfuzzyficação mais empregados estão os seguintes (SANDRI & CORREA., 1999):

- a. Primeiro Máximo (*First of Maximum* - FOM): Encontra o valor de saída através do ponto em que o grau de pertinência da distribuição da ação de controle atinge o primeiro valor máximo;

- b. Método da Média dos Máximos (*Middle of Maximum* - MOM): Encontra o ponto médio entre os valores que têm o maior grau de pertinência inferido pelas regras;
- c. Método do Centro da Área (*Center of Area* - COA): O valor de saída é o centro de gravidade da função de distribuição de possibilidade da ação de controle.

Os métodos de desfuzzyficação devem ser selecionados de acordo com a natureza do processo a ser controlado e comportamento do controle a ser empregado.

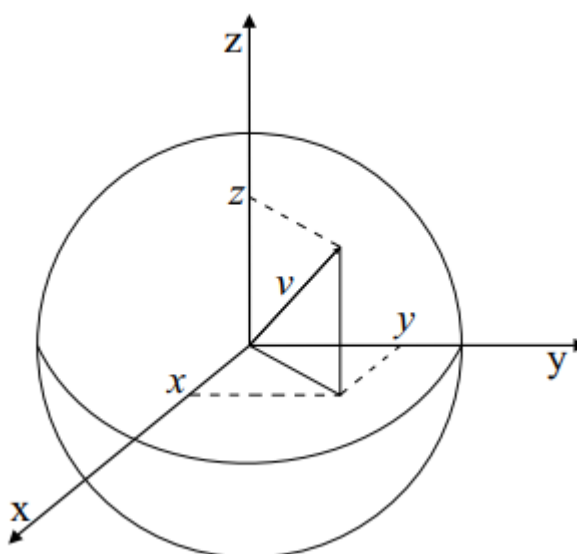
3 MODELO DE PREVISÃO DO COMPORTAMENTO DOS LDR

O presente modelo objetiva prever os valores de tensão dos LDRs para cada horário amostrado, e com eles, traçar o algoritmo fuzzy para o rastreamento solar. A determinação desta tensão depende de algumas variáveis, tais como a resistência do LDR, a radiação direta normal sobre o sensor e a distância teórica do sensor em relação ao disco solar.

A partir do sistema de coordenadas esféricas, e analisando-se a Figura 25, tem-se a seguinte equação que descreve a distância entre a origem e o ponto em questão (ADAMES, 2005):

$$|v| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (3)$$

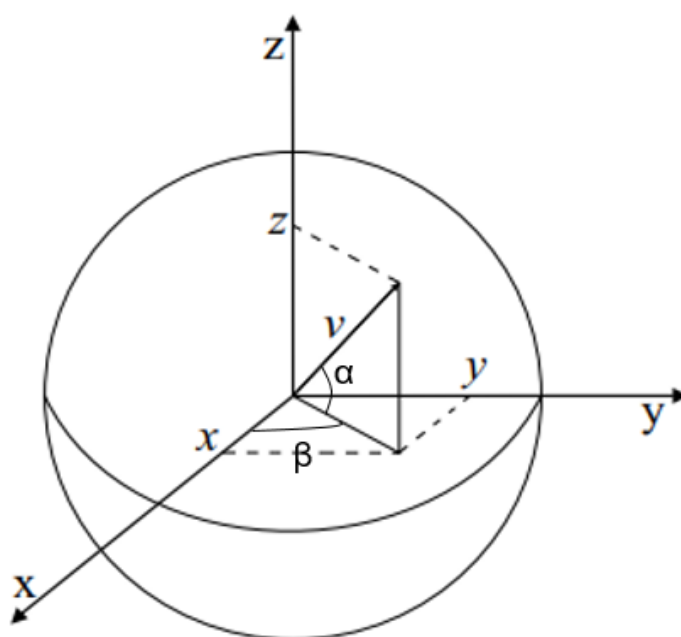
Figura 25 – Representação de coordenadas esféricas.



Fonte: Adames (2005).

Para a presente aplicação, consideraram-se somente os valores positivos para a distância e raio unitário para a esfera para fins de simplificação. Na Figura 26 abaixo, tem-se representados os ângulos α e β , indicando respectivamente a elevação solar e o azimute.

Figura 26 – Representação do azimute e elevação solar.



Fonte: Adaptado de Adames (2005).

Assim, pode-se encontrar o valor da distância em função destes ângulos, como segue:

$$v = \sqrt{(\cos(\beta))^2 + (\sin(\beta))^2 + (\sin(\alpha))^2} \quad (4)$$

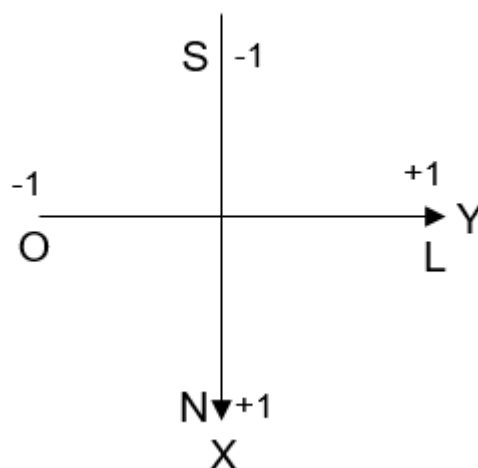
onde:

- $\cos(\beta)$ representa o valor em relação ao eixo X;
- $\sin(\beta)$ representa o valor em relação ao eixo Y;
- $\sin(\alpha)$ representa o valor em relação ao eixo Z.

A Equação 3 representa a distância em relação à origem do sistema esférico. No sistema a ser aplicado, tem-se quatro pontos a serem deslocados da origem para a seu respectivo eixo, de acordo com os pontos cardeais Norte, Sul, Leste e Oeste. O

eixo X, representará estas últimas. Já o eixo Y, representará o Norte e Sul. A Figura 27 ilustra tal deslocamento em relação aos eixos.

Figura 27 – Deslocamento em relação a coordenadas cartesianas.



Fonte: Autoria própria.

Baseando-se na Equação 4 e deslocando-se os pontos para suas respectivas posições, obtém-se as seguintes equações de distância para cada LDR:

$$v_N = \sqrt{(\cos(\beta) - 1)^2 + (\text{sen}(\beta))^2 + (\text{sen}(\alpha))^2} \quad (5)$$

$$v_S = \sqrt{(\cos(\beta) + 1)^2 + (\text{sen}(\beta))^2 + (\text{sen}(\alpha))^2} \quad (6)$$

$$v_L = \sqrt{(\cos(\beta))^2 + (\text{sen}(\beta) - 1)^2 + (\text{sen}(\alpha))^2} \quad (7)$$

$$v_O = \sqrt{(\cos(\beta))^2 + (\text{sen}(\beta) + 1)^2 + (\text{sen}(\alpha))^2} \quad (8)$$

Com os valores de azimute e elevação solar de cada horário fornecidos, obtêm-se as quatro distâncias de cada posição em relação ao disco solar para uma circunferência unitária. Assim, pode-se obter os valores da radiação direta para cada sensor, substituindo-se o valor de distância na seguinte equação (PRATES *et al.*, 1998):

$$I_{LDR} = \left(\frac{\text{sen}(\alpha) \times I}{v^2} \right) \times K \quad (9)$$

onde:

- Sen(α) representa o seno da elevação solar;
- v indica a distância teórica do LDR em relação ao disco solar dentro da circunferência de raio unitário;
- I representa a irradiação solar máxima de 800W/m² para um dia ensolarado de inverno para a região de Curitiba (URBANETZ, 2014);
- K é o fator de conversão de W/m² para lux para o posterior cálculo da resistência do LDR. O fator é de 0,249 (ENVIRONMENTAL GROWTH CHAMBERS, 2017);
- I_{LDR} é a intensidade de radiação solar que chega até o foto-resistor.

Em seguida, calcula-se o valor da resistência de cada LDR, a partir da intensidade da radiação direta:

$$R_{LDR} = \left[\sqrt[4]{\left(\frac{10000}{I_{LDR}} \right)^3} / 10 \right] \times 1000 \quad (10)$$

Finalmente, para a adaptação da lógica fuzzy para utilização num mecanismo de rastreamento solar, seria necessário avaliar o comportamento do LDR em função da incidência de radiação solar. Então, previu-se uma fonte de tensão de 5 V aplicada a um divisor de tensão formado por um LDR e um resistor de 10 k Ω . A tensão obtida é dada por:

$$V_{LDR} = \frac{(10000 \times 5)}{(R_{LDR} \times 10000)} \quad (11)$$

As tensões obtidas a partir do divisor de tensão formado por cada um dos LDRs serão as entradas utilizadas na lógica fuzzy e as saídas serão os ângulos de elevação e azimute referentes à posição do sol num determinado horário.

4 LÓGICA FUZZY PARA RASTREAMENTO

4.1 Biblioteca fuzzy

A biblioteca eFLL (*Embedded Fuzzy Logic Library*) é um projeto desenvolvido pelo *Robotic Research Group* na Universidade Estadual do Piauí (UESPI-Teresina). Escrita em C++/C, ela pode ser aplicada em qualquer sistema embarcado.

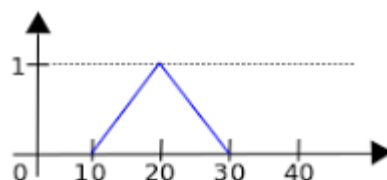
Para a o processo de inferência e composição, usa-se o sistema MAX-MIN e mínimo de Mandani. Já para a defuzzyficação, o método centro de área.

Dentro da eFLL, tem-se os seguintes objetos (ALVES, 2012):

- Objeto Fuzzy: por meio dele, manipulam-se os conjuntos fuzzy, as regras linguísticas, entradas e saídas;
- Objeto FuzzyInput: engloba os conjuntos de entrada que fazem parte do mesmo domínio;
- Objeto FuzzyOutput: análogo ao FuzzyInput, envolve os conjuntos de saída sob o mesmo domínio;
- Objeto FuzzySet: por meio deste é possível construir cada conjunto em questão.

Esta versão da Biblioteca suporta as funções de pertinência triangular, trapezoidal e singleton. Elas são concebidas por meio do construtor FuzzySet (float a, float b, float c, float d). Na Figura 28, tem-se um exemplo genérico da estrutura das funções de pertinência triangulares usadas no trabalho.

Figura 28 – Função Triangular - FuzzySet* fs = FuzzySet(10, 20, 20, 30).



Fonte: Alves, 2012.

Os seguintes objetos auxiliam na montagem das funções de pertinência e nas regras Fuzzy (ALVES, 2012):

- a. Objeto FuzzyRule: utilizado para construir o conjunto de regras do Objeto Fuzzy;
- b. Objeto FuzzyRuleAntecedent: usado para criar o Objeto FuzzyRule. Ele é responsável por fazer a expressão condicional do antecedente de um FuzzyRule;
- c. Objeto FuzzyRuleConsequente: usado para renderizar o objeto FuzzyRule, responsável por retornar o valor da expressão condicional.

4.2 Desenvolvimento do algoritmo fuzzy para rastreamento

O algoritmo fuzzy aplicado ao rastreamento possui quatro valores de entrada e dois de saída. Os dois primeiros referem-se aos valores de tensão oriundos de cada divisor de tensão para cada LDR. Já os dois últimos retornam os valores de azimute e elevação solar.

A partir do modelo de previsão do comportamento dos LDR, é possível obter um valor de referência de tensão para cada horário do dia. Esse modelo é variável de acordo com a estação do ano, sendo que para o algoritmo foram utilizados os valores referentes ao inverno.

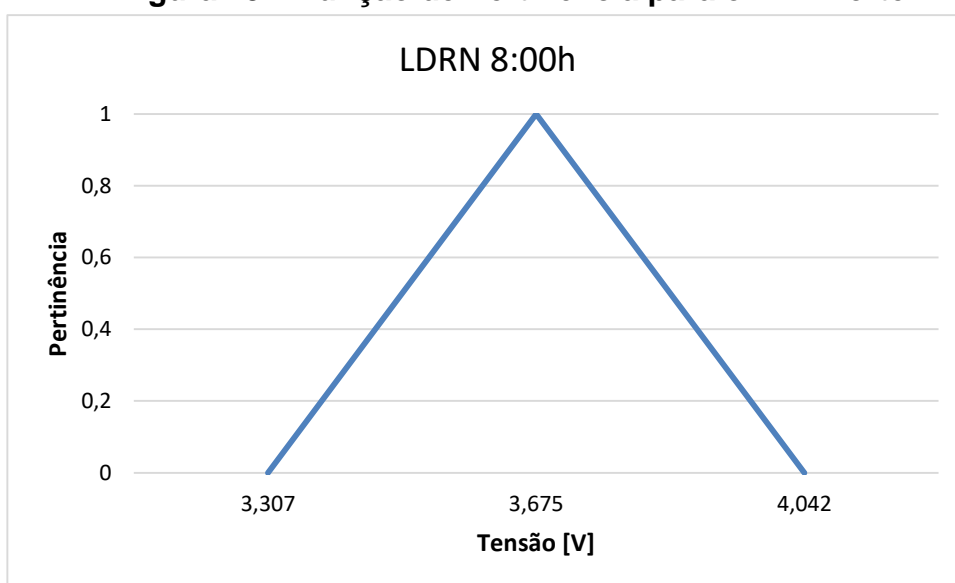
Com base em cada um dos valores de referência, é possível traçar a função de pertinência com formato triangular, conforme já ilustrada na Figura 28. Foi traçada uma função a cada meia hora para cada LDR entre 8h e 16h. O pico da função representa o valor de referência, e os vértices da base representam tolerâncias de $\pm 10\%$ do valor de referência. Como saída, o algoritmo fuzzy retorna duas funções de pertinência triangulares, uma para o valor do azimute e a outra para o valor da elevação solar. Estes valores de referência para o azimute e elevação solar foram extraídos a partir dos valores da carta solar da região central da cidade de Curitiba (SUNEARTHTOOLS, 2017).

Partindo-se do valor de pico de cada função de pertinência para cada hora, é possível encontrar quatro valores para cada horário. Quando os valores de tensão oriundos dos LDR forem equivalentes aos valores de referência de algum dos horários mapeados, e se os quatro valores de tensão estiverem dentro do intervalo de pertinência deste horário, tem-se como saída um valor de azimute e inclinação solar.

Caso estes valores não sejam iguais ao valor de pico, o programa retornará um valor aproximado de acordo com o grau de pertinência dos LDR.

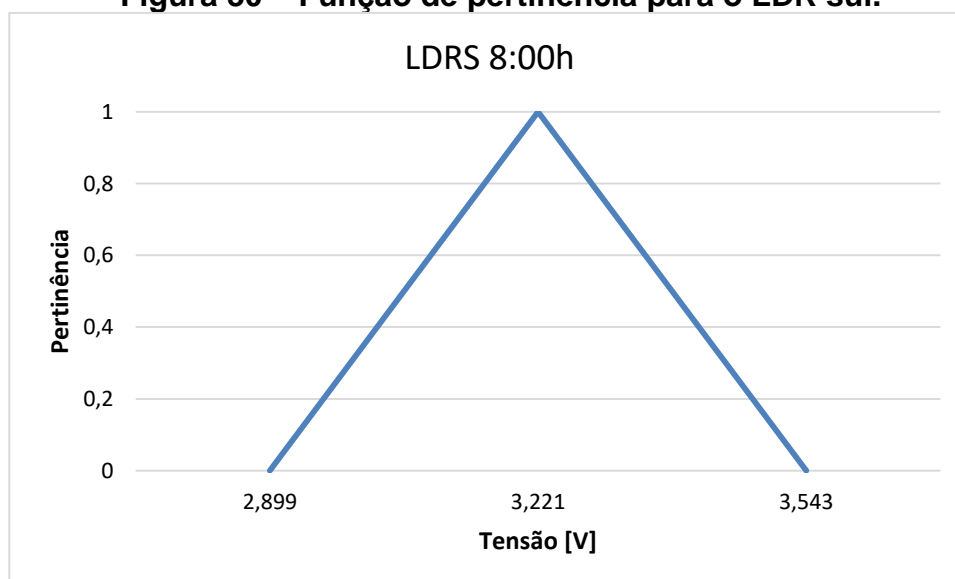
Como exemplo, nas Figuras 29 a 32, tem-se representadas as funções de pertinência de entrada para às 8 horas para os LDRs Norte (LDRN), Sul (LDRS), Leste (LDRL) e Oeste (LDRO), respectivamente:

Figura 29 – Função de Pertinência para o LDR norte.

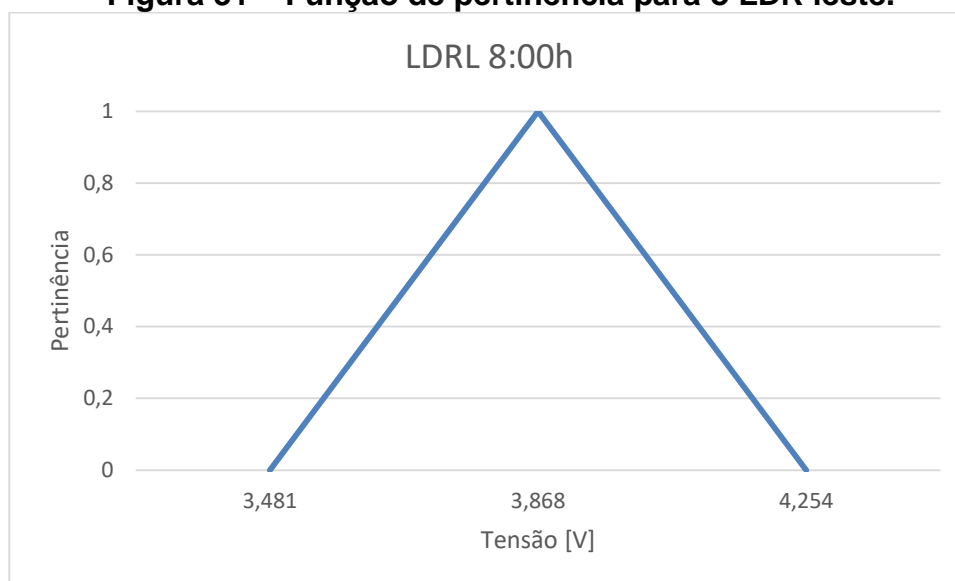


Fonte: Autoria Própria.

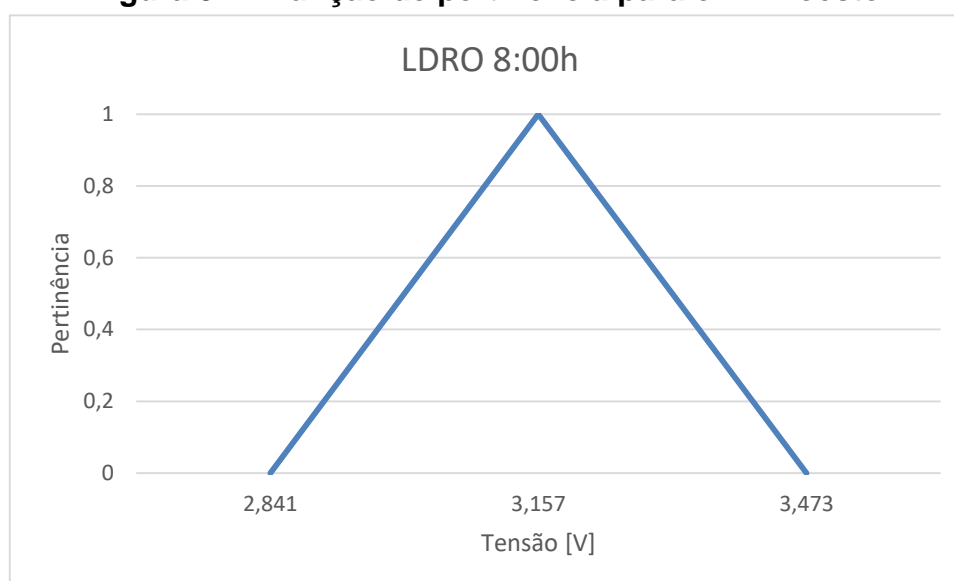
Figura 30 – Função de pertinência para o LDR sul.



Fonte: Autoria Própria.

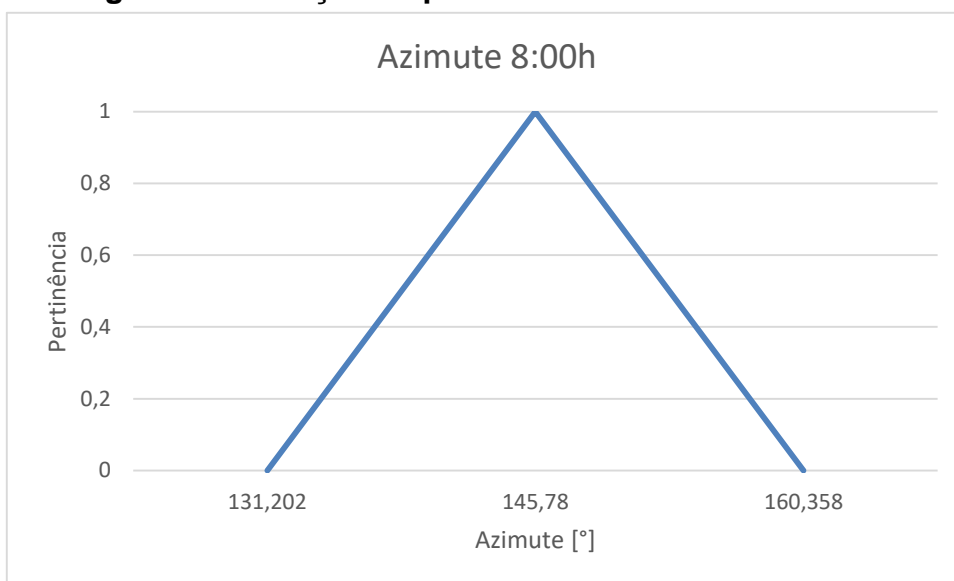
Figura 31 – Função de pertinência para o LDR leste.

Fonte: Autoria Própria.

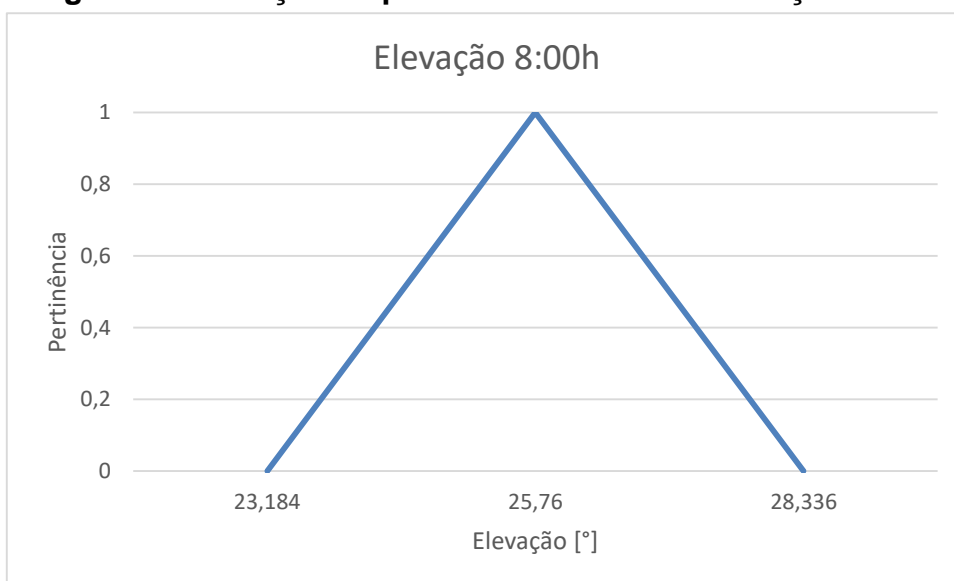
Figura 32 – Função de pertinência para o LDR oeste.

Fonte: Autoria Própria.

Já nas Figuras 33 e 34, tem-se representadas as funções de pertinência de saída para às 8 horas, relativos ao azimute e elevação solar, respectivamente:

Figura 33 – Função de pertinência relativa ao azimute.

Fonte: Autoria Própria.

Figura 34 – Função de pertinência relativa à elevação solar.

Fonte: Autoria Própria.

Para este exemplo, o algoritmo avalia o nível de tensão de cada LDR para então atribuir um grau de pertinência. Caso o grau para todos os LDRs seja igual a 1, a resposta retornará também um grau de pertinência 1 para o azimute e elevação solar, ou seja, $145,7^{\circ}$ e $25,76^{\circ}$, respectivamente. A regra fuzzy construída para as 8:00 horas é a seguinte:

Se <LDRN=8h> e <LDRS=8h> e <LDRL=8h> e <LDRO=8h> então <Azimute=8h> e <Elevação=8h>

De forma análoga, as outras regras fuzzy também foram construídas desta maneira. Abaixo, segue a Tabela 4 que indica o nível de tensão que equivale ao grau de pertinência 1, para cada LDR, e a posição solar dentro do intervalo de horários.

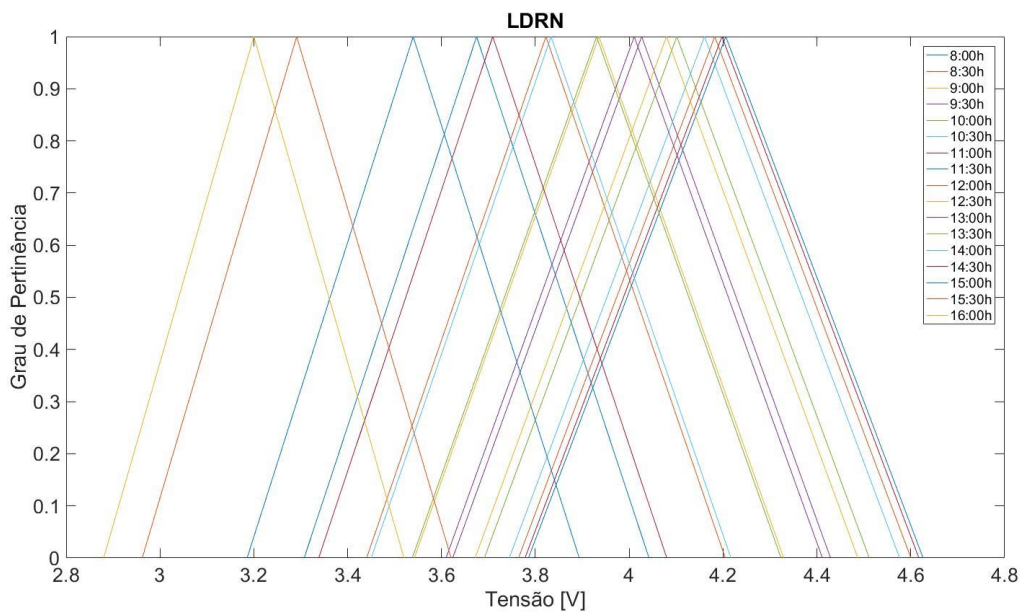
Tabela 4 – Valores usados para a construção das funções de pertinência.

HORA	LDRN	LDRS	LDRL	LDRO	ELEVAÇÃO	AZIMUTE
08:00	3,67471	3,22128	3,86763	3,15714	25,76	145,78
08:30	3,82248	3,34085	3,84775	3,31088	31,18	140,35
09:00	3,93544	3,42117	3,80799	3,42616	36,16	134,06
09:30	4,02639	3,47448	3,75209	3,51640	40,56	126,75
10:00	4,10133	3,50862	3,68010	3,59057	44,22	118,31
10:30	4,16022	3,52861	3,59057	3,65457	46,93	108,74
11:00	4,19752	3,53844	3,48395	3,71251	48,52	98,26
11:30	4,20568	3,54040	3,36440	3,76609	48,86	87,32
12:00	4,18217	3,53498	3,23833	3,81531	47,91	76,53
12:30	4,07938	3,53415	3,03179	3,91430	45,76	66,45
13:00	4,01059	3,51034	2,92937	3,94564	42,57	57,4
13:30	3,93047	3,46927	2,82247	3,96676	38,54	49,51
14:00	3,83338	3,40493	2,70157	3,97700	33,84	42,7
14:30	3,70912	3,30848	2,55490	3,97491	28,64	36,84
15:00	3,53955	3,16354	2,36526	3,95527	23,04	31,76
15:30	3,29126	2,93990	2,10664	3,90455	17,15	27,31
16:00	3,20000	2,85556	2,00000	3,88000	11,03	23,35

Fonte: Autoria Própria.

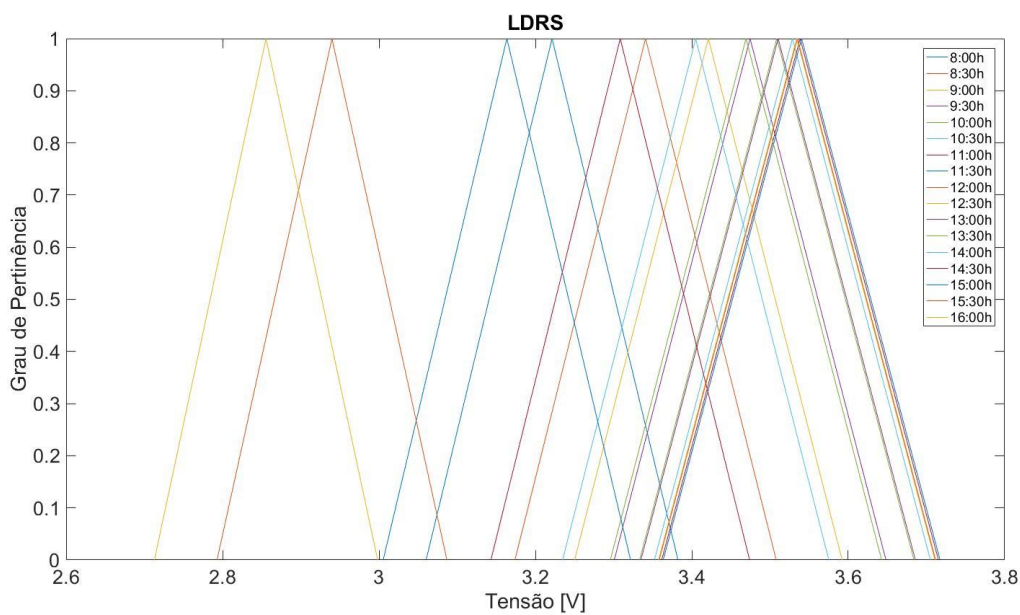
Nas Figuras 35, 36, 37 e 38, tem-se representadas as junções totais das funções de pertinência para cada entrada: LDRN, LDRS, LDRL e LDRO, respectivamente. Nas Figuras 39 e 40, tem-se a representação das saídas Azimute e Elevação.

Figura 35 – Funções de pertinência totais para a entrada LDRN.



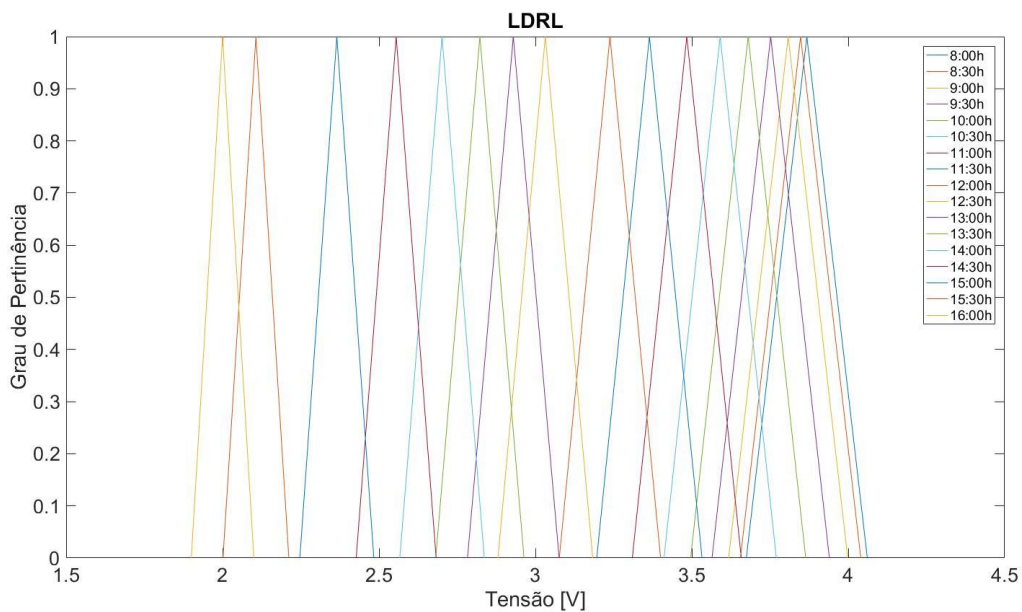
Fonte: Autoria Própria.

Figura 36 – Funções de pertinência totais para a entrada LDRS.



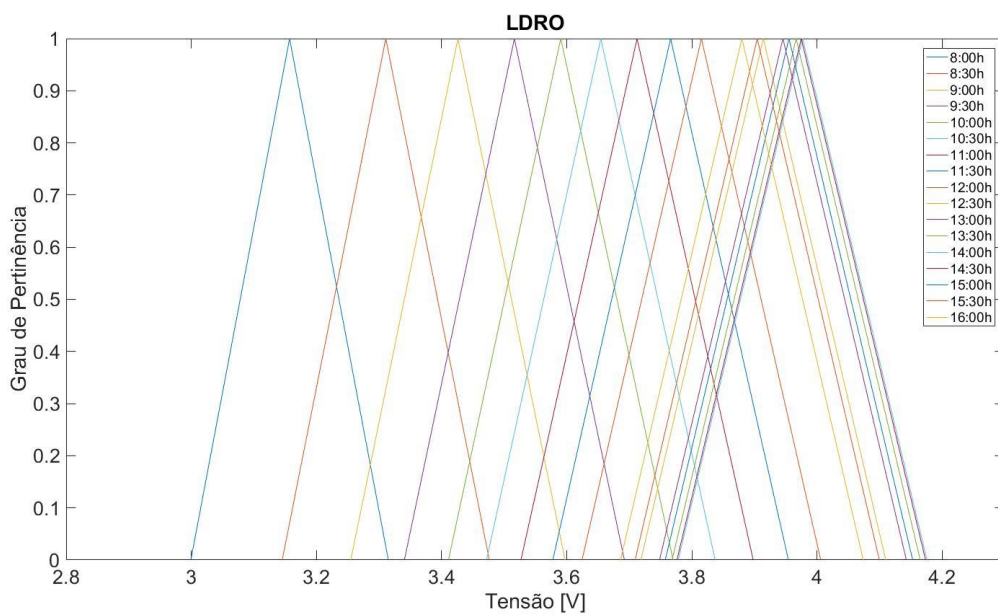
Fonte: Autoria Própria.

Figura 37 – Funções de pertinência totais para a entrada LDRL.

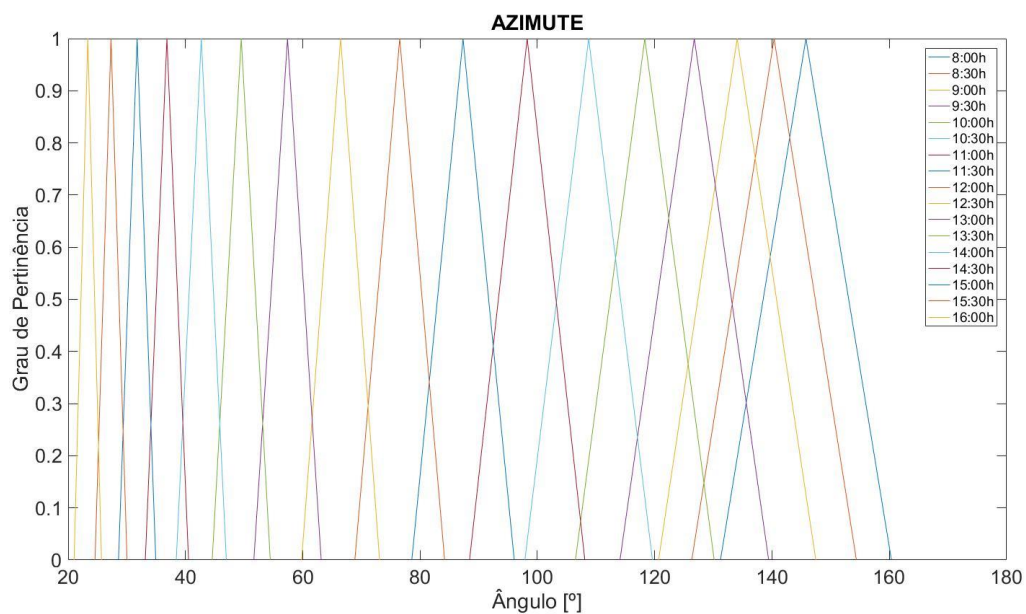


Fonte: Autoria Própria.

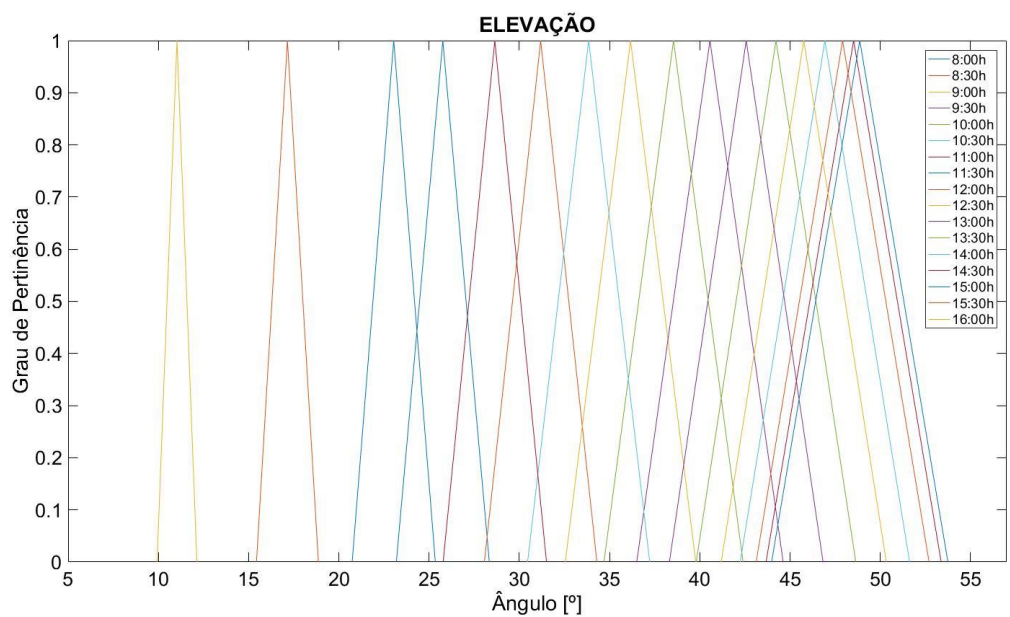
Figura 38 – Funções de pertinência totais para a entrada LDRO.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 39 – Funções de pertinência totais para a saída Azimute.

Fonte: Autoria Própria.

Figura 40 – Funções de pertinência totais para a saída Elevação.

Fonte: Autoria Própria.

5 PROTÓTIPO PARA TESTE

Um protótipo foi desenvolvido para a validação da lógica fuzzy. Este protótipo era composto pelos seguintes elementos:

- a. Plataforma microcontroladora *Arduino*[®];
- b. Estrutura de Sensores;
- c. Servomotores;
- d. Estrutura de fixação para servomotores;
- e. Placas fotovoltaicas.

5.1 Plataforma microcontroladora *Arduino*[®]

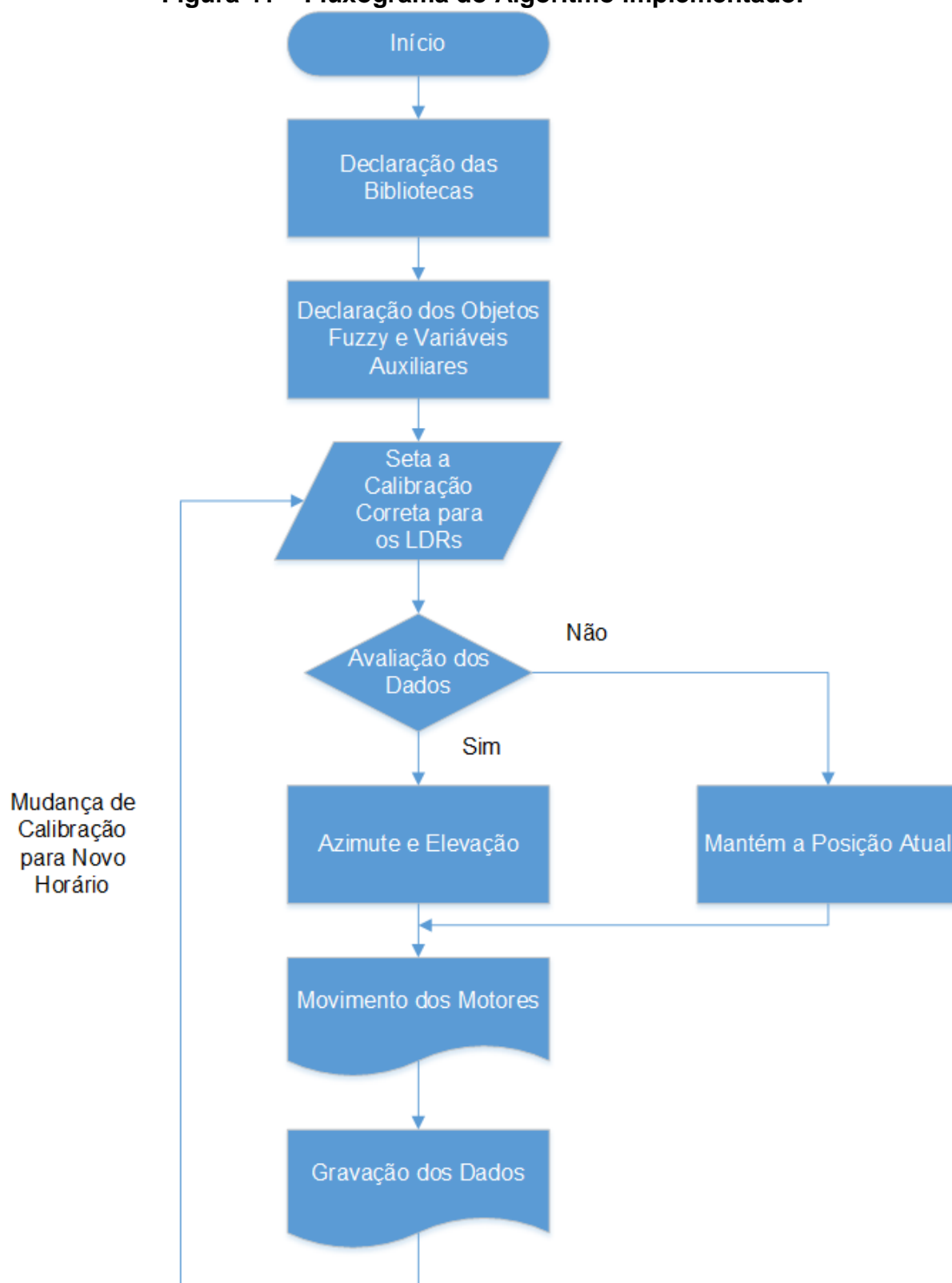
Uma plataforma de hardware da fabricante *Arduino*[®], modelo Mega 2560 R3, foi utilizada para implementação do algoritmo fuzzy e posterior realização dos testes. Essa plataforma é utilizada para projetos complexos, com 54 entradas e saídas digitais, das quais 15 podem ser utilizadas como saídas PWM (*Pulse Width Modulation*), e 16 entradas analógicas. Para a presente aplicação, foram utilizadas 8 entradas analógicas, sendo 4 para a leitura dos sensores de luminosidade e 4 para os dados referentes às placas fotovoltaicas. Além disso, duas saídas PWM foram usadas para comandar os servomotores.

A alimentação da plataforma pode ser realizada pela própria porta serial USB do computador ou mesmo, por uma fonte externa de 9V.

5.1.1 Firmware

Para a programação do algoritmo, a interface *Arduino IDE*[®], versão 1.8.1, desenvolvida pela própria fabricante do *hardware* foi utilizada. O ambiente foi desenvolvido na linguagem Java, mas a programação do algoritmo foi realizada em C. Na Figura 41, tem-se o esquemático de funcionamento do algoritmo.

Figura 41 – Fluxograma do Algoritmo implementado.



Fonte – Autoria Própria.

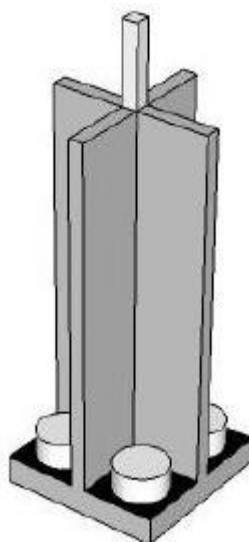
5.2 Estrutura de sensores

Conforme já mencionado, quatro LDRs foram utilizados para a constituição do protótipo. Cada LDR possui raio de 5 mm, com resistência de 8 à 20 K Ω em 10 Lux e 1M Ω em 0 Lux. Operando em uma faixa de temperatura de -30°C à 70°C, possuem uma máxima tensão de 150 V a 25°C e uma dissipação de potência de 100 mW à mesma temperatura.

Utilizando um multímetro digital Minipa ET-1002, foram medidas as resistências correspondentes a um ambiente bem iluminado e um sem iluminação. Essas resistências medidas, de 300 Ω e 8 K Ω , respectivamente, foram definidas como padrão para os testes iniciais. Cada um dos LDR foi definido como Norte, Sul, Leste ou Oeste.

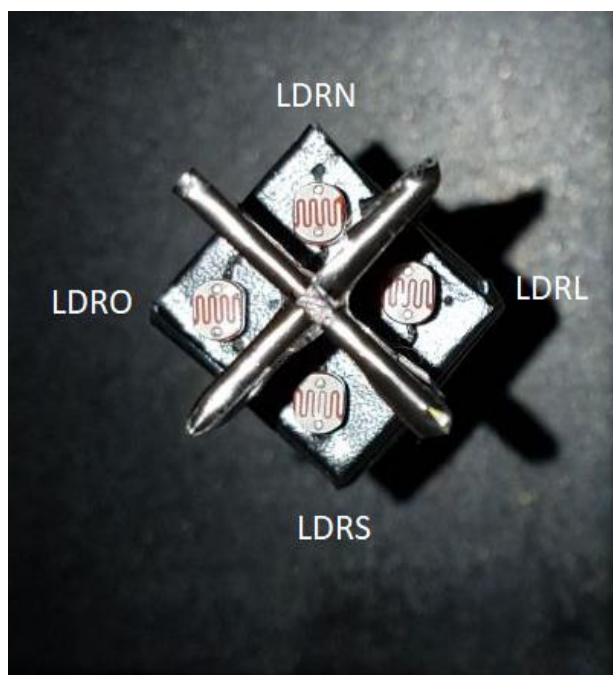
Os foto-resistores foram fixados em uma base elevada e separados por um anteparo em forma de cruz. O sombreamento possibilita que hajam as variações necessárias nas leituras dos sensores para a análise por parte do algoritmo. (SANDRO *et al.*, 2015). Na Figura 42, há um exemplo de estrutura de sombreamento, e nas 43 e 44, a estrutura construída:

Figura 42 – Estrutura com sombreamento.



Fonte: Sandro *et al.*, 2015.

Figura 43 – Disposição dos sensores.



Fonte: Aatoria Própria.

Figura 44 – Estrutura com os sensores.

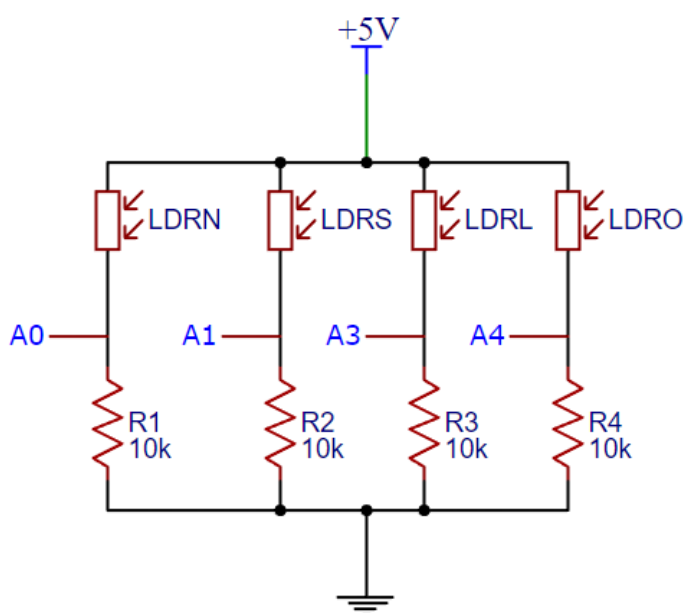


Fonte: Aatoria Própria.

5.2.1 Circuito divisor de tensão para LDR

O circuito divisor de tensão é formado por um LDR e um resistor de 10 k Ω , de modo que a tensão sobre este último seja medida com o intuito de perceber as variações de tensão produzidas pelo deslocamento aparente do Sol (SANDRO *et al.*, 2015). Para o protótipo, foram feitos quatro divisores de tensão. O esquema deste circuito é apresentado na Figura 45.

Figura 45 – Divisores de tensão dos LDRs.



Fonte: Autoria Própria.

onde A0, A1, A3 e A4 representam as entradas analógicas usadas para realizar a leitura dos dados dos LDRs pelo microcontrolador. Na Figura 46, tem-se a base usada para o circuito divisor de tensão:

Figura 46 – Circuito divisor de tensão para os LDR.

Fonte: Autoria Própria.

5.3 Servomotores

Dois servomotores 9g SG90 da fabricante TowerPro (Figura 47) foram utilizados para a montagem do protótipo. Os servomotores são utilizados para movimentação da placa solar. O primeiro é responsável pela movimentação azimutal, e o segundo pela inclinação da placa solar em relação ao Sol. Este modelo de servomotor possui um peso de aproximadamente 9g, e pode rotacionar cerca de 180°, 90° em cada direção.

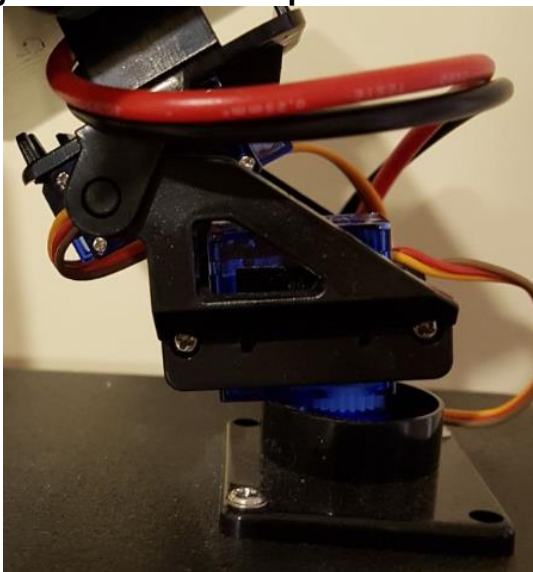
Ambos foram fixados no protótipo por meio de uma estrutura específica que possui encaixe próprio para os servomotores e foram alimentados por uma fonte externa de +5 V, cujo aterramento foi interligado ao da plataforma microcontroladora.

Figura 47 – Servomotor 9G SG 90

Fonte: Autorial Própria.

5.4 Estrutura de fixação para servomotores

Um suporte do tipo Pan/Tilt (Figura 48) para *Arduino*® foi utilizado para a fixação dos servomotores. Esse suporte permite a inclinação e movimentação da placa solar com dois graus de liberdade. Entretanto, devido à limitação física da estrutura e dos servomotores, o alcance do suporte é limitado em termos de inclinação e azimute.

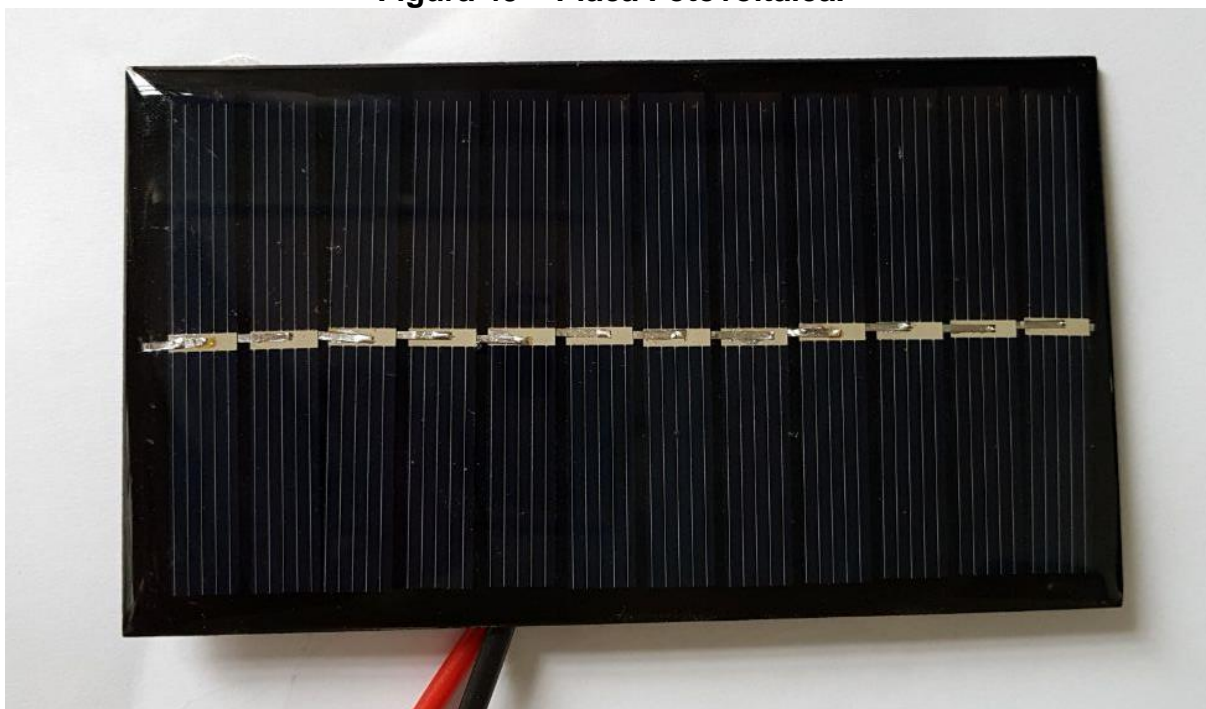
Figura 48 – Estrutura para servomotores.

Fonte: Autorial Própria.

5.5 Placa fotovoltaica

Duas placas fotovoltaicas da fabricante Easytronics do modelo JL 110x60 foram utilizadas para a constituição do projeto. Ela possui tensão de saída de 6 V, potência de saída de 1,2 W e corrente de trabalho de 0 a 200 mA. Suas dimensões são de 110x60x2,5 mm. Uma placa foi utilizada no protótipo de rastreamento, enquanto a outra em uma estrutura fixa para comparação. Na Figura 49, tem-se imagem do modelo do equipamento:

Figura 49 – Placa Fotovoltaica.



Fonte: Autoria Própria.

5.5.1 Circuito de Potência

Para obter os dados de potência das placas solares, utilizaram-se dois circuitos que retornam ao microcontrolador a tensão e corrente fornecidos por elas. Baseando-se nos dados fornecidos pelo fabricante, os circuitos foram concebidos de forma a respeitar a capacidade das placas. Para operar em condições nominais, deve-se possuir uma carga em série de:

$$R = \frac{6}{0,2} = 30\Omega \quad (12)$$

Com uma resistência de 30 Ω em paralelo cada placa pode fornecer sua potência nominal. Entretanto, foram usados resistores com valor comercial de 33 $\Omega/5$ W.

Em série com a resistência de 33 Ω , utilizou-se um resistor *shunt* de 1 $\Omega/5$ W. A medição da tensão no *shunt* é o valor da própria corrente que passa pelo circuito, conforme demonstração abaixo:

$$I_{shunt} = \frac{6}{33} = 0,1765A \quad (13)$$

$$V_{shunt} = 1 \times 0,1765 = 0,1765V \quad (14)$$

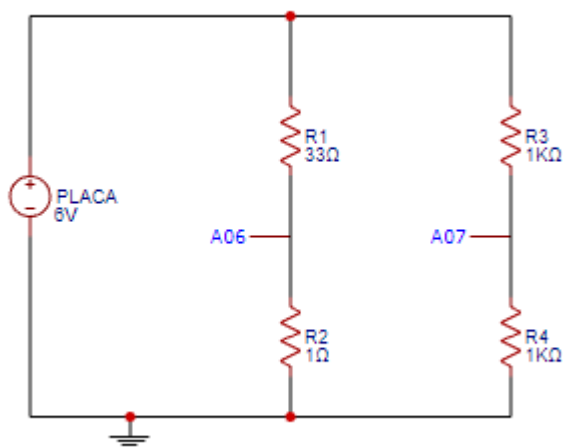
Já para a obtenção da tensão, um divisor de tensão com dois resistores de 1 k Ω foi usado. Para registrar o valor real da tensão fornecida pela placa, o valor de tensão obtido deve ser multiplicado pela seguinte relação:

$$V_{saída} = V_{entrada} \times \frac{R2}{(R1 + R2)} \quad (15)$$

$$\frac{V_{saída}}{V_{entrada}} = \frac{(R2)}{(R1 + R2)} = \frac{1}{2} \quad (16)$$

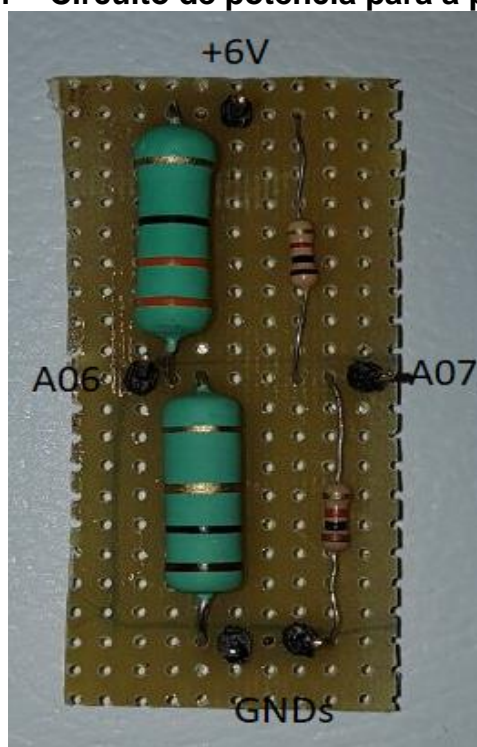
Abaixo, tem-se os circuitos elétricos de potência representados pelas Figuras 50 e 51:

Figura 50 – Esquemático elétrico de potência.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 51 – Circuito de potência para a placa fixa.



Fonte: Autoria Própria.

Tanto para o rastreador, quanto para a estrutura fixa, os circuitos são idênticos. Os pinos A06 e A07 representam as entradas analógicas do microcontrolador usadas

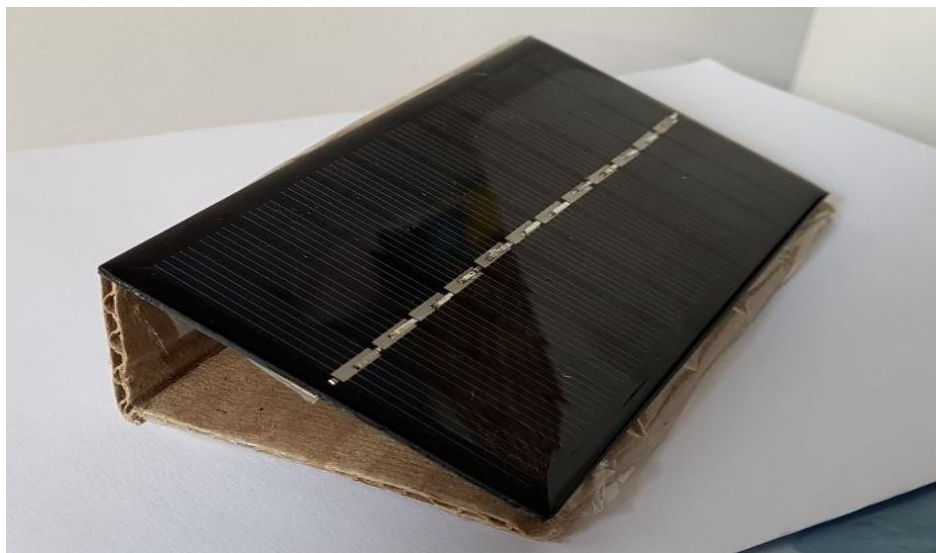
para o rastreador. Já para a estrutura fixa, usam-se as entradas A08 e A09, para o *shunt* e tensão, respectivamente.

Vale ressaltar que como os resistores não são de precisão, podem haver divergências em relação aos resultados práticos.

5.5.2 Estrutura fixa

Com o intuito de obter resultados comparativos de potência em relação à estrutura rastreadora, construiu-se uma estrutura que mantém a placa solar fixa na angulação ótima de modo a maximizar a produção de energia. Ela é função da latitude da localidade. Além disso, deve-se analisar a orientação da placa, que para o caso do Brasil, é aquela voltada para a linha do Equador, ou seja, voltado para o norte. Para Curitiba, esta inclinação é de 25° (NEOSOLAR, 2017). A Figura 52 ilustra a estrutura fixa usada.

Figura 52 – Estrutura fixa.

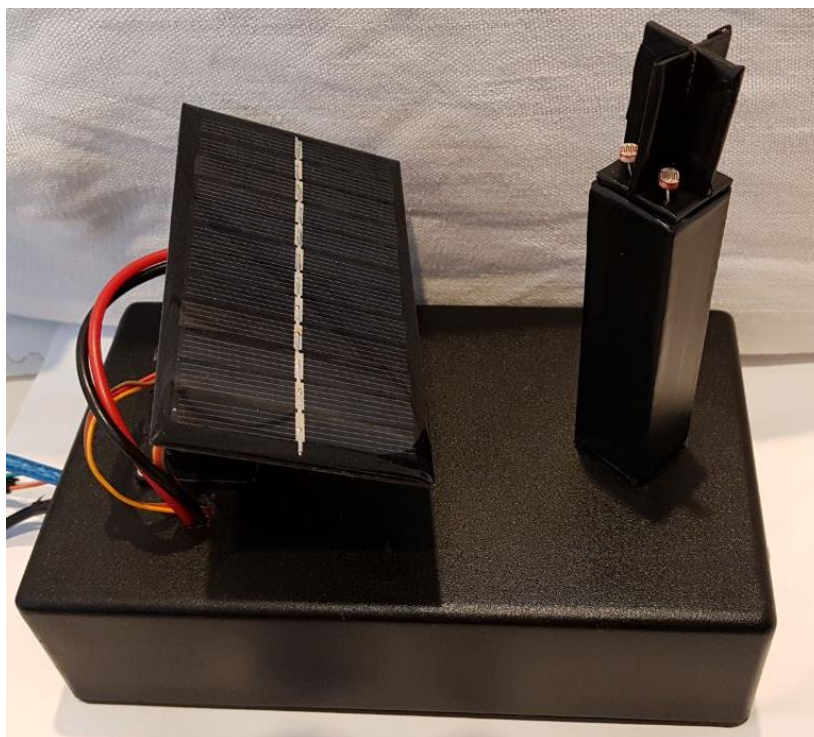


Fonte: Autoria Própria.

5.6 Esquema de montagem do protótipo

O protótipo foi montado conforme ilustram as Figuras 53 e 54. Dentro de um suporte, foram colocados a plataforma *Arduino*® e o circuito divisor de tensão para os LDRs. Em cima da estrutura, foram fixados o suporte para os servomotores e para a placa, e também os quatro LDR, que possuem uma estrutura para sombreamento. Os servomotores são alimentados por uma fonte externa e a plataforma microcontroladora é alimentada pelo cabo serial (USB) do computador. Os LDRs são alimentados a partir da plataforma.

Figura 53 – Esquema de montagem do protótipo: Visão superior.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 54 – Esquema de montagem do protótipo: Visão inferior

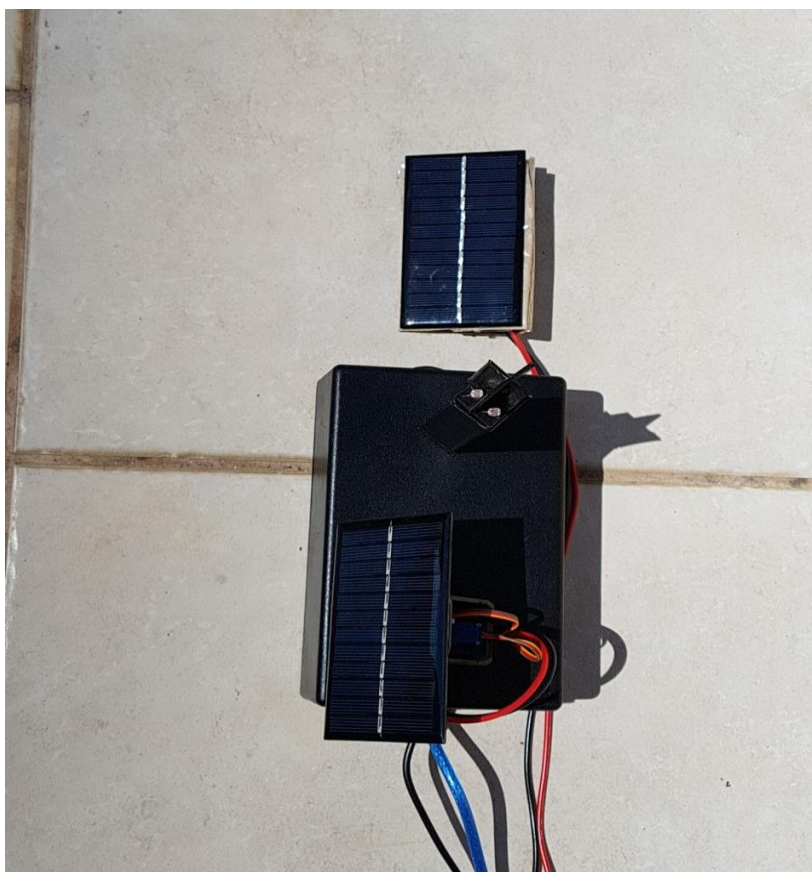


Fonte: Autoria Própria.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

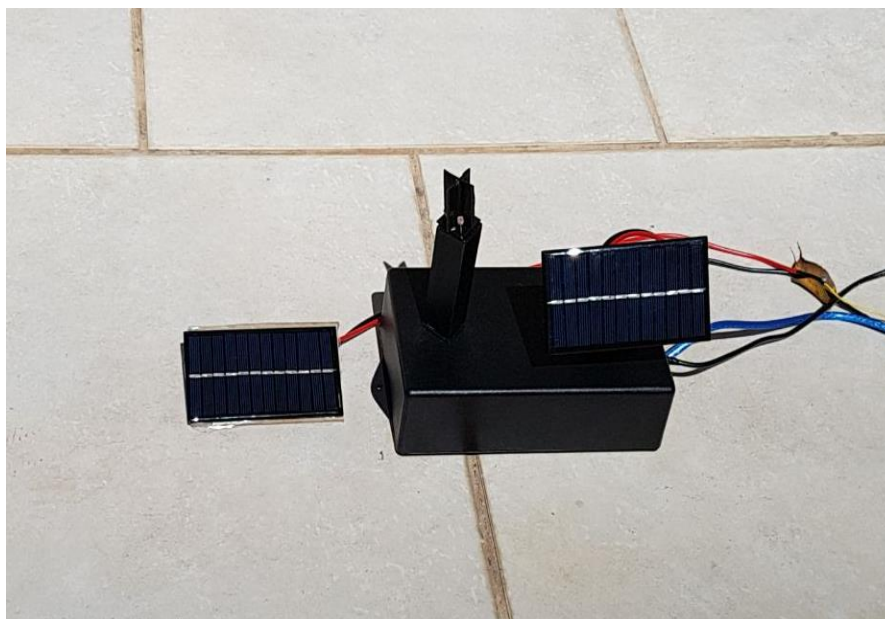
Após toda a configuração de *hardware* e *software* do sistema, foram realizados testes para observar como este se comportava quando todos os sensores estavam sob a mesma calibração e com ajuste para cada período de 30 minutos. Os testes foram realizados em dias predominantemente ensolarados e com a estrutura voltada para a direção Norte do local de teste. Nas Figuras 55 e 56, tem-se a estrutura com a placa solar fixa e com a móvel no local de teste.

Figura 55 – Estruturas no local de teste.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 56 – Estrutura sob outra vista no local de teste.



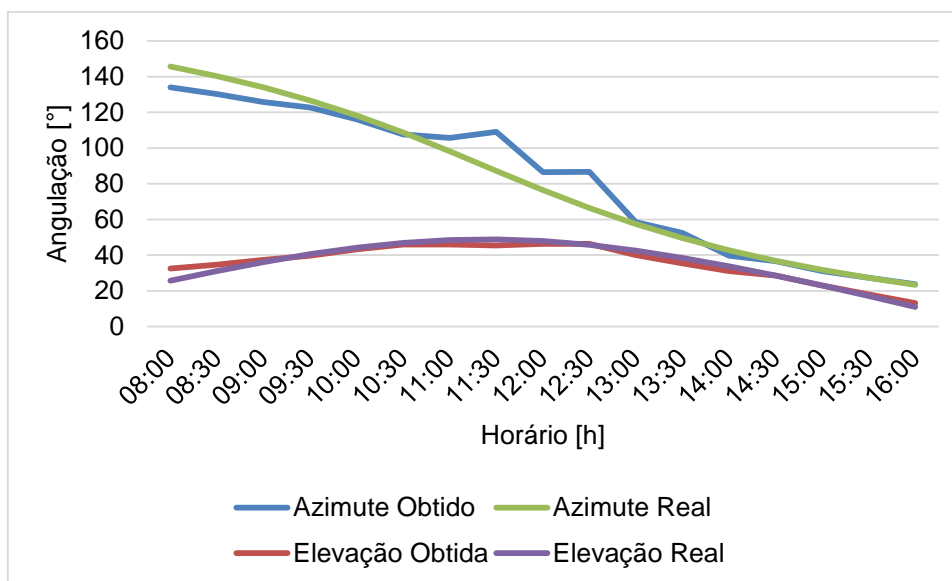
Fonte: Autoria Própria.

Com todos os sensores sob a mesma calibração, o sistema não obteve êxito em encontrar as devidas posições referentes ao azimute e da elevação solar, pois os valores retornados pelos LDRs, ao longo do tempo, estavam fora dos intervalos das funções de pertinência. Assim, nenhuma regra fuzzy foi satisfeita, de modo que o sistema permaneceu em sua posição inicial durante todo o período de teste do dia em questão, ou seja, das 8:00 horas até às 16:00 horas.

No segundo modo de funcionamento, o algoritmo foi modificado de forma que a cada meia hora, tivesse a calibração dos sensores alterada para que estes retornassem leituras de tensão condizentes com os valores dos intervalos das funções de pertinência de cada horário. Os valores de calibração foram obtidos por meio de ajuste via *firmware*.

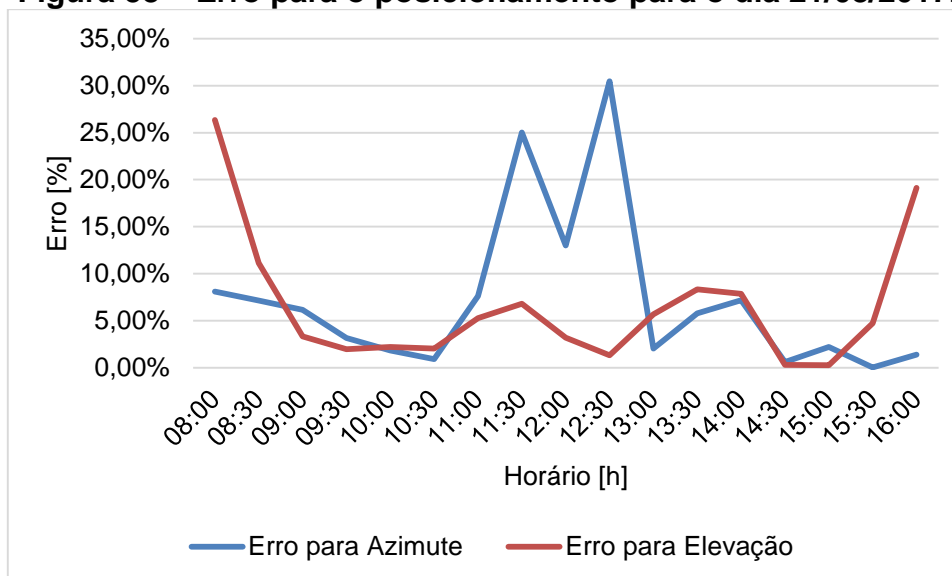
Foram realizados testes ao longo dos dias 21, 22 e 24 de agosto, sendo enviados via porta serial para um microcomputador, os dados referentes ao posicionamento e potência das placas fotovoltaicas. Vale ressaltar que no dia 21, o clima estava ensolarado entre nuvens, no dia 22, nublado e no dia 24, sol entre nuvens. Nas Figuras 57, 59 e 61, tem-se os dados de posicionamento retornados pelo algoritmo em relação àqueles esperados para cada dia. Já nas Figuras 58, 60 e 62, tem-se o erro em relação à posição medida e a real.

Figura 57 – Avaliação do posicionamento para o dia 21/08/2017.



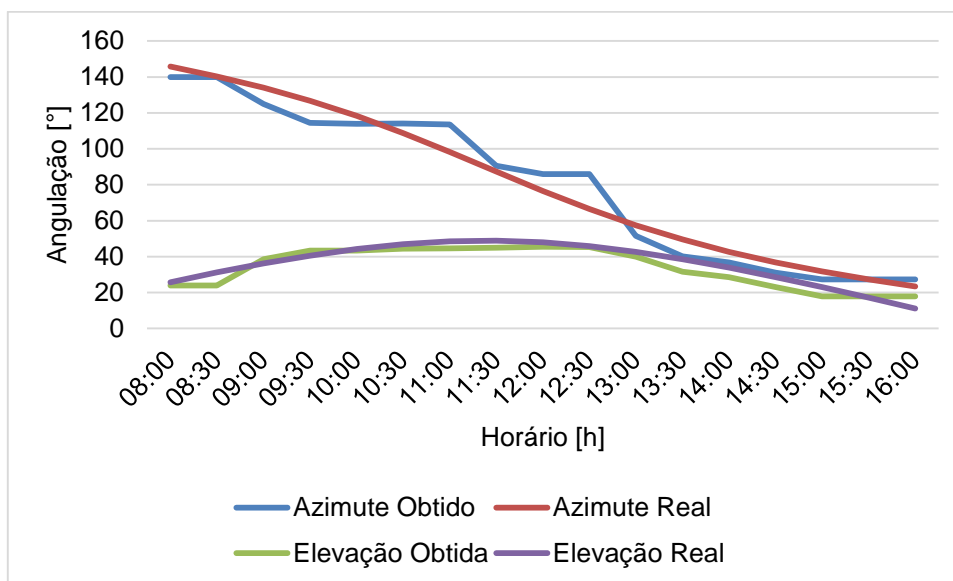
Fonte: Autoria Própria.

Figura 58 – Erro para o posicionamento para o dia 21/08/2017.



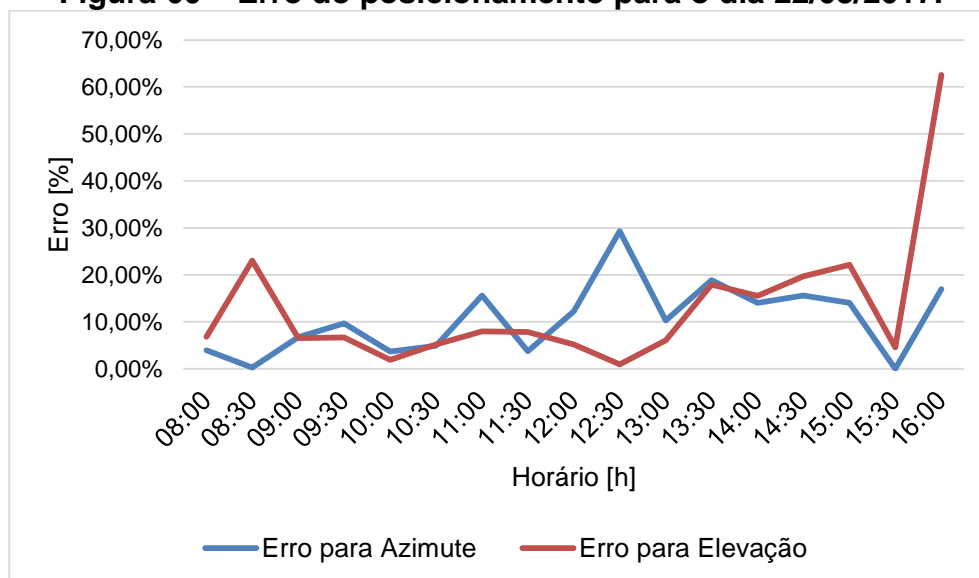
Fonte: Autoria Própria.

Figura 59 – Avaliação do posicionamento para o dia 22/08/2017.



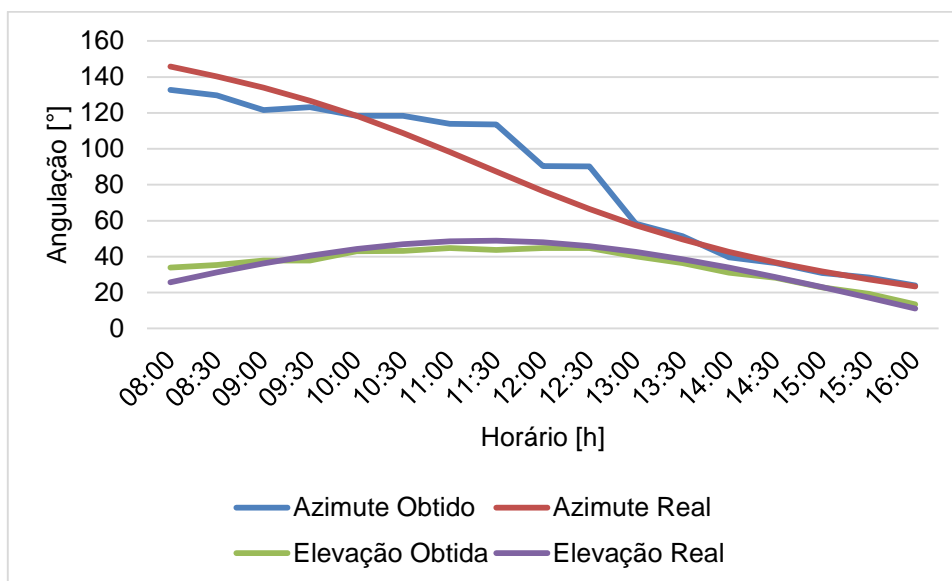
Fonte: Autoria Própria.

Figura 60 – Erro do posicionamento para o dia 22/08/2017.



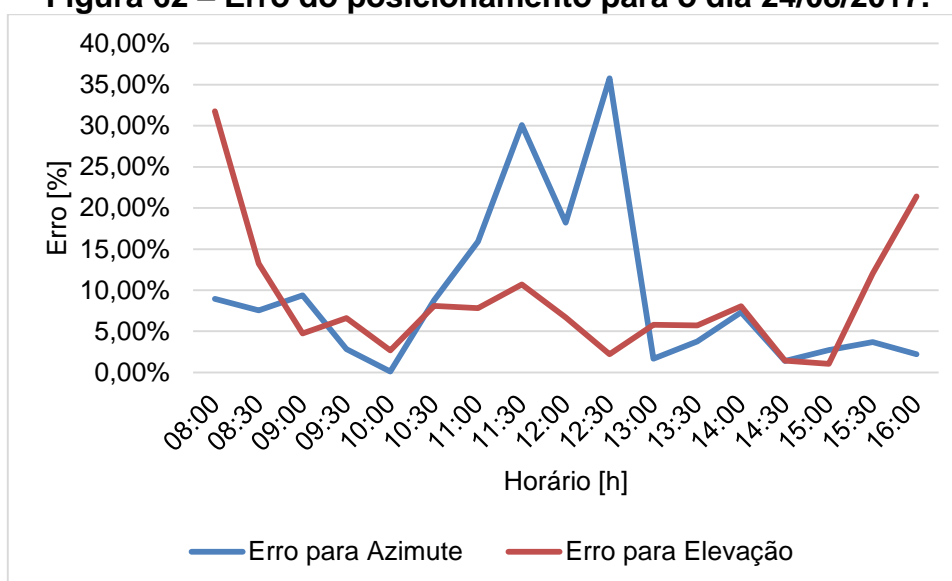
Fonte: Autoria Própria.

Figura 61 – Avaliação do posicionamento para o dia 24/08/2017.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 62 – Erro do posicionamento para o dia 24/08/2017.

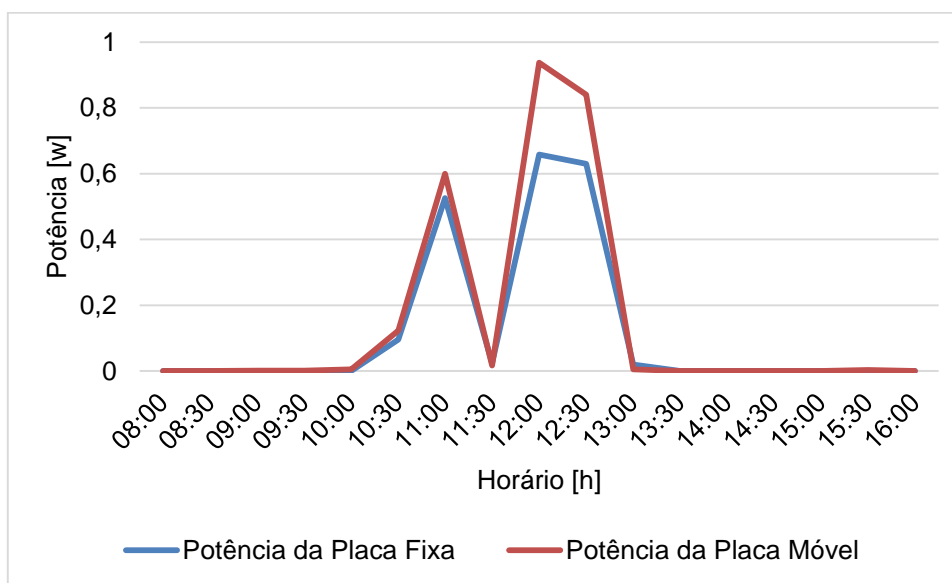


Fonte: Autoria Própria.

Em relação ao azimute, nota-se que existe uma divergência comum entre os 3 gráficos no intervalo entre as 10:00 horas e 13:00 horas. Neste intervalo, o erro relativo atinge picos de até 30% ao meio-dia, para então retornar a valores aceitáveis. Tal fato pode ser justificado devido à uma imprecisão na calibração dos sensores, o que afetou o no retorno da posição adequada pelo algoritmo. Já em relação à elevação solar, há uma divergência comum entre os valores obtidos e esperados no início da manhã e início da noite.

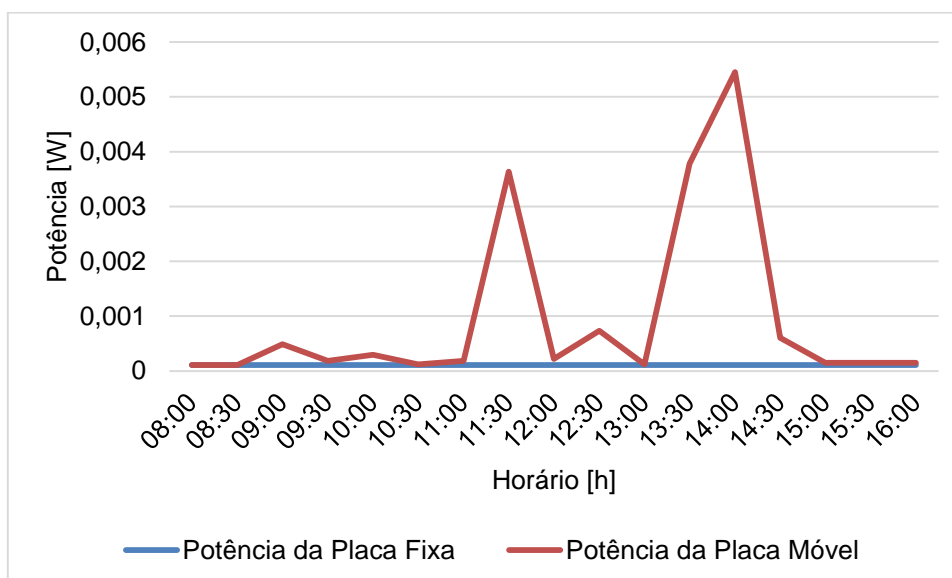
Para a potência, foram registrados os valores referentes à corrente e tensão fornecida pelas placas solares. A partir disso, calculou-se a potência de cada estrutura. Nas Figuras 63, 64 e 65, tem-se as potências calculadas para cada dia, respectivamente.

Figura 63 – Avaliação de desempenho das placas para o dia 21/08/2017.



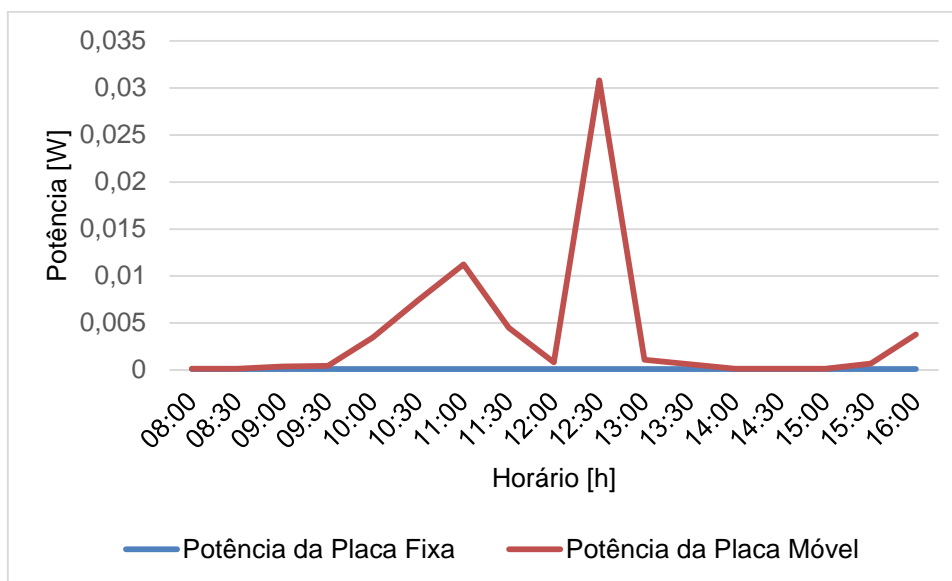
Fonte: Autoria Própria.

Figura 64 – Avaliação do desempenho das placas para o dia 22/08/2017.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 65 – Avaliação do desempenho das placas para o dia 24/08/2017.



Fonte: Autoria Própria.

Para o dia 21, observa-se que o sistema móvel apresentou um desempenho melhor em relação ao fixo, atingindo o máximo ponto de potência da placa solar ao meio dia.

Para os dias nublados, as placas utilizadas não apresentaram valores de corrente e tensão significativos, de maneira que o microcontrolador não possuiu sensibilidade suficiente para captar tais valores. Em certos momentos, a placa móvel conseguiu fornecer valores que pudessem ser registrados pelo equipamento, ao passo que a fixa não forneceu valor algum. Uma possível solução para a questão, seria a de utilizar placas fotovoltaicas com um melhor desempenho, ou mesmo utilizar um microcontrolador cujo conversor analógico digital tenha resolução superior maior que 10 bits. Tal fato, corrobora para a confirmação da melhor eficiência do sistema móvel em relação ao fixo.

7 CONCLUSÕES

A energia solar surge como uma solução viável para a geração energética, uma vez que ela é renovável e que novas tecnologias surjam para baratear e otimizar o processo de captação.

O projeto objetivou desenvolver um algoritmo de rastreamento solar baseado em lógica fuzzy, que posteriormente foi implementado em uma estrutura física com dois graus de liberdade. Além disso, objetivou-se avaliar o desempenho energético de duas placas solares, sendo uma fixa e outra acoplada na estrutura física.

O sistema pode ser aplicado em qualquer localidade. Entretanto, o mesmo deve ser atualizado para as novas condições. Novos valores de referência devem ser obtidos para a atualização das funções de pertinência de entrada. Tais valores irão variar de acordo com a latitude e longitude da nova localidade e de teste.

A estrutura física utilizada atende às necessidades de posicionamento. Entretanto, ela possui limitações de movimento em relação ao azimute, pois o servomotor usado não permite rotação em 360°. Em alguns períodos do ano, a trajetória azimutal do Sol foge do alcance de 180° do servomotor usado, o que poderia limitar a atuação do rastreamento. O sistema de sensores necessita de calibração regular, de modo que os valores medidos continuem confiáveis ao longo do tempo.

A plataforma de *hardware* atende com folga às necessidades de processamento do projeto. Poderia ser utilizado algum dispositivo mais simples, contanto que possuísse o número de entradas e saídas PWM mínimas para o projeto. A biblioteca fuzzy utilizada também pode ser aplicada a outros sistemas embarcados baseados em linguagem C.

Os valores de azimute e de elevação solar obtidos a partir do algoritmo foram aceitáveis. Já em relação à potência das placas solares, aquela acoplada à estrutura de rastreamento apresentou desempenho superior em relação à fixa, independente das condições climáticas apresentadas. O sistema, apesar ser de pequeno porte, pode ser adaptado para estruturas fotovoltaicas convencionais.

8 REFERÊNCIAS

ADAMES, M. R. **Geometria Esférica**. 2005. Monografia (Graduação em Licenciatura em Matemática). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

ALVES, A.J. **eFLL - A Fuzzy Library for Arduino and Embeded Systems**. Disponível em: < <http://www.zerokol.com/2012/09/arduinofuzzy-fuzzy-library-for-arduino.html>> Acesso em: 05 de agosto de 2017.

ARDUINO. Disponível em: < <https://www.arduino.cc/>>. Acesso em: 06 de agosto de 2017.

BLUESOL ENERGIA SOLAR, 2014. **Introdução a Sistemas de Energia Solar Fotovoltaica**. Disponível em: <<http://www.blue-sol.com/energia-solar/wp-content/uploads/2014/04/introducao.pdf>> Acesso em: 05 de maio de 2016.

BRITISH PETROLEUM, 2015. **Statistical Review of World Energy June 2015** Disponível em: <<http://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/Energy-economics/statistical-review-2015/bp-statistical-review-of-world-energy-2015-full-report.pdf>>. Acesso em: 24 de setembro de 2015.

CORTEZ, R. **Sistema de seguimento solar em produção de energia fotovoltaica**. (2013). Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2013.

COSMICOPIA, 2012. **The Sun**. Disponível em: <<http://helios.gsfc.nasa.gov/sun.html>>. Acesso em: 03 de maio de 2016.

DE PESQUISA ENERGÉTICA, EPE–Empresa. Estudos de demanda de energia 2050: Nota Técnica DEA 13/14. 2014.

DUNN, W. C. **Fundamentos de Instrumentação Industrial e Controle de Processos**. Porto Alegre: Bookman, 2013.

ENVIRONMENTAL GROWTH CHAMBERS. **Lighting Radiation Conversion**. Disponível em: <http://www.egc.com/useful_info_lighting.php>. Acesso em: 24 de agosto de 2017.

FRADEN, J., **Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications**. New York: Springer, 2010.

GIL, F. J. G. et al. **A review of solar tracker patents in Spain**. In: WSEAS INTERNATIONAL CONFERENCE ON RENEWABLE ENERGY SOURCES, 3., 2009, Tenerife-Espanha, p. 292–297.

GOMIDE, F. A. C.; GUDWIN, Ricardo Ribeiro. **Modelagem, controle, sistemas e lógica fuzzy**. SBA controle & Automação, v. 4, n. 3, p. 97-115, 1994.

GOODWIN, D. **Mechatronics Sensors & Signal Conditioning**. 2012. Department of Computer Science and Technology University of Bedfordshire Universidade. Disponível em: <https://www2.warwick.ac.uk/fac/sci/physics/research/condensedmatt/imr_cdt/students/david_goodwin/teaching/mechatronics/l9_sensorssignals_cis009_2.pdf>. Acesso em: 16 de junho de 2016.

GREENPRO, A. P. C. **Energia Fotovoltaica-Manual sobre tecnologias, projecto e instalação**. Europa: Comissão Europeia, 2004.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2014. **Technology Roadmap Solar Photovoltaic Energy 2014 edition**. Disponível em: <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TechnologyRoadmapSolarPhotovoltaicEnergy_2014edition.pdf>. Acesso em: 15 de maio de 2016.

KANYARUSOKE K.E. *et al.* **Are solar tracking technologies feasible for domestic applications in rural tropical Africa?** Journal of Energy in Southern Africa, 26: 86-95, 2015.

KUMAR, J. **LDR Characteristics**. Bangalore, Índia. 2002. Disponível em: <http://kamaljeeth.net/newsite/index.php?route=product/product/getProductAttachmentFile&attachment_id=329>. Acesso em 16 de junho de 2016.

MENDES, J. A.; STEVAN, S. L. **LDR e Sensores de luz ambiente: funcionamento e aplicações**. Ponta Grossa: UTFPR, 2013.

MOUSAZADEH, H. et al. **A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output**. Renewable and sustainable energy reviews, 2009, v. 13, p. 1800-1818.

NEOSOLAR. **Projeto – Energia Solar Fotovoltaica** Disponível em <<https://www.neosolar.com.br/aprenda/saiba-mais/sistemas-conectados-grid-tie/projeto/>> Acesso em 30 de agosto de 2017.

OLIVEIRA, M. M. **Análise do desempenho de um gerador fotovoltaico com seguidor solar azimutal**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

PARU SOLAR. **Tracker**. Disponível em < <http://www.iparu.com/tracker>>. Acesso em 30 de agosto de 2017.

PENIDO, E.C.C.; TRINDADE, R.S. **Microcontroladores**. Ouro Preto: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais; Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, Colégio Técnico Industrial de Santa Maria; Rede e-Tec Brasil, 2013.

PEREIRA, E.B., MARTINS, F.B, ET AL, 2006 **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. Disponível em: < http://ftp.cptec.inpe.br/labren/publ/livros/brazil_solar_atlas_R1.pdf >. Acesso em: 15 de maio de 2016.

PINHO, J.T., GALDINO, M.A., et al, 2015. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos, 2014**. Disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf. Acesso em: 24 de setembro de 2015.

PRATES, José E.; ZAICOVSKI, Marcelo B.; GUETTER, Alexandre K. **Inventário de energia solar no Paraná**.

REZENDE, S. M. **Materiais e Dispositivos Eletrônicos**. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2004. v. 1. 547p.

SANDRI, S.; CORREA, C. **Lógica nebulosa**. Instituto Tecnológico da Aeronáutica–ITA, V Escola de Redes Neurais, pp. C073-c090, São José dos Campos, 1999.

SANTOS, S. A. C.; SILVA, A. A. H.; CARVALHO, L. J.; **Desenvolvimento de um mecanismo de posicionamento de placas fotovoltaicas para rastreamento solar via Raspberry PI**. 2015. 108f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

SEGUEL, J. **Projeto de um Sistema Fotovoltaico Autônomo de Suprimento de Energia usando técnica MPPT e Controle Digital**. 2009 . 222 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

SOLARTERRA ENERGIAS ALTERNATIVAS. 2008. **Energia Solar Fotovoltaica Guia Prático**. Disponível em:

<<https://permacoletivo.files.wordpress.com/2008/05/curso-energia-solar-fotovoltaica.pdf>>. Acesso em: 18 de maio de 2016.

SUNEARTHTOOLS. Disponível em: <<https://www.sunearthtools.com/pt/index.php>>. Acesso em: 06 de agosto de 2017.

TRENBERTH, K. E., FASULLO, J. T., KIEHL, J. **Earth's global energy budget.** 2009. Disponível em: <<http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/2008BAMS2634.1>>. Acesso em: 24 de setembro de 2015.

TREVELIN, F. C. **Estudo Comparativo Entre Métodos de Rastreamento Solar Aplicados a Sistemas Fotovoltaicos.** 2014. 67 f. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com ênfase em Eletrônica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

URBANETZ, Jair J. **Introdução a energia solar fotovoltaica e o SFVCR do escritório verde da UTFPR.** 2014. Disponível em: <http://www.iep.org.br/semana_engenharia14/wp-content/uploads/Energia-Solar.pdf>. Acesso em: 24 de agosto de 2017.

APÊNDICE A - CÓDIGO

// Código para a construção do controlador fuzzy para às oito horas

```
#include <Fuzzy.h>
#include <FuzzyComposition.h>
#include <FuzzyInput.h>
#include <FuzzyIO.h>
#include <FuzzyOutput.h>
#include <FuzzyRule.h>
#include <FuzzyRuleAntecedent.h>
#include <FuzzyRuleConsequent.h>
#include <FuzzySet.h>
#include <Servo.h>
```

```
Fuzzy* fuzzy = new Fuzzy();
```

```
// LDR-NORTE
```

```
FuzzySet* oiton = new FuzzySet(3.123504, 3.674710, 3.674710, 4.225916);
//Função triangular para às 8:00 horas para o LDR Norte
```

```
// LDR-SUL
```

```
FuzzySet* oitos = new FuzzySet(2.738091, 3.221284, 3.221284, 3.704476);
//Função triangular para às 8:00 horas para o LDR Sul
```

```
// LDR-LESTE
```

```
FuzzySet* oitol = new FuzzySet(3.287484, 3.867629, 3.867629, 4.447773);
//Função triangular para às 8:00 horas para o LDR Leste
```

```
// LDR-OESTE
```

```
FuzzySet* oitoo = new FuzzySet(2.683565, 3.157135, 3.157135, 3.630705);
//Função triangular para às 8:00 horas para o LDR Oeste
```

```
//AZIMUTE
```

```
FuzzySet* oitoazi = new FuzzySet(131, 145, 145, 153); //Função triangular para às
8:00 horas para o Azimute
```

```
//ELEVAÇÃO
```

```
FuzzySet* oitoele = new FuzzySet(23, 25, 25, 28); //Função triangular para às 8:00
horas para a Elevação
```

```
//-----
```

```
//Associação das funções de pertinência às respectivas entradas fuzzy
```

```
// Entrada LDRN
```

```
FuzzyInput* LDRN = new FuzzyInput(1);
```

```

LDRN -> addFuzzySet(oiton);

// Entrada LDRS
FuzzyInput* LDRS = new FuzzyInput(2);
LDRS -> addFuzzySet(oitos);

// Entrada LDRL
FuzzyInput* LDRL = new FuzzyInput(3);
LDRL -> addFuzzySet(oitol);

// Entrada LDRO
FuzzyInput* LDRO = new FuzzyInput(4);
LDRO -> addFuzzySet(oitoo);

//Associação das funções de pertinência às respectivas saídas fuzzy

// Saida Azimute
FuzzyOutput* azimute = new FuzzyOutput(1);
azimute -> addFuzzySet(oitoazi);

// Saida Elevação
FuzzyOutput* elevacao = new FuzzyOutput(2);
elevacao -> addFuzzySet(oitoele);

//-----

// Construção da regra fuzzy para às oito horas
// Se LDRN=oito e LDRO=oito e LDRS=oito e LDRL=oito então Azimute=oito e
Elevação=oito

FuzzyRuleAntecedent* LDRNoitonAndLDROoitoo = new FuzzyRuleAntecedent();
LDRNoitonAndLDROoitoo->joinWithAND(oiton, oitoo);
FuzzyRuleAntecedent* LDRSoitosAndLDRLoitol = new FuzzyRuleAntecedent();
LDRSoitosAndLDRLoitol->joinWithAND(oitos, oitol);
FuzzyRuleAntecedent* ifLDRNoitonAndLDROoitooAndLDRSoitosAndLDRLoitol =
new FuzzyRuleAntecedent();
ifLDRNoitonAndLDROoitooAndLDRSoitosAndLDRLoitol-
->joinWithAND(LDRNoitonAndLDROoitoo, LDRSoitosAndLDRLoitol);

FuzzyRuleConsequent* thenazimuteoitoaziAndelevacaooitoele = new
FuzzyRuleConsequent();
thenazimuteoitoaziAndelevacaooitoele->addOutput(oitoazi);
thenazimuteoitoaziAndelevacaooitoele->addOutput(oitoele);

FuzzyRule* fuzzyRule1 = new FuzzyRule(1,
ifLDRNoitonAndLDROoitooAndLDRSoitosAndLDRLoitol,
thenazimuteoitoaziAndelevacaooitoele);
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule1);

```

```
//-----  
  
void loop() {  
  
  // Associação dos valores dos sensores às entradas fuzzy  
  fuzzy->setInput(1, LDRN);  
  fuzzy->setInput(2, LDRS);  
  fuzzy->setInput(3, LDRO);  
  fuzzy->setInput(4, LDRL);  
  
  fuzzy->fuzzify(); //Fuzzyficação  
  
  float output1=fuzzy->defuzzify(1); //Defuzzyficação para o valor de Azimute  
  float output2 = fuzzy->defuzzify(2); //Defuzzyficação para o valor de Elevação  
}
```