

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
CÂMPUS CORNÉLIO PROCÓPIO  
DIRETORIA DE GRADUAÇÃO E EDUCAÇÃO PROFISSIONAL  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DA ELÉTRICA  
ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

THAINARA DE ARAÚJO

**SISTEMA FOTOVOLTAICO COM CONTROLE DE POSIÇÃO  
VISANDO MAXIMIZAÇÃO DA GERAÇÃO DE ENERGIA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO

2017

**THAINARA DE ARAÚJO**

**SISTEMA FOTOVOLTAICO COM CONTROLE DE POSIÇÃO  
VISANDO MAXIMIZAÇÃO DA GERAÇÃO DE ENERGIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento Acadêmico da Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação

Orientador: Prof. Dr. Alessandro do Nascimento Vargas

**CORNÉLIO PROCÓPIO**

**2017**



**Universidade Tecnológica Federal do Paraná**  
**Campus Cornélio Procópio**  
**Departamento Acadêmico de Elétrica**  
**Curso de Engenharia de Controle e Automação**



## **FOLHA DE APROVAÇÃO**

**Thainara de Araújo**

### **Sistema fotovoltaico com controle de posição visando maximização de energia**

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 16:30hs do dia 14/06/2017 como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro de Controle e Automação no programa de Graduação em Engenharia de Controle e Automação da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

---

Prof(a). Dr(a). Alessandro do Nascimento Vargas - Presidente (Orientador)

---

Prof(a). Dr(a). Cristiano Marcos Agulhari - (Membro)

---

Prof(a). Dr(a). Rodrigo Rodrigues Sumar - (Membro)

A minha família, em especial aos meus pais, e aos meus amigos, pelo incentivo, apoio, amor e compreensão, em todos os momentos desta caminhada, dedico.



## AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus, o principal responsável por eu ter chegado a esse ponto de minha jornada.

Em seguida agradeço a minha família. Em especial ao meu pai que me inspirou desde pequena demonstrando a paixão que tem pelo seu trabalho; a minha mãe que sempre me presenteia com os melhores conselhos; e meu irmão, com seu jeito meio torto de mostrar que me apoia e torce por mim. Dentre todos os presentes que vocês me deram, o maior deles foi a confiança, de deixar sua caçula sair de casa aos 16 anos para correr atrás do seu sonho.

Aos amigos que fiz nesses cinco anos de curso, que se tornaram minha segunda família, pois sem eles não teria chegado até aqui, já que sempre foram eles que colocaram um sorriso em meu rosto quando eu desanimava, e me erguiam para não desistir. Em especial, cito aqueles que começaram o curso comigo e que sentirei saudades imensas, Pedro Henrique Tomaseli, André Fernandes, Luana Souza, Higor Trabuco, Giovana Lima, Gabriela Souza, Wagner Chaves e Marcelo Minoru, e também aqueles veteranos que se tornaram muito especiais, Thiago Grossi, Bruno Dominato, Tayane Vidal, Marco Beteto, Hellen Ancelmo e Amanda Spagolla, e finalmente as minhas parceiras de república e nossos agregados, Lud Schaikoski, Carol Lourenço, Tamires Priscila, Mari Miglionari, Larissa Ramos, Gustavo Bellinato, Rodrigo Carrareto, Daniel Cavalcante e Otávio Algave.

Também aos meus amigos que mesmo longe se fizeram presente e ofereceram o ombro amigo e muitas piadas para alegrar meus dias: Carol Wolfring, Pedro Henrique Franco, Alan Chieregatto, Rodrigo Corrêa, Nágila Cabete e Vanessa Saher.

Agradeço também os conselhos e o auxílio em algumas etapas do projeto do Alex Pulici, José Gomes e Murilo Cinel.

Faço questão de agradecer cada um de meus professores, da pré-escola a graduação, os quais têm meu respeito e admiração pela honrada profissão que escolheram, mas em especial aos que se mostraram professores não só por profissão, mas por vocação como Rafael Prado, Cássio Amador, Walter Ramazzina, Glaucia Bressam, Cristiano Agulhari, Emerson Ravazzi, Paulo Scalassara e Danilo Spatti.

Por fim, agradeço ao meu orientador, que me acompanha desde 2013 como orientador de iniciação científica, mas que em alguns momentos me tratou como filha.

“Deus me conceda falar com propriedade e pensar de forma correspondente aos dons que me foram dados, porque ele é o guia da sabedoria e o orientador dos sábios.”

(Sabedoria 6, 12-20)

## RESUMO

ARAÚJO, Thainara. Sistema fotovoltaico com controle de posição visando maximização da geração de energia. 66 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia de Controle e Automação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2017.

O presente trabalho descreve um sistema de posicionamento para um painel solar que mantém a superfície da placa perpendicular aos raios solares a fim de maximizar a absorção da radiação solar, e conseqüentemente maximizar a geração de energia elétrica. A energia gerada é utilizada para alimentar uma carga, representada por uma bateria. O sistema de posicionamento é composto por uma placa solar acoplada a uma estrutura de dois eixos de movimentação, com o objetivo de compensar os movimentos do Sol. Para controlar o movimento do painel é utilizada lógica Fuzzy, enquanto para controlar a carga da bateria por meio de um conversor CC-CC abaixador é utilizado controle PID.

**Palavras-chave:** Energias Renováveis, Energia Fotovoltaica, Seguidor Solar, Conversor Buck, Controle PID, Controle Fuzzy.

## ABSTRACT

ARAÚJO, Thainara. Photovoltaic system with positioning control looking for maximizing power generation. 66 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia de Controle e Automação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2017.

The present work describes a positioning system for a solar panel that maintains the plate surface perpendicular to the solar rays in order to maximize the absorption of the solar radiation, and consequently to maximize the generation of electric energy. The energy generated is used to power a load, represented by a battery. The positioning system comprises a solar panel coupled to a structure of two movement axes, in order to compensate for movements of the sun. To control the panel movements, a Fuzzy logic is applied and to control the battery load using a DC-DC converter, a PID control is used.

**Keywords:** Renewable Energy, Photovoltaic Energy, Solar Follower, Buck converter, PID Control, Fuzzy Control.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	– Módulo fotovoltaico com sombra em célula e diodo <i>by-pass</i> .....	20
FIGURA 2	– Curva característica de um painel fotovoltaico .....	21
FIGURA 3	– Influência da Radiação e Temperatura na curva característica de um painel fotovoltaico .....	22
FIGURA 4	– Ângulos de Radiação Solar .....	23
FIGURA 5	– Variação da altura Solar .....	23
FIGURA 6	– Seguidor Polar .....	24
FIGURA 7	– Seguidor de eixo duplo .....	25
FIGURA 8	– Circuito divisor de tensão para LDR .....	26
FIGURA 9	– Diagrama de blocos da Lógica <i>Fuzzy</i> .....	27
FIGURA 10	– Esquema elétrico de um Conversor CC-CC tipo Buck com filtros de entrada e saída .....	29
FIGURA 11	– Principais formas de onda do conversor Buck com carga resistiva .....	30
FIGURA 12	– Ganho estático do conversor Buck em função da razão cíclica .....	30
FIGURA 13	– Esquemático ilustrando sistema fotovoltaico isolado com rastreador solar .....	36
FIGURA 14	– Curvas características do painel fotovoltaico .....	39
FIGURA 15	– Estrutura móvel para placa fotovoltaica .....	40
FIGURA 16	– Circuito auxiliar para diodos <i>by-pass</i> .....	41
FIGURA 17	– Pontos de conexão do painel .....	41
FIGURA 18	– Disposição dos sensores LDRs .....	42
FIGURA 19	– Tensão e corrente de saída do conversor Buck .....	44
FIGURA 20	– Fluxograma de controle do motor 1 .....	45
FIGURA 21	– Fluxograma de controle do motor 2 .....	46
FIGURA 22	– Divisão do bloco controle do seguidor solar .....	46
FIGURA 23	– Função de pertinência da variável erro .....	49
FIGURA 24	– Função de pertinência da variável velocidade .....	49
FIGURA 25	– Função de pertinência da variável $\Delta_{erro}$ .....	50
FIGURA 26	– Superfície de controle <i>Fuzzy</i> .....	51
FIGURA 27	– Esquemático do controlador do conversor Buck .....	52
FIGURA 28	– Diagrama de Bode do conversor Buck .....	53
FIGURA 29	– Simulação do conversor Buck com controlador .....	54
FIGURA 30	– Teste do circuito do Conversor Buck .....	56
FIGURA 31	– Circuito usado para validação do sistema .....	56
FIGURA 32	– Resultados do teste 1 do sistema .....	57
FIGURA 33	– Tensão na Bateria durante teste 1 .....	58
FIGURA 34	– Resultados do teste 2 do sistema .....	58
FIGURA 35	– Tensão na Bateria durante teste 2 .....	59
FIGURA 36	– Circuito de acionamento dos motores .....	64
FIGURA 37	– Circuito dos sensores de fim de curso .....	65
FIGURA 38	– Circuito dos sensores LDRs .....	65
FIGURA 39	– Circuito do Conversor Buck .....	66

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1	–	Especificações técnicas da placa fotovoltaica .....	38
TABELA 2	–	Base de regras do controlador <i>Fuzzy</i> .....	50

## LISTA DE SIGLAS

CC-CC	Corrente Contínua - Corrente Contínua
STC	Standard Test Conditions
NOCT	Nominal Operating Cell Temperature
LDR	Light Dependent Resistors
CoA	Centro de Área
PWM	Pulse Width Modulation
PID	Proporcional-Integral-Derivativo

## LISTA DE SÍMBOLOS

$V_{OC}$	Tensão de circuito aberto
$I_{SC}$	Corrente de curto circuito
$P_M$	Potência máxima
$V_M$	Tensão em potência máxima
$I_M$	Corrente em potência máxima
$\psi_s$	Ângulo azimutal
$\gamma_s$	Ângulo da altura solar
$T$	Período de um ciclo de chaveamento
$D$	<i>Duty Cycle</i>
$V_{OUT}$	Tensão de saída
$V_{IN}$	Tensão de entrada
$R_L$	Resistência interna do indutor
$R_C$	Resistência interna do capacitor de saída
$C_{OUT}$	Capacitor de saída
$i_L$	Corrente no indutor
$v_C$	Tensão no capacitor de saída
$K_P$	Ganho do termo proporcional
$K_I$	Ganho do termo integral
$K_D$	Ganho do termo derivativo
$\sigma$	Grau de liberdade
$\omega_g$	Frequência em que a margem de ganho é máxima
$M_g$	Margem de ganho na frequência $\omega_g$
$PM$	Margem de fase definida pelo projetista
$\angle G(j\omega_g)$	Margem de fase na frequência $\omega_g$
$e(kT)$	Erro no instante atual
$e((k-1)T)$	Erro no instante de amostragem anterior ao atual
$u_i((k-1)T)$	Termo integral no instante de amostragem anterior ao atual
$u(t)$	Saída do controlador
$E$	Radiação coletada pelo painel
$\theta$	Ângulo formado pelos raios solares com o plano normal ao painel fotovoltaico
$E_D$	Densidade da irradiação local
$L$	Indutor
$f$	Frequência de chaveamento do Buck
$C_{IN}$	Capacitor de entrada
$I_{OUT}$	Corrente de saída do Buck
$\Delta i_{OUT}$	Ondulação da corrente de saída do Buck
$\Delta V_{C_{IN}}$	Ondulação da tensão de entrada do Buck
$\Delta V_{C_{OUT}}$	Ondulação da tensão de saída do Buck
$M1$	Motor responsável pelo movimento horizontal
$M2$	Motor responsável pelo movimento vertical
$D1$	Diodo <i>by-pass</i> do lado direito



$D2$	Diodo <i>by-pass</i> do lado esquerdo
$\Delta_{erro}$	Derivada do erro
$R_{carga}$	Carga acoplada a saída do Buck

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>15</b>
1.1 PROBLEMA	16
1.2 JUSTIFICATIVA	17
1.3 OBJETIVOS	18
1.3.1 Objetivos Gerais	18
1.3.2 Objetivos Específicos	18
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>19</b>
2.1 MÓDULO FOTOVOLTAICO	19
2.1.1 Características Gerais de um Módulo Fotovoltaico	20
2.2 RASTREADOR SOLAR	22
2.2.1 Posição Solar	23
2.2.2 Métodos de Rastreamento Solar	24
2.2.2.1 Rastreador Solar de Eixo Único	24
2.3 SENSOR LDR	25
2.4 LÓGICA <i>FUZZY</i>	26
2.4.1 Fuzzificação	27
2.4.2 Base de Conhecimento	28
2.4.3 Inferência	28
2.4.4 Defuzzificação	28
2.5 CONVERSOR CC-CC	28
2.6 SINTONIA DO CONTROLADOR PID	33
2.6.1 PID digital	34
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>36</b>
3.1 ESTRUTURA MÓVEL	37
3.2 AQUISIÇÃO DE DADOS DE LUMINOSIDADE	40
3.3 AQUISIÇÃO DE DADOS DE TENSÃO	42
3.4 MOTORES	42
3.5 BATERIA	43
3.6 CONVERSOR CC-CC	43
3.7 CONTROLE DO SEGUIDOR SOLAR	45
3.7.1 Acionamento dos Motores	47
3.7.2 Leitura da Radiação Solar	48
3.7.3 Técnica de Controle do Seguidor Solar	48
3.7.3.1 Controle do Sentido dos Motores	48
3.7.3.2 Controle da Velocidade dos Motores	48
3.8 CONTROLE DO CONVERSOR CC-CC	51
3.8.1 Cálculo dos Parâmetros de Controle do Conversor Buck	52
<b>4 RESULTADOS</b>	<b>55</b>
<b>5 CONCLUSÃO</b>	<b>60</b>
5.1 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	60
<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>61</b>
<b>Apêndice A – CIRCUITOS DO KIT SEGUIDOR SOLAR</b>	<b>64</b>

A.1 ACIONAMENTO DOS MOTORES .....	64
A.2 SENSORES DE FIM DE CURSO .....	64
A.3 SENSORES LDRS .....	65
<b>Apêndice B – CIRCUITOS DO CONVERSOR BUCK .....</b>	<b>66</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por energia, aliada à característica renovável e limpa da geração por meio de painéis fotovoltaicos, impulsionaram estudos na área de energia com a finalidade de aumentar seu rendimento, tornando-os fonte de energia viável para aplicações domésticas e industriais.

No Brasil, os sistemas fotovoltaicos são usados principalmente para abastecer comunidades rurais e/ou isoladas da rede de energia elétrica, sendo utilizados também em estações de telefonia e monitoramento remoto, bem como na produção de gelo e dessalinização de água (KELMAN et al., 2005). Em menor escala, são usados como complementação energética em regiões atendidas pela rede elétrica, podendo ser conectados à rede pública, gerando energia em paralelismo.

Ocorre que o país possui alto potencial para geração de energia solar fotovoltaica, devido à sua extensão territorial e elevada taxa de irradiação solar, o que possibilita ampliar substancialmente sua participação na matriz energética nacional. Para exemplificar, passamos à análise da região Sul do país, a qual é a menos favorecida em termos de taxa de irradiação, e mesmo assim poderia superar a produção de países onde a geração de energia solar fotovoltaica é amplamente aplicada (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

Um dos obstáculos à implantação de um sistema de geração de energia fotovoltaica é o seu alto custo. No entanto, a descoberta de materiais mais eficientes e baratos, assim como o desenvolvimento de novas técnicas de fabricação, estão reduzindo gradativamente os custos dos painéis fotovoltaicos. No mesmo sentido, a maximização do rendimento dos painéis por meio de técnicas de controle, como o seguidor solar, é outro avanço que tem contribuído para a melhora do custo-benefício destes sistemas (LIRA, 2014).

O seguidor solar possibilita a maximização da geração de energia por meio do reposicionamento da placa fotovoltaica. Esse reposicionamento pode ser comparado ao movimento de um girassol, e tem como propósito manter o painel fotovoltaico perpendicular aos raios solares, uma vez que apenas a radiação que incide perpendicularmente ao seu plano é utilizada para

produção de energia (MARINESCU; MARINESCU, 2006).

Se comparados aos sistemas fixos, os sistemas móveis para rastreamento solar apresentam maior custo de implantação, e necessitam de um sistema de controle de posição e de manutenção das partes móveis. No entanto, essa mobilidade pode vir a incrementar as receitas geradas em torno de 40%, ao custo de aumentar o preço total de instalação do sistema em 20% (FILHO, 2013).

Sendo assim, este trabalho apresenta um sistema de controle para seguidor solar, o qual apresente confiabilidade e precisão no rastreamento, provocando um aumento na geração de energia. Esse sistema conta com um conversor CC-CC, que permite o aproveitamento da energia gerada para a alimentação de dispositivos elétricos em corrente contínua, neste caso uma bateria.

## 1.1 PROBLEMA

A geração de energia elétrica por uma placa solar está relacionada a fatores meteorológicos, o que pode causar variações nas taxas de tensão e corrente de saída. Uma carga, ao ser alimentada por esse sistema, pode não ser suscetível a essa variação, além de existirem cargas com necessidades de tensão e corrente diferentes das disponibilizadas pelo painel. Dessa forma, é necessário realizar a conversão de energia para que seja aplicável a um dispositivo elétrico.

Outro fator importante para a produção de energia por um sistema fotovoltaico é a relação de incidência dos raios solares sobre a placa. Painéis fotovoltaicos instalados em estruturas fixas apenas se encontram na posição de máxima eficiência em um determinado período do dia e, conseqüentemente, na maior parte do tempo sofrem perdas. Para um pequeno ângulo de erro, a perda será de apenas 1 a 5%. Entretanto, se o erro de posicionamento for maior que 10°, a geração de energia diminuirá em até 35% (HSING, 2010).

Para rastrear os raios solares, o sistema deverá contar com sensores que captam a posição solar, como sensores de luminosidade e radiação, ou utilizar um algoritmo capaz de estimar a posição solar, o qual dependerá de informações como hora, data, e coordenadas geográficas do local onde será instalada a placa fotovoltaica.

A primeira situação é possível de erros, devido a razões meteorológicas que prejudiquem a leitura dos sensores. A segunda opção tem a vantagem de não ser influenciada por questões meteorológicas (OLIVEIRA, 2008), entretanto, demanda maior capacidade de processamento do sistema e de dados geográficos precisos do local de instalação, não podendo ser

instalado por um leigo no assunto.

Além do sistema responsável por localizar a maior incidência de radiação, é imprescindível que a estrutura na qual o painel se encontra acoplado permita reposicioná-lo de maneira eficiente, sendo necessário considerar a complexidade do projeto em relação às vantagens apresentadas.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Sistemas fotovoltaicos apresentam a vantagem de trabalhar de maneira autônoma e silenciosa, além de serem confiáveis e causarem mínimo impacto ecológico (TUDORACHE; KREINDLER, 2010), podendo ser empregados em regiões isoladas e/ou de difícil acesso. A aplicação desses sistemas em regiões fora do alcance da rede elétrica é favorecida devido à sua característica modular, baixos custos de manutenção e longa vida útil (FILHO, 2013).

Aproveitando-se da característica modular dos sistemas fotovoltaicos, este trabalho desenvolveu uma bancada móvel autônoma, com sistema de controle de posição de dois eixos para painel solar.

O uso de sistemas móveis de rastreamento solar é mais eficiente do que o uso de sistemas fixos, graças à sua capacidade de absorver uma maior quantidade de radiação solar. Fazendo uma análise quantitativa, um rastreador de eixo único aumenta a geração de energia em aproximadamente 30%, enquanto o rastreador de dois eixos tem um aumento médio de 36%, ambos comparados ao sistema fixo (RANA, 2013).

Geralmente, sistemas ativos de seguimento utilizam arranjos de sensores de luminosidade ou radiação para determinar a posição solar (OLIVEIRA, 2008). A vantagem de usar essa técnica, em detrimento da técnica de estimação da posição solar, é a dispensabilidade de nova calibração do sistema de posicionamento sempre que a bancada se deslocar.

A energia proveniente dos painéis solares apresenta oscilações devido à característica intermitente e aleatória da radiação solar (VILLALVA; GAZOLI, 2012). Em razão de irregularidades apresentadas pelo sistema fotovoltaico, é necessário aplicar um controle de potência por meio de um conversor, a fim de obter uma energia regular que possa ser aplicada a equipamentos elétricos. A bancada móvel também conta com esse sistema de conversão, de modo que a energia de saída do sistema terá uma tensão regular, possibilitando armazená-la em uma bateria.

### 1.3 OBJETIVOS

#### 1.3.1 OBJETIVOS GERAIS

Este trabalho propõe a elaboração de uma bancada móvel para um sistema fotovoltaico isolado, com sistema de controle de posicionamento para painel solar e sistema conversor de tensão para fornecimento de energia a uma bateria.

#### 1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Com propósito de alcançar os objetivos gerais, são definidos os seguintes objetivos específicos:

- Elaborar uma estrutura para painel fotovoltaico com dois graus de liberdade;
- Desenvolver uma técnica para rastreamento solar;
- Projetar um circuito para conversão de tensão;
- Realizar o controle do conversor de tensão;
- Analisar a viabilidade do método.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 MÓDULO FOTOVOLTAICO

O painel fotovoltaico é composto por diversas células fotovoltaicas, as quais isoladas produzem relativamente pouca energia (aproximadamente  $0,4V$ , com densidade de corrente da ordem de  $30mA.cm^{-2}$ ). Por isso, as células ficam dispostas em arranjos (série e/ou paralelo) para que maximizem e potencializem sua utilização, dando origem aos painéis fotovoltaicos (CARVALHO et al., 2011).

As células são fabricadas a partir de materiais semicondutores sobrepostos, que quando expostos à radiação solar produzem uma diferença de potencial, ou seja, uma tensão elétrica.

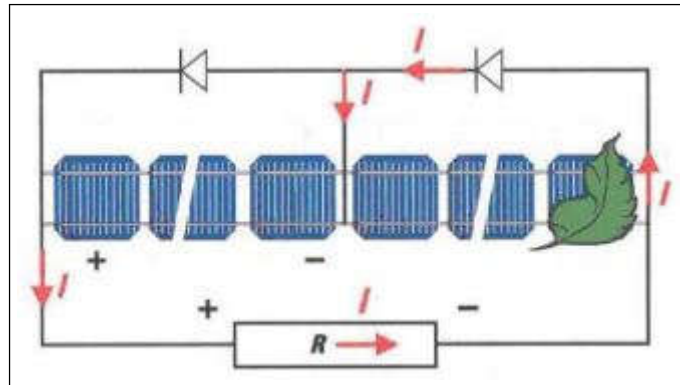
Uma célula não é capaz de armazenar energia elétrica, apenas mantém um fluxo de elétrons estabelecidos num circuito elétrico enquanto houver incidência de luz sobre ela. Este fenômeno é chamado efeito fotovoltaico (NASCIMENTO, 2004).

O número de células presentes em uma placa é determinado pelas necessidades de tensão e corrente de saída. Os arranjos mais comuns são constituídos de 33 a 36 células ligadas em série, de modo que sua saída permita carregar uma bateria de  $12V$  (CASTRO, 2007).

Em painéis formados por células conectadas em série, o comprometimento do funcionamento de uma célula afeta a potência de saída do painel, uma vez que se comportam como uma barreira para passagem de corrente elétrica. Esse problema pode ocorrer em razão de defeitos ou sombra em alguma área do painel. Um modo de sanar esse problema é utilizar diodos de passagem, também denominados diodos *by-pass*, que fornecem passagem alternativa à corrente caso alguma célula esteja em situação de bloqueio. Usualmente, o diodo *by-pass* é conectado a grupos de células, como mostrado na Figura 1, sendo essa uma solução de baixo dispêndio, quando comparada ao custo de se conectar um diodo em cada célula (ALVES, 2008).



**Figura 1 – Módulo fotovoltaico com sombra em célula e diodo *by-pass*.**



Fonte: Adaptado de (FILHO, 2013).

A eficiência de conversão da radiação solar em energia elétrica, propiciada pelo efeito fotovoltaico, depende do material semicondutor que compõe a célula. Em geral, as células são constituídas de uma camada de material semicondutor do tipo *N* e outra do tipo *P*. Existem também células de múltiplas junções, as quais produzem mais energia, porém são mais caras e pouco utilizadas.

Cerca de 95% de todas as células fotovoltaicas fabricadas no mundo são de silício, porque trata-se de material não tóxico, disponível em abundância e barato (VILLALVA; GAZOLI, 2012). O silício policristalino dispõe de uma quota de mercado de cerca de 30%, o que se deve ao seu custo reduzido em relação às células monocristalinas (CASTRO, 2007). Contudo, o rendimento das células policristalinas é ligeiramente inferior às células monocristalinas, sendo da ordem de 13% a 15% (GONZAGA, 2013). Dessa forma, as placas de silício policristalinos apresentam maior relação custo-benefício, em comparação aos demais materiais disponíveis no mercado.

### 2.1.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS DE UM MÓDULO FOTOVOLTAICO

As principais características elétricas dos painéis fotovoltaicos, responsáveis por definir o seu funcionamento, são: tensão de circuito aberto,  $V_{OC}$ ; corrente de curto circuito,  $I_{SC}$ ; potência máxima,  $P_M$ ; tensão em potência máxima,  $V_M$ ; e corrente em potência máxima,  $I_M$ .

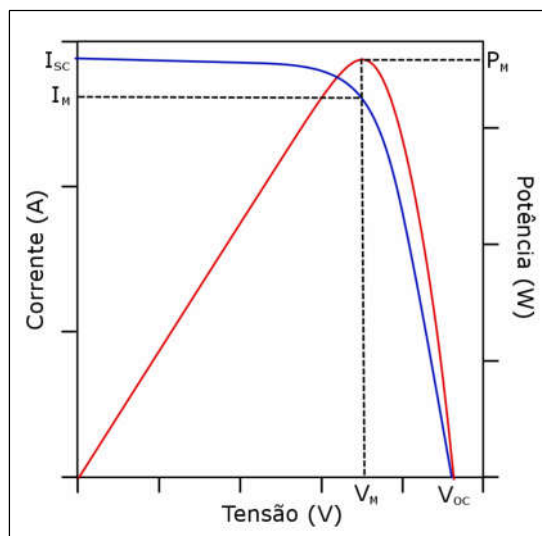
Geralmente essas características são especificadas pelos fabricantes segundo as condições padrões de teste (no inglês, *Standard Test Conditions* - STC), as quais consideram a irradiância solar de  $1000W/m^2$  e a temperatura da célula em  $25^\circ C$ . Por outro lado, também podem ser especificadas segundo as condições reais de operação, que considera a temperatura normal de operação da célula (no inglês, *Nominal Operating Cell Temperature* - NOCT) de

48,4°C e a taxa de radiação solar de  $800\text{W}/\text{m}^2$ .

A tensão e a corrente de saída dos painéis fotovoltaicos apresentam uma relação de dependência, a qual é descrita por sua curva característica. A curva característica mostra os pontos de operação que o painel pode trabalhar sobre determinadas condições climáticas, geralmente STC ou NOCT. Um painel fotovoltaico não é uma fonte linear de potência, assim existem várias curvas características para um mesmo painel fotovoltaico, uma vez que as variações na taxa de radiação solar e na temperatura de operação das células causam deformações na curva característica (GNOATTO et al., 2004). O ponto de operação do sistema sobre a curva característica depende da corrente demandada pela carga conectada ao painel.

O formato genérico da curva característica de um painel fotovoltaico é exibido na Figura 2, sendo a relação de tensão por corrente em azul, e sua correspondente de tensão por potência em vermelho.

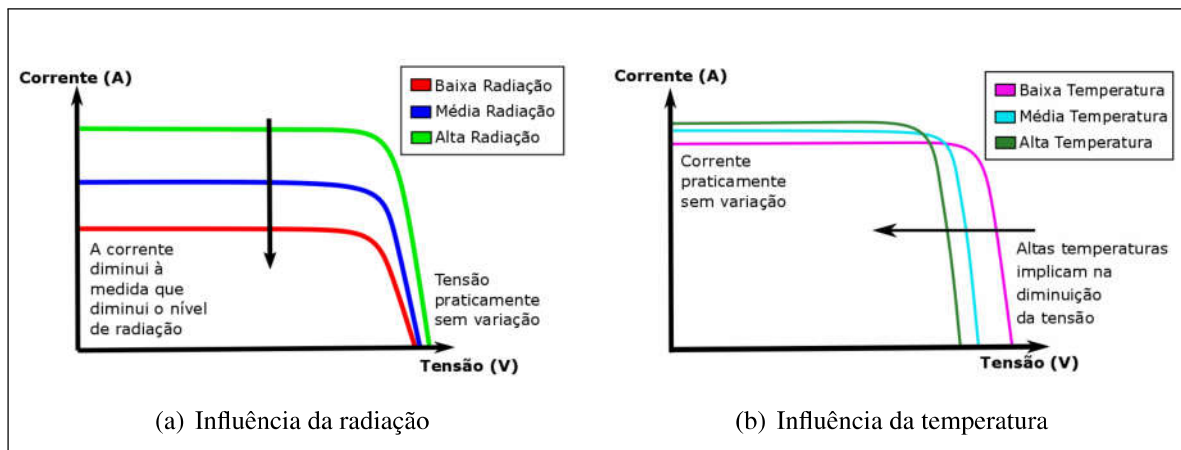
**Figura 2 – Curva característica de um painel fotovoltaico.**



Fonte: Adaptado de (OLIVEIRA, 2008).

A corrente elétrica fornecida por uma placa solar depende da intensidade da radiação que incide sobre as células, enquanto a tensão depende da temperatura de operação das células, e conseqüentemente ambos os fatores influenciam na potência. A Figura 3 mostra como a temperatura e o nível de radiação influenciam a curva característica das placas fotovoltaicas.

Figura 3 – Influência da Radiação e Temperatura na curva característica de um painel fotovoltaico.



Fonte: Adaptado de (ANICETO, 2010).

## 2.2 RASTREADOR SOLAR

Um sistema de posicionamento solar deve apresentar elevado grau de precisão, além de ser capaz de retornar à sua posição inicial no final do dia, a fim de realizar o menor esforço para iniciar o rastreo no dia seguinte (KARIMOV et al., 2005).

Existem diversos tipos de seguidores solares que permitem a realização dessa tarefa, variando em relação ao custo, complexidade e funções, além de apresentarem funcionamento com diferentes números de eixos e fornecerem diversos graus de precisão (FILHO, 2013).

Os rastreadores solares podem ser classificados quanto ao modo de atuação, podendo ser considerados passivos, os quais são impulsionados pelo deslocamento de um fluido gasoso aquecido pela energia solar, ou em ativos, que são impulsionados por motores elétricos e por um conjunto de polias ou engrenagens (OLIVEIRA, 2008).

O seguidor solar possui um ou dois eixos. Quando possui apenas um eixo, somente é possível corrigir os erros relacionados a um dos ângulos de radiação do Sol, enquanto um seguidor com dois eixos disponíveis possibilita o ajuste do azimute da superfície e da inclinação do painel.

Por conseguinte, serão explicadas as variáveis relacionadas à posição do Sol e, em sequência, serão apresentados alguns tipos de rastreadores solares.

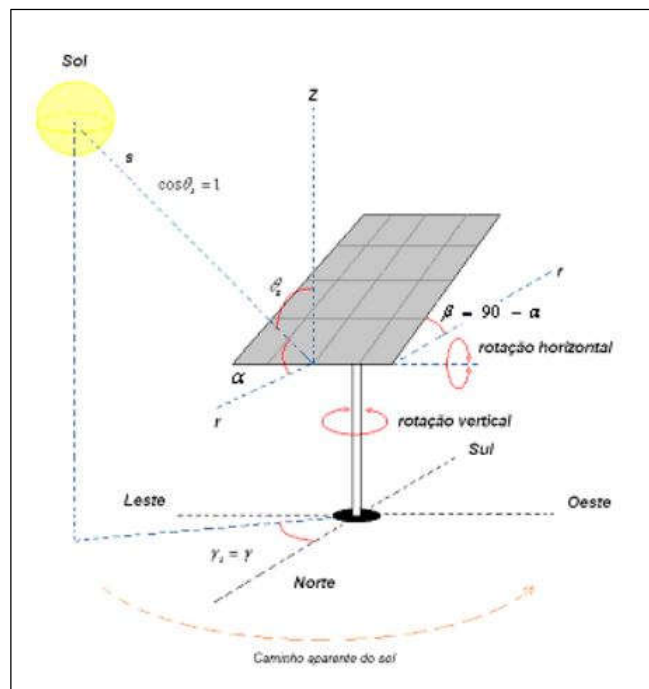




movimentação do Sol, o que torna o sistema mais complexo. A vantagem desse sistema é que ele garante a melhor posição para o painel, a qualquer hora e em qualquer lugar que for instalado, porém ocasiona o aumento do consumo de energia pela adição de mais um motor.

A disposição se dá com um eixo na posição vertical, para ajustar o azimute da superfície, enquanto o outro permanece na posição horizontal, para ajustar a inclinação do painel, conforme pode ser observado na Figura 7.

**Figura 7 – Seguidor de eixo duplo.**



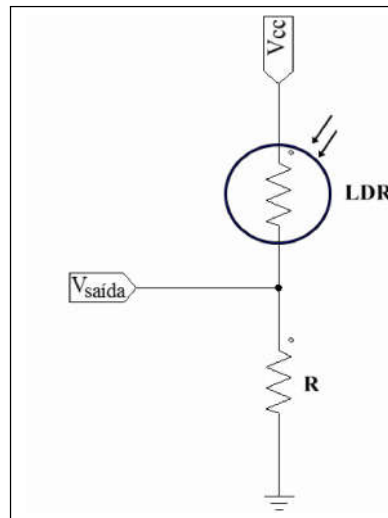
Fonte: (OLIVEIRA, 2008).

### 2.3 SENSOR LDR

Os resistores dependentes de luz (no inglês, *Light Dependent Resistors* - LDR) são fotocélulas sensíveis que variam sua resistência conforme a presença de luminosidade. Quanto maior a incidência de luz sobre sua superfície, menor é sua resistência.

Esses sensores normalmente funcionam em conjunto com um circuito divisor de tensão, permitindo que a tensão de saída do circuito seja proporcional à quantidade de luz incidente no sensor. O esquema elétrico de funcionamento do LDR é apresentado na Figura 8. Geralmente, quando aplicado em seguidores solares, o LDR é fixado nas bordas do painel (PRINSLOO; DOBSON, 2015).

**Figura 8 – Circuito divisor de tensão para LDR.**



**Fonte: Autoria Própria.**

## 2.4 LÓGICA FUZZY

A palavra *Fuzzy* pode ser traduzida do inglês como nebuloso ou incerto. Por isso, é usada para denominar uma lógica capaz de expressar um raciocínio aproximado (GOMIDE; GUDWIN, 1994). Essa estratégia deu base a técnicas para realizar a modelagem e controle de sistemas, permitindo mapeá-los mesmo quando não é possível definí-lo matematicamente ou de maneira exata, ou simplesmente para reduzir sua complexidade, permitindo solucionar problemas não solucionáveis pelas técnicas clássicas (KLEIN; WEBER, 2003).

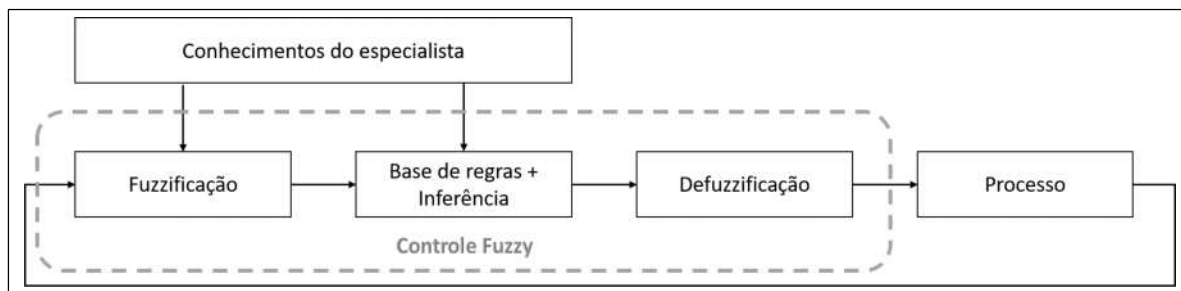
A lógica *Fuzzy* é capaz de traduzir termos linguísticos em modelagem matemática, ou seja, transcreve a forma de pensar humana. Isso é possível pois a lógica *Fuzzy* consegue implementar em um computador a estratégia de controle articulada pela mente humana descrevendo-as por um conjunto de regras da forma “se... então”, representando que dada condição deve resultar em uma consequência definida (BARG, 2002).

Outra particularidade da lógica *Fuzzy* é o uso de graus de pertinência, logo, trata com valores-verdade que variam de 0 a 1, ou seja, admitindo verdades parciais (SILVA, 2005). Como consequência, para determinada entrada, uma regra pode ser parcialmente pertinente, e é necessário fazer a combinação de duas ou mais regras para admitir uma saída de controle.

Basicamente a lógica *Fuzzy* pode ser definida em quatro etapas principais: a fuzzificação, que consiste em modelar o sistema a partir de premissas de um especialista, e para isso é necessário converter as variáveis de entrada em variáveis *Fuzzy*, isto é, atribuí-las grau de

abrangência; a base de conhecimento, que é a base de regras de controle; o processo de inferência, que consiste em emular a decisão de um especialista a partir da base de regras; e a defuzzificação, que traduz o resultado do processo de inferência em um valor numérico de saída (BILOBROVEC et al., 2004). A Figura 9 mostra essa divisão.

**Figura 9 – Diagrama de blocos da Lógica *Fuzzy*.**



Fonte: Autoria Própria.

Para elaborar um controle *Fuzzy*, como em qualquer outro projeto de modelagem, devem-se determinar as variáveis de entrada e saída do sistema (LJUNG, 1999). Essas variáveis devem ser convertidas em variáveis *Fuzzy* pelo processo de fuzzificação a partir de conhecimentos de um especialista do processo. Em seguida, deve-se detalhar a base de conhecimento, também a partir de informações dadas pelo especialista, formando o núcleo de um sistema *Fuzzy* (SILVA, 2013).

A seguir será detalhada cada etapa da elaboração de um controle *Fuzzy*.

#### 2.4.1 FUZZIFICAÇÃO

Essa etapa transforma uma variável numérica em uma variável *Fuzzy*, ou seja, agrega certo grau de imprecisão a ela, mapeando o valor real da variável em um universo normalizado de discurso (DRIANKOV et al., 1996). Esse processo é necessário para que as variáveis de entrada sejam compatíveis à representação *Fuzzy* adotada na base de conhecimento.

Para transformar um valor real de entrada em uma variável *Fuzzy* são utilizadas funções de pertinência *Fuzzy*, que podem ser numéricas, gráficas ou tabuladas, e que atribuem valores de pertinência a entrada.

Em suma, uma função de pertinência transforma dados quantitativos em qualitativos. Por exemplo, a radiação solar passa a ser dividida em alta, média e baixa, sendo que esses conjuntos não possuem uma fronteira bem definida.



## 2.4.2 BASE DE CONHECIMENTO

A base de dados é constituída de premissas que relacionam causa e consequência. Usa-se a forma “se... então” para fazer as premissas, por exemplo: SE os sensores da parte superior do painel recebem radiação BAIXA, e os sensores da parte inferior do painel recebem radiação ALTA, ENTÃO o painel deve se levantar com velocidade ALTA.

## 2.4.3 INFERÊNCIA

O processo de inferência é responsável por receber a variável de entrada já normalizada pelo processo de fuzzificação, consultar a base de conhecimentos e verificar em qual regra de controle essa variável se encaixa para obter uma saída de controle.

## 2.4.4 DEFUZZIFICAÇÃO

A defuzzificação é o processo contrário à fuzzificação, pois transforma a saída do processo de inferência, que está normalizada, em um valor numérico a ser aplicado em um processo.

O processo de defuzzificação corresponde ao mapeamento do espaço de ações de controle *Fuzzy* e é definido sobre o universo de discurso para o espaço de ações não *Fuzzy* ou escalares (SILVA, 2013).

A técnica de defuzzificação utilizada nesse trabalho é a por centro de área (CoA), que exige um esforço computacional considerável (MANUAL, 1997). O método CoA calcula a saída por meio da determinação do centroide da área composta que representa a função de pertinência de saída (SILVA, 2013).

## 2.5 CONVERSOR CC-CC

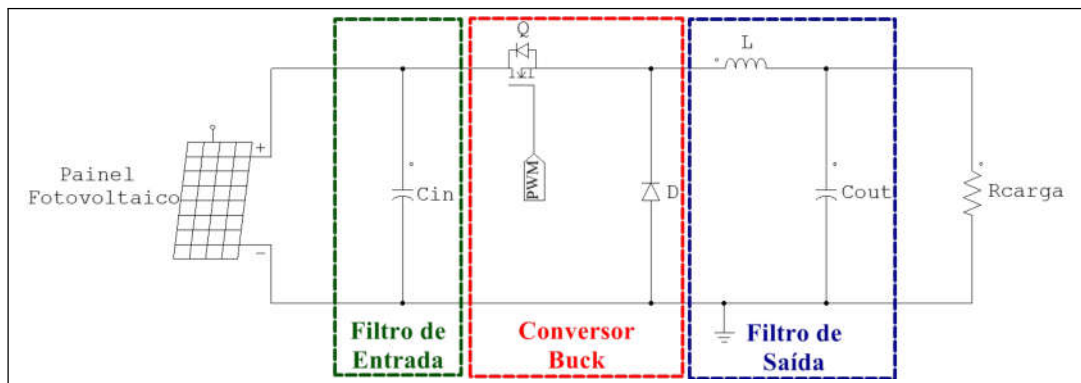
Os conversores CC-CC são sistemas normalmente utilizados para fornecer uma tensão contínua regulada a partir de uma fonte de tensão contínua não regulada, como é o caso do sistema fotovoltaico (ANICETO, 2010).

Os conversores são controlados por meio de modulação por largura de pulso (no inglês, *Pulse Width Modulation* - PWM), responsável por transmitir a razão cíclica de chaveamento. A razão cíclica é a principal característica que controla o valor da tensão na saída (WUIDART, 1999).

Os conversores CC-CC podem funcionar em três modos diferentes: contínuo, descontinuo e crítico. Essa classificação está relacionada com a corrente no indutor, apresentado na Figura 10 de forma que, se a corrente nunca for nula, trata-se de condução contínua, e se a corrente no indutor atingir o valor zero, trata-se de condução descontínua. O modo de funcionamento crítico ocorre quando a corrente no indutor atinge o valor zero exatamente no momento em que termina o período de comutação (PETRY; BARBI, 2001).

A topologia mais simples de conversores CC-CC é o Buck, o qual possui tensão de saída limitada, sendo igual ou inferior à de entrada. A Figura 10 mostra o esquema elétrico do conversor Buck com filtros de entrada e saída, tendo como fonte de entrada um painel fotovoltaico, e a saída é uma carga resistiva.

**Figura 10 – Esquema elétrico de um Conversor CC-CC tipo Buck com filtros de entrada e saída.**

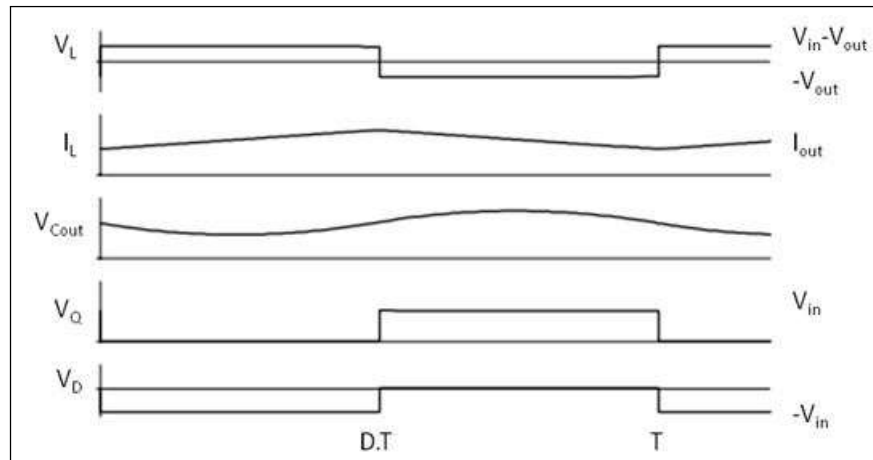


**Fonte: Autoria Própria.**

O funcionamento de um conversor Buck baseia-se no processo de carga e descarga do indutor. Esse processo é controlado pela razão cíclica do sinal PWM aplicado ao transistor. Esse sinal é responsável por controlar o tempo de condução do transistor, e dessa forma o sistema apresenta duas situações: o período de condução do transistor, na qual a corrente de entrada circula pelo indutor e carga; e o período de não condução do transistor, exigindo que o indutor descarregue através do diodo para fornecer corrente à carga.

Quando o conversor encontra-se em modo de condução contínua, o filtro de saída garante uma tensão de saída praticamente constante. As principais formas de onda em um conversor CC-CC tipo Buck trabalhando em condução contínua com carga resistiva podem ser vistas na Figura 11, onde  $T$  é o período de um ciclo de chaveamento, que pode ser dividido em  $DT$ , que é o período de condução do transistor, apresentado na Figura 10, e  $(1 - D)T$ , que é o período que o transistor não conduz, sendo  $D \in [0, 1]$ .

**Figura 11 – Principais formas de onda do conversor Buck com carga resistiva.**



Fonte: Adaptado de (PETRY; BARBI, 2001).

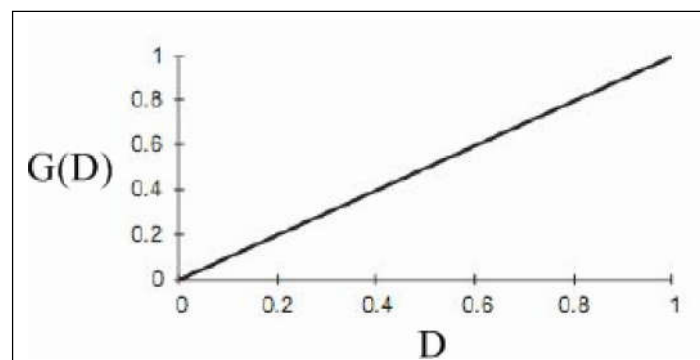
A equação que caracteriza um conversor Buck é dada por

$$V_{OUT} = D \cdot V_{IN} \quad (1)$$

sendo  $D$  é a razão cíclica de chaveamento do transistor,  $V_{OUT}$  é a tensão de saída e  $V_{IN}$  a tensão de entrada.

O ganho estático, que é a relação entre a tensão de saída e a tensão de entrada do conversor, apresenta característica linear no conversor Buck, como pode ser observado na Figura 12.

**Figura 12 – Ganho estático do conversor Buck ( $G$ ) em função da razão cíclica ( $D$ ).**



Fonte: Adaptado de (ANICETO, 2010).

Para aplicação em sistemas fotovoltaicos é interessante aplicar um filtro na entrada do conversor, uma vez que a placa fotovoltaica é uma fonte não regular. Dessa forma, para

pequenas variações na entrada, o filtro capacitivo consegue estabilizar a tensão fornecida ao conversor.

Para realizar o controle é importante conhecer o comportamento do sistema, que é dado pela sua função de transferência. A função de transferência do conversor Buck é dada a partir do equacionamento do circuito elétrico apresentado na Figura 10. Considerando operação em condução contínua, durante a primeira etapa, na qual o transistor conduz, as equações que descrevem o sistema são dadas por

$$v_{IN} = i_L.R_L + L.\frac{di_L}{dt} + v_C + R_C.C.\frac{dv_C}{dt} \quad (2)$$

$$i_L = C.\frac{dv_C}{dt} + \frac{v_C}{R_{carga}} + C.\frac{dv_C}{dt}.\frac{R_C}{R_{carga}} \quad (3)$$

sendo  $R_L$  é a resistência interna do indutor,  $R_C$  é a resistência interna do capacitor de saída  $C_{OUT}$ ,  $i_L$  é a corrente no indutor e  $v_C$  é a tensão no capacitor de saída.

A segunda etapa de operação ocorre quando o transistor não conduz, e é descrita por

$$0 = i_L.R_L + L.\frac{di_L}{dt} + v_C + R_C.C.\frac{dv_C}{dt} \quad (4)$$

$$i_L = C.\frac{dv_C}{dt} + \frac{v_C}{R_{carga}} + C.\frac{dv_C}{dt}.\frac{R_C}{R_{carga}} \quad (5)$$

Multiplicando cada conjunto de equações pelo período correspondente obtêm-se as equações (6) e (7).

$$\frac{di_L}{dt} = -\left[\frac{R_L}{L} + \frac{R_C.R_{carga}}{L.(R_C + R_{carga})}\right].i_L + \left[-\frac{1}{L} + \frac{R_C}{L.(R_C + R_{carga})}\right].v_C + \frac{v_{IN}}{L}.D \quad (6)$$

$$\frac{dv_C}{dt} = \left[\frac{R_{carga}}{C.(R_C + R_{carga})}\right].i_L - \left[\frac{1}{C.(R_C + R_{carga})}\right].v_C \quad (7)$$

A equação da tensão de saída média considerando as duas etapas é dada por

$$v_{OUT} = v_C + C.\frac{dv_C}{dt}.R_C = v_C + \frac{i_L.R_{carga} - v_C}{R_C + R_{carga}}.R_C \quad (8)$$

A partir das equações (6), (7) e (8) é obtida a equação em espaço de estados do conversor Buck, apresentada em (9).

$$\begin{aligned}\dot{x} &= A.x + B.u \\ y &= C.x\end{aligned}\quad (9)$$

onde as variáveis  $x$ ,  $u$ ,  $A$ ,  $B$  e  $C$  são dadas pelas equações (10), (11), (12), (13) e (14), respectivamente.

$$x = \begin{bmatrix} i_L \\ v_C \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$u = D \quad (11)$$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R_L}{L} + \frac{-R_C \cdot R_{carga}}{L \cdot (R_C + R_{carga})} & -\frac{1}{L} + \frac{R_C}{L \cdot (R_C + R_{carga})} \\ \frac{R_{carga}}{C \cdot (R_C + R_{carga})} & -\frac{R_C}{R_C + R_{carga}} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{V_{IN}}{L} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$C = \left[ R_{carga} \cdot \frac{R_C}{R_C + R_{carga}} \quad 1 - \frac{R_C}{R_C + R_{carga}} \right] \quad (14)$$

É possível obter a função de transferência de um sistema a partir das equações em espaço de estados por (15).

$$H(s) = C \cdot (sI - A)^{-1} \cdot B \quad (15)$$

Logo, a função de transferência do conversor Buck é dada por

$$H(s) = \left[ \frac{V_{IN} \cdot R_{carga}}{(R_C + R_{carga}) \cdot L \cdot C} \right] \cdot \left[ \frac{1 + R_C \cdot C \cdot s}{s^2 + \left( \frac{(R_L \cdot R_{carga} + R_C \cdot R_{carga} + R_L \cdot R_C) \cdot C + L}{(R_C + R_{carga}) \cdot L \cdot C} \right) s + \frac{R_L + R_{carga}}{(R_C + R_{carga}) \cdot L \cdot C}} \right] \quad (16)$$

## 2.6 SINTONIA DO CONTROLADOR PID

Os controladores proporcional-integral-derivativo (PID) são aplicáveis à maioria dos sistemas de controle (OGATA et al., 2003), e são o resultado da ação conjunta dos tipos de controle proporcional, integral e derivativo. Sua função de transferência é dada por

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \left( K_P + \frac{K_I}{s} + s.K_D \right) \quad (17)$$

onde  $U(s)$  é a ação de controle e  $E(s)$  é o erro do sistema.

A ação de controle proporcional age como um amplificador com ganho constante,  $K_P$ , de modo que, quanto maior o erro, maior a ação de controle aplicada, o que resulta em um rápido ajuste da variável de controle. Esse tipo de controle sozinho não anula o erro em regime permanente, sendo necessário aumentar o valor de  $K_P$  para minimizar o erro, contudo, quando  $K_P$  possui um valor alto o sistema torna-se oscilatório (FACCIN, 2004).

A ação de controle integral é proporcional à integral do erro, ou seja, ela depende do histórico de erros do sistema. A vantagem do controle integral está em eliminar o erro estacionário, porém isso reduz a estabilidade do sistema (MOORE et al., 2005). Essa ação de controle está relacionada à constante  $K_I$ . Diferente da ação de controle proporcional, o controle integral mantém um sinal de controle não nulo mesmo após o erro ter se anulado, uma vez que não depende apenas do valor instantâneo do erro, mas do seu valor acumulado (SHIRAHIGE, 2007).

A constante  $K_D$  está relacionada à ação de controle derivativa. Quando a ação de controle derivativa é acrescentada a um controlador proporcional, tem-se um controlador de alta sensibilidade. O controle derivativo responde à taxa de variação do erro, aplicando uma correção antes que o erro torne-se muito alto, aumentando, portanto a estabilidade do sistema (OGATA et al., 2003).

O controle derivativo deve sempre ser empregado em conjunto com a ação de controle proporcional ou proporcional-integral, sendo responsável por aumentar a taxa de amortecimento, e admitindo a aplicação de um ganho proporcional mais elevado, que por sua vez atuará no regime permanente com maior precisão (OGATA et al., 2003). A ação derivativa só age se houver variações no sistema, caso o erro seja constante não será aplicada nenhuma correção.

Quando o modelo matemático do processo a ser controlado é conhecido é possível aplicar várias técnicas para a determinação dos parâmetros do controlador que atenderão às

especificações de projeto (OGATA et al., 2003). Uma técnica para determinar os parâmetros do controlador é por meio da resposta em frequência do sistema. O método utilizado nesse trabalho é descrito por Mondal (2014), criado com a finalidade de melhorar o desempenho do sistema em estado estacionário. Para o uso dessa técnica deve-se assegurar que o sistema não contenha pólos positivos e que, em malha fechada, o gráfico polar para frequências positivas intercepte o círculo unitário e o semi-eixo real negativo apenas uma vez.

Uma vez que esses critérios são satisfeitos é possível calcular os parâmetros do controlador por meio das equações (18), (19) e (20).

$$K_P = M_g \cos(\varnothing_g) \quad (18)$$

$$K_I = \frac{2K_P \omega_g \sigma}{\tan(\varnothing_g) + \sqrt{\tan^2(\varnothing_g) + 4\sigma}} \quad (19)$$

$$K_D = K_P \frac{\tan(\varnothing_g) + \sqrt{\tan^2(\varnothing_g) + 4\sigma}}{2\omega_g \sigma} \sigma \quad (20)$$

Nas equações (18), (19) e (20),  $\sigma$  é o grau de liberdade que afeta a posição dos zeros do controlador, o qual é definido pelo projetista,  $\omega_g$  é a frequência em que a margem de ganho é máxima,  $M_g$  é a margem de ganho na frequência  $\omega_g$ , e  $\varnothing_g$  é dado pela equação

$$\varnothing_g = PM - \pi - \angle G(j\omega_g), \quad (21)$$

sendo  $PM$  a margem de fase estabelecida pelo projetista e  $\angle G(j\omega_g)$  a margem de fase na frequência  $\omega_g$ .

Para usar esse método de sintonia é necessário consultar o diagrama de Bode do sistema.

### 2.6.1 PID DIGITAL

Os micro controladores comerciais não tem a capacidade de realizar o processamento contínuo, por essa causa busca-se discretizar a equação do controlador PID por meio de aproximações para os termos derivativo e integral.

Existem diversas maneiras para realizar a aproximação digital de equações em tempo discreto, transformando-a em equações a diferenças facilmente implementadas em microcontroladores.

Para o termo derivativo usar-se-á o método de Euler, onde uma derivada no tempo é aproximada por uma diferença no tempo, expressa pela equação

$$\frac{de(t)}{dt} \cong \frac{e(kT) - e((k-1)T)}{T} \quad (22)$$

onde  $T$  é o período de amostragem,  $e(kT)$  é o valor do erro no instante atual e  $e((k-1)T)$  é o erro no instante de amostragem anterior ao atual.

Para o termo integral é utilizado o método de transformação de Tustin, o qual aproxima uma integral por meio da regra trapezoidal, como expresso na equação

$$\int_0^{kT} e(t)dt = u_i((k-1)T) + \frac{e((k-1)T) + e(kT)}{2}T \quad (23)$$

onde  $u_i((k-1)T)$  é o valor do termo integral no instante de amostragem anterior ao atual,  $e((k-1)T)$  é o erro no instante de amostragem anterior ao atual,  $e(kT)$  é o valor do erro no instante atual e  $T$  é o período de amostragem.

Desse modo, a equação completa do controlador PID com as aproximações necessárias para o uso em microcontroladores é dada por

$$u(t) = K_P.e(kT) + u_i((k-1)T) + K_I \frac{e((k-1)T) + e(kT)}{2}T + K_D \frac{e(kT) - e((k-1)T)}{T} \quad (24)$$

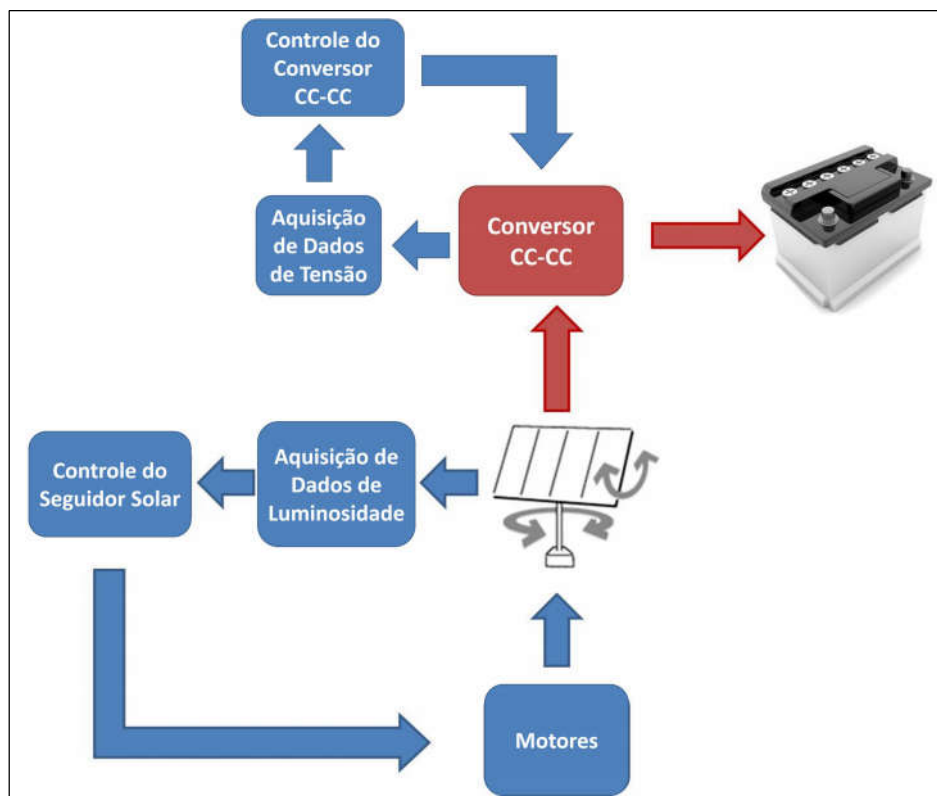
onde  $K_P$  é o ganho proporcional do controlador,  $K_I$  é o ganho integral do controlador,  $K_D$  é o ganho derivativo do controlador,  $T$  é o período de amostragem do sistema,  $e(kT)$  é o valor do erro do sistema no instante atual,  $e((k-1)T)$  é o erro do sistema no instante de amostragem anterior ao atual,  $u_i((k-1)T)$  é o valor da ação integral do controlador no instante de amostragem anterior ao atual, e  $u(t)$  é o sinal de entrada do sistema, ou seja, a saída do controlador.



### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta os passos seguidos para o desenvolvimento deste trabalho. A Figura 13 ilustra a composição básica do sistema proposto.

**Figura 13 – Esquemático ilustrando sistema fotovoltaico isolado com rastreador solar.**



Fonte: Autoria Própria.

Conforme pode ser observado na Figura 13, o sistema pode ser dividido em oito blocos principais: controle do conversor CC-CC, aquisição de dados de tensão, conversor CC-CC, controle do seguidor solar, aquisição de dados de luminosidade, motores, bateria e estrutura móvel. Em azul estão os estágios de controle, enquanto em vermelho estão os estágios que lidam com a energia gerada pelo painel solar. Cada bloco é detalhado como segue:

- A “Estrutura móvel” é o conjunto da estrutura mecânica com dois graus de liberdade e o

painel solar.

- O bloco “Aquisição de dados de Luminosidade” é encarregado de transmitir dados da radiação disponível, sendo composto por alguns tipos de sensores, detalhados posteriormente.
- A etapa “Aquisição de dados de Tensão” faz a leitura e transmissão de dados referentes à tensão de entrada e saída do conversor CC-CC.
- O estágio “Motores” refere-se aos motores responsáveis pelo reposicionamento do painel.
- A “Bateria” é utilizada como carga do sistema.
- O “Conversor CC-CC” é responsável por estabilizar a tensão proveniente do painel fotovoltaico e transferi-la para a bateria.
- O “Controle do Seguidor Solar” faz a integração do sistema, coordenando o funcionamento dos atuadores a partir dos dados adquiridos na etapa de aquisição.
- O bloco “Controle do conversor CC-CC” é responsável por manter a saída do conversor CC-CC fixa para recarregar a bateria.

Com a associação desses blocos o projeto oferece uma bancada móvel autônoma que conte com um sistema fotovoltaico com rastreador solar, agregando ao estudo técnicas para o controle de posição e para o controle da tensão de saída do sistema, possibilitando a aplicação da energia gerada a uma bateria.

### 3.1 ESTRUTURA MÓVEL

O painel solar escolhido para compor o rastreador solar contém as características apresentadas na Tabela 1. A escolha se deve principalmente às características de tamanho e peso, ideais para aplicação em estrutura móvel, uma vez que requer menor torque dos motores.

A partir das características elétricas do painel solar, torna-se possível traçar as curvas características do painel, de tensão por corrente, e de tensão por potência, exibidas na Figura 14, em vermelho. Essas curvas expressam os possíveis pontos de operação, considerando as condições de teste padrão (STC).

Entretanto, no dia-a-dia o painel fotovoltaico não costuma trabalhar nessas condições favoráveis, podendo haver perdas, logo, para diferentes condições de radiação e temperatura,

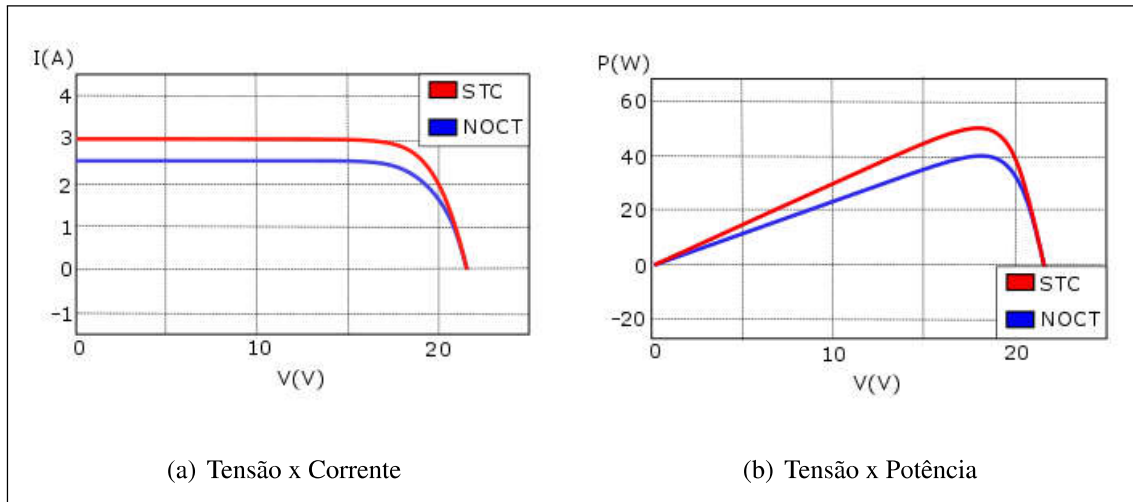
Tabela 1 – Especificações técnicas da placa fotovoltaica.

Características Elétricas		
<b>Modelo</b>		KM(P)50
<b>Potência Máxima</b>	$P_{MAX}(W)$	50±5%
<b>Tensão Máxima</b>	$V_M(V)$	17,74
<b>Corrente Máxima</b>	$I_M(A)$	2,84
<b>Tensão de circuito aberto</b>	$V_{OC}(V)$	21,56
<b>Corrente de curto circuito</b>	$I_{SC}(A)$	3,04
<b>Eficiência da célula</b>	%	14,25
<b>Eficiência do painel</b>	%	11,81
<b>Número de células por painel</b>	unidade	36
<b>Tipo de célula</b>		Silício Policristalino
<b>Dimensão da célula</b>	mm	156 x 56
<b>Coefficiente de Temperatura da corrente de curto circuito</b>	%/°C	-0,35
<b>Coefficiente de Temperatura da tensão de circuito aberto</b>	%/°C	-0,47
<b>Coefficiente de Temperatura da potência</b>	%/°C	+0,05
<b>Temperatura nominal de operação da célula (NOCT)</b>	°C	47±2
<b>Temperatura de operação</b>	°C	-40 85
Características Mecânicas		
<b>Dimensão</b>	mm	750 x 510 x 35
<b>Peso</b>	Kg	4,9
<b>Temperatura nominal de operação da célula (NOCT)</b>		Certificado TUV, IP65
<b>Condições de teste padrão (STC): Radiação de 1000 W/m<sup>2</sup>, espectro AM1,5, temperatura da célula de 25°C</b>		

Fonte: Adaptado de (TECHNOLOGY, 2016).

as curvas podem ser alteradas, conforme é ilustrado na Figura 14, em azul, onde são consideradas condições normais de operação do painel (NOCT), ou seja, intensidade de radiação de  $800W/m^2$ , temperatura ambiente de  $20^{\circ}C$  e temperatura da célula de  $48,4^{\circ}C$ . Os gráficos foram gerados pelo software PSIM<sup>®</sup>, o qual permite simular um painel solar segundo suas características físicas.

**Figura 14 – Curvas características do painel fotovoltaico.**



Fonte: Autoria Própria.

Com o uso de um seguidor solar, busca-se conseguir melhores índices de geração de energia, visto que o seguidor solar permite aumentar a taxa de radiação absorvida pelo painel e, conseqüentemente, deslocar a curva característica do painel para cima, aproximando-se as condições de teste padrão. Isso ocorre pois o painel solar capta máxima radiação quando o raio de sol é perpendicular à sua superfície. Essa afirmação é representada pela equação (25), onde  $E$  é a radiação coletada pelo painel,  $\theta$  é o ângulo formado pelos raios solares com o plano normal ao painel fotovoltaico, e  $E_D$  é a densidade da irradiação nas condições meteorológicas e geográficas específicas para o lugar onde será instalado o painel (MARINESCU; MARINESCU, 2006).

$$E = E_D \cdot \cos \theta \quad (25)$$

Conforme já mencionado, o aumento da taxa de radiação capturada pelo painel resulta em um aumento da corrente gerada, tal fato proporciona como vantagem o carregamento da bateria em um período menor, já que mais corrente será transferida para ela em um menor tempo.

O rastreador solar conta com uma estrutura móvel, com dois graus de liberdade, garantindo a melhor posição do painel para captação da radiação solar. A estrutura utilizada no projeto é exibida na Figura 15.

**Figura 15 – Estrutura móvel para placa fotovoltaica.**



**Fonte: Autoria Própria.**

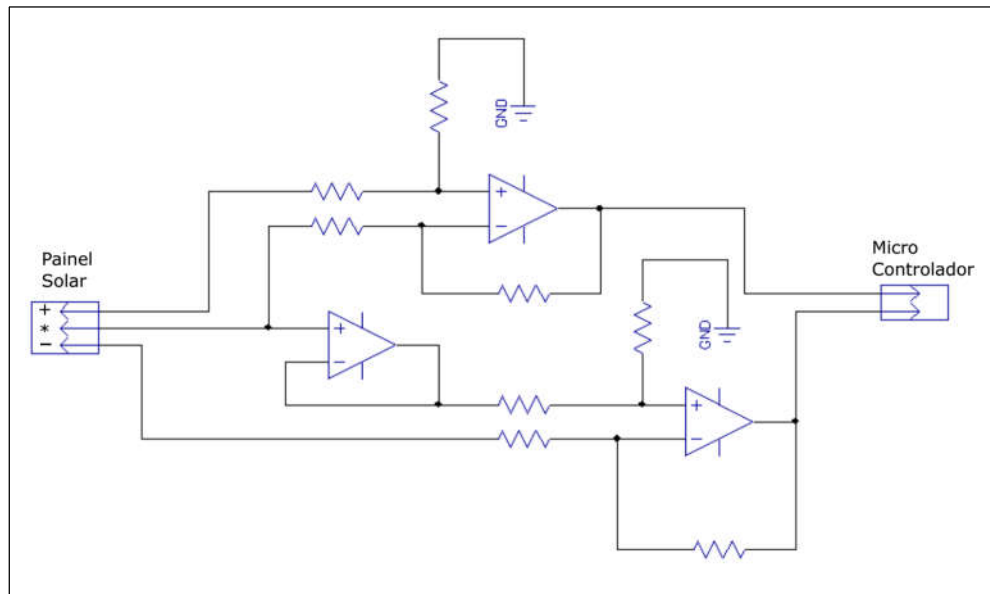
Apesar de possuir dois eixos, essa estrutura não segue o padrão dos seguidores de eixo duplo. O projeto da estrutura consiste em um aperfeiçoamento do seguidor polar, para que não seja necessário regular manualmente a altura solar, cujo reajuste será realizado automaticamente pelo motor adicional.

### 3.2 AQUISIÇÃO DE DADOS DE LUMINOSIDADE

O painel fotovoltaico utilizado no projeto é construído com células em série, como consequência a placa utiliza diodos *by-pass* para amenizar o efeito de sombreamento. São utilizados dois diodos *by-pass*, cada um em paralelo a um grupo de células, de modo que o painel é dividido em dois módulos, permitindo a medição da tensão de cada módulo separadamente, ao examinar a tensão do diodo *by-pass*. A tensão sobre os diodos é proporcional à incidência de raios solares sobre cada grupo de células e, portanto, será possível utilizá-los como sensores de radiação solar. Caso as tensões não sejam equivalentes entre os diodos, haverá um lado do painel recebendo mais radiação, e será necessário reposicioná-lo.

Para a leitura de tensão sobre os diodos *by-pass* utiliza-se o circuito da Figura 16, aplicando uma redução de tensão proporcional, e assim permitindo a leitura por meio de um microcontrolador.

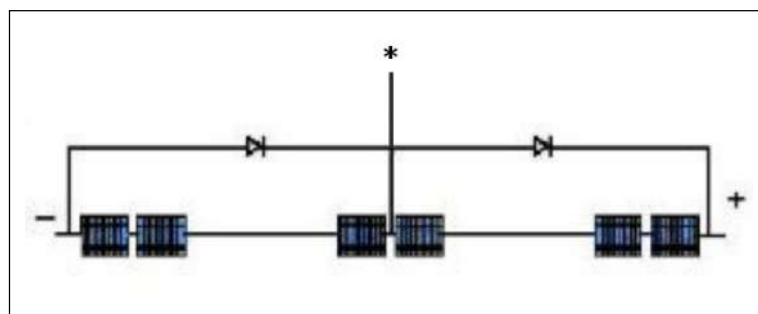
**Figura 16 – Circuito auxiliar para diodos *by-pass*.**



Fonte: Autoria Própria.

Os pinos de entrada devem ser ligados aos cabos do painel fotovoltaico, sendo o pino “\*” o cabo ligado ao ponto de conexão dos diodo *by-pass*, conforme mostrado na Figura 17.

**Figura 17 – Pontos de conexão do painel.**

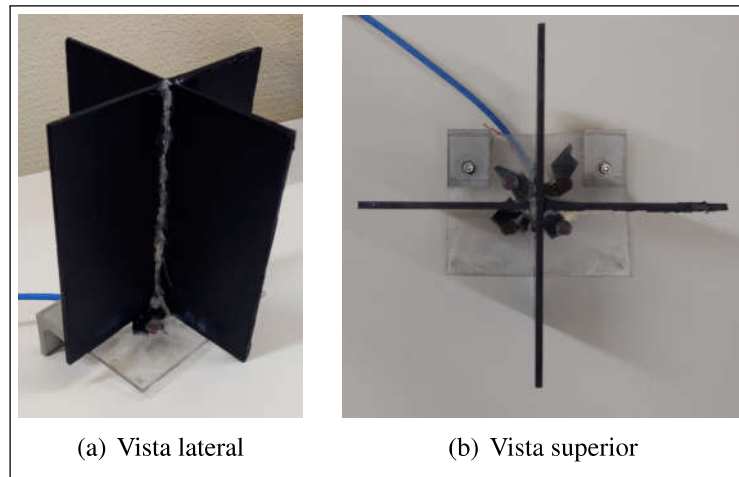


Fonte: Adaptado de (CARVALHO et al., 2004).

Para o rastreamento da altura solar foi projetada e construída uma unidade com arestas de 15cm de lado e altura de 15cm contendo quatro sensores LDRs, resultando na estrutura exibida na Figura 18.

Cada sensor dispõe de um circuito divisor de tensão para enviar a tensão de saída para o controlador, conforme exibido no Apêndice A. Desse modo, quando uma extremidade estiver

**Figura 18 – Disposição dos sensores LDRs.**



**Fonte: Autoria Própria.**

sob maior incidência de luz do que a outra, a tensão de saída dos sensores irá variar, e será necessário realocar o painel.

### 3.3 AQUISIÇÃO DE DADOS DE TENSÃO

A verificação das tensões de entrada e saída do sistema fotovoltaico será realizada através de um circuito divisor de tensão. O circuito é mostrado no Apêndice B.

### 3.4 MOTORES

Existindo energia elétrica proveniente do painel fotovoltaico, opta-se pelo uso de motores elétricos. Devido à necessidade de precisão e por ser dispensável alta velocidade para o sistema, serão adotados motores de passo, possibilitando um controle preciso e, ao mesmo tempo, dispensando o auxílio de *encoders* ou outros sensores de posição.

O motor de passo é um atuador que realiza movimentos angulares discretos, em resposta a um pulso de entrada. Assim como os motores elétricos convencionais, o motor de passo também converte energia eletromagnética em mecânica, diferenciando-se pelo fato de que, a cada pulso do sinal de controle, o eixo do motor gira em um ângulo fixo, denominado passo do motor (AKYIAMA, 2009). Essa circunstância leva à ampla aplicação desses motores em sistemas de posicionamento visto que, para operações dentro dos limites de trabalho do motor, torna-se dispensável realizar o monitoramento da posição do seu eixo em tempo real, isto é, controle poderá ser feito em malha aberta.

Esses motores são ideais para aplicações requerentes de baixas e médias velocidades.

Outra vantagem é que esses motores são compactos e apresentam excelentes torques, possibilitando a movimentação do painel sem agregar peso excessivo à estrutura.

O modelo escolhido foi o 23LM-C351-07V, da marca Minebea, que trabalha com tensão de 12V.

### 3.5 BATERIA

A bateria é utilizada como carga do sistema, e não funcionará como fonte de energia para nenhum equipamento externo ao seguidor solar. Assim, faz-se necessário considerar apenas a sua tensão nominal. Para evitar mais perdas relacionadas à conversão de energia será utilizada a tensão de 12V, igual à dos motores que serão utilizados na estrutura.

A bateria escolhida para integrar o sistema é do modelo M40F, da fabricante Moura.

### 3.6 CONVERSOR CC-CC

O conversor CC-CC deve ser dimensionado em função das características do painel e da bateria. Uma vez que o painel e a bateria já foram escolhidos, é necessário definir qual conversor CC-CC deverá ser empregado para compor o controlador de carga deste projeto.

Sabe-se que o sistema deverá manter a saída de tensão do conversor ligeiramente acima de 12V, a fim de que a diferença de potencial force a entrada de corrente na bateria, e consequentemente a carregue. Após alguns testes definiu-se a tensão de saída do conversor em 13,5V, para que a corrente de entrada do conversor permanecesse dentro dos limites estabelecidos no *datasheet* do painel fotovoltaico, exibido na Tabela 1.

Caso a tensão na entrada do conversor CC-CC fosse inferior à tensão desejada na saída, seria necessário utilizar um conversor elevador de tensão. Porém, isso ocasionaria outro problema, visto que a corrente de saída não seria suficiente para recarregar a bateria. Por isso, será utilizado um conversor Buck, abaixador de tensão.

As equações de dimensionamento de um conversor Buck são dadas em (26), (27) e (28), onde  $L$  é o valor do indutor,  $V_{IN}$  a tensão de entrada,  $f$  a frequência de chaveamento do transistor,  $D$  a razão cíclica,  $C_{OUT}$  o capacitor de saída,  $C_{IN}$  o capacitor de entrada,  $I_{OUT}$  a corrente de saída,  $\Delta i_{OUT}$  a ondulação da corrente de saída,  $\Delta V_{C_{IN}}$  a ondulação da tensão de entrada e  $\Delta V_{C_{OUT}}$  a ondulação da tensão de saída.



$$L = \frac{V_{IN}}{\Delta i_{OUT} \cdot f} \cdot D \cdot (1 - D) \quad (26)$$

$$C_{OUT} = \frac{V_{IN}}{31 \cdot L \cdot f^2 \cdot \Delta V_{C_{IN}}} \quad (27)$$

$$C_{IN} = \frac{I_{OUT}}{4 \cdot f \cdot \Delta V_{C_{IN}}} \quad (28)$$

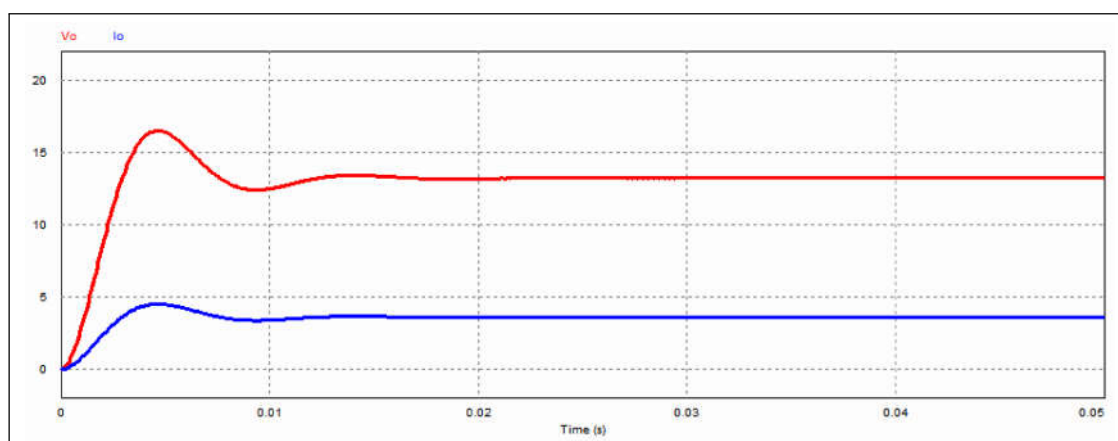
Para dimensionar o conversor Buck adotou-se uma frequência de  $3921\text{Hz}$ . Outra consideração adotada é que a ondulação na tensão de entrada será de no máximo  $5\%$  da tensão máxima do painel solar, mostrada no *datasheet* exibido na Tabela 1. Também foi definido que a ondulação de tensão na saída máxima permitida é de  $1\%$  da tensão média de saída, e que a ondulação de corrente de saída máxima permitida é de  $5\%$  da corrente média de saída.

Visando a obtenção de uma margem de segurança, o conversor é dimensionado para conseguir a maior taxa de conversão do sistema, o que ocorre quando o painel fotovoltaico disponibiliza sua tensão máxima e a bateria encontra-se descarregada.

Aplicando essas considerações às equações (26), (27) e (28), e fazendo os devidos ajustes para valores comerciais de indutores e capacitores, obteve-se como resultado um indutor de  $4\text{mH}$ , um capacitor de entrada de  $470\mu\text{F}$  e um capacitor de saída de  $1000\mu\text{F}$ .

Simulando o sistema calculado considerando a tensão de entrada no conversor igual à tensão máxima da placa solar,  $17,74\text{V}$ , que o painel está funcionando em potência máxima e a razão cíclica aplicada é de  $0,76$ , a fim de obter na saída  $13,5\text{V}$ , obteve-se a resposta apresentada na Figura 19, sendo em azul a tensão de saída e em vermelho a corrente de saída.

**Figura 19 – Tensão (vermelho) e corrente (azul) de saída do conversor Buck.**



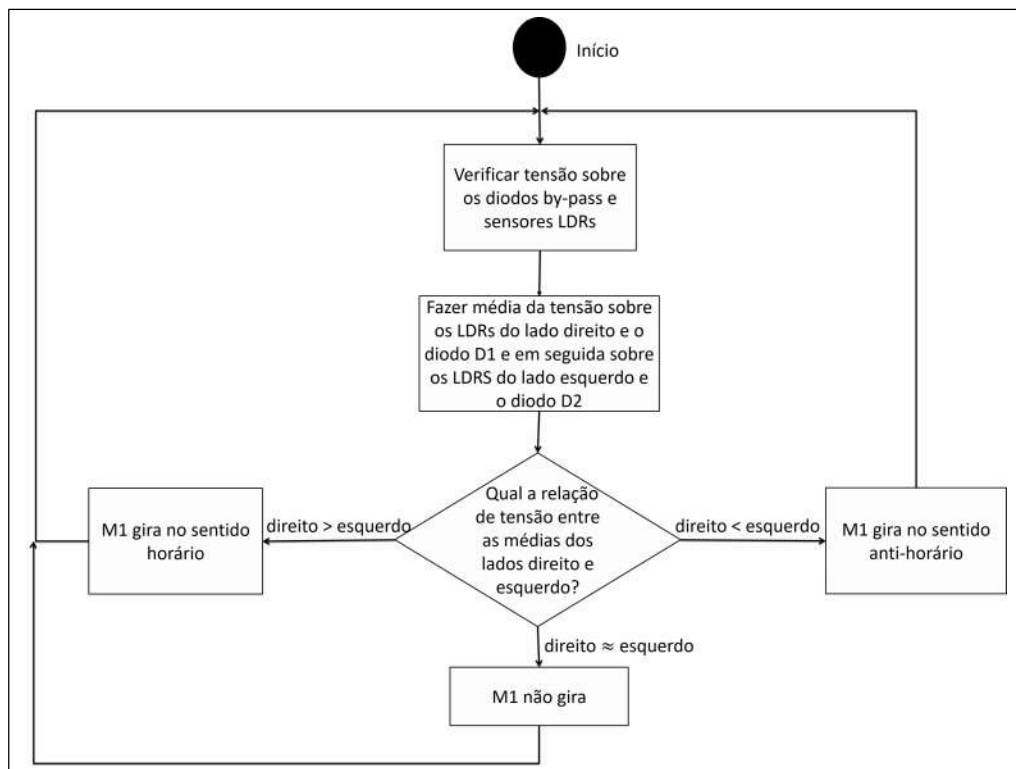
Fonte: Autoria Própria.

### 3.7 CONTROLE DO SEGUIDOR SOLAR

O sistema de controle do seguidor solar tem três vertentes principais: o controle do motor 1 ( $M1$ ), responsável pela correção do ângulo azimutal; o controle do motor 2 ( $M2$ ), responsável pela correção do ângulo de altura solar; e o controle da tensão de saída do sistema fotovoltaico.

Para controlar  $M1$  são utilizados os valores de tensão lidos nos diodos *by-pass* ( $D1$  e  $D2$ ), juntamente com os sensores LDRs. A lógica de controle para o acionamento de  $M1$  é dada pelo fluxograma apresentado na Figura 20.

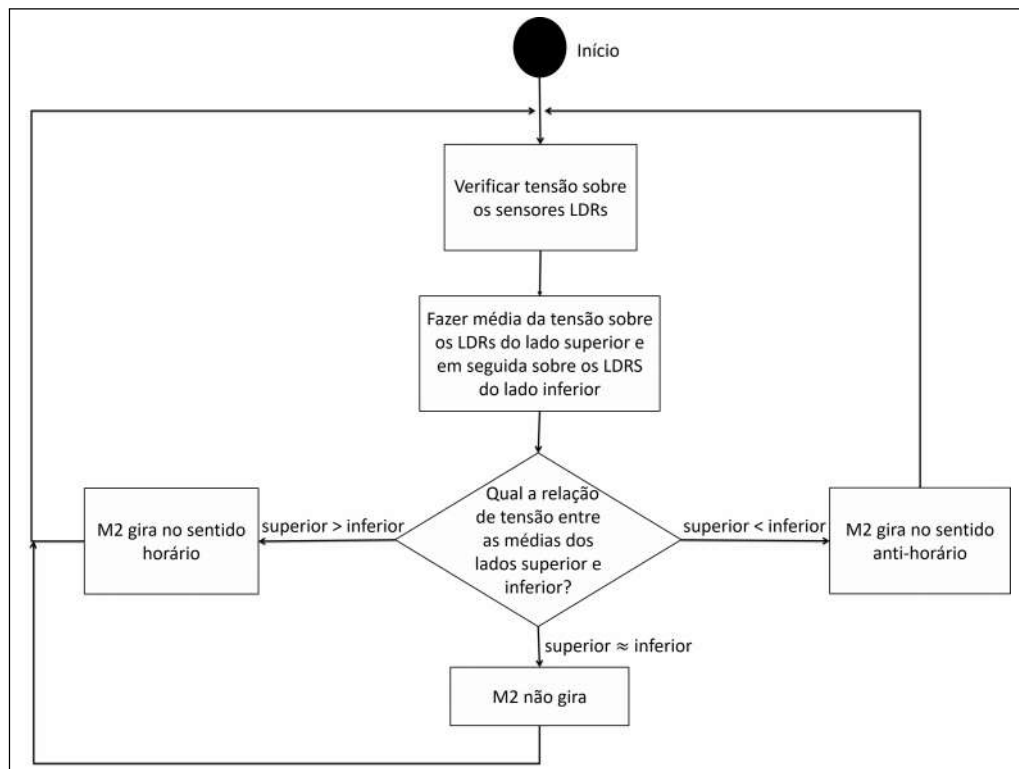
**Figura 20 – Fluxograma de controle do motor 1.**



Fonte: Autoria Própria.

Para o controle de  $M2$  são utilizados apenas os sensores LDRs. O acionamento de  $M2$  será controlado conforme descrito no fluxograma exibido na Figura 21.

**Figura 21 – Fluxograma de controle do motor 2.**

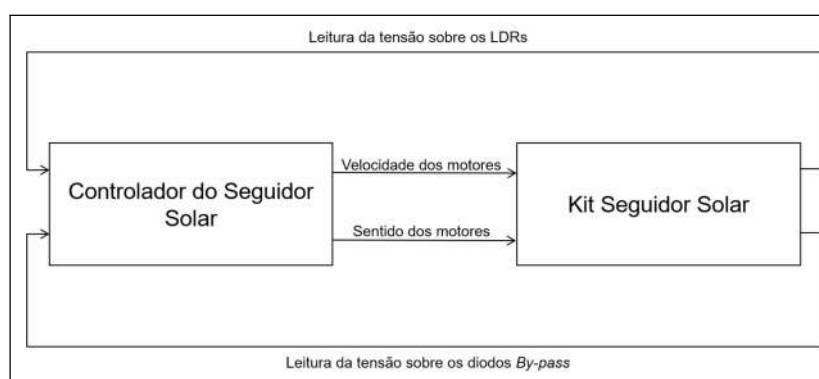


Fonte: Autoria Própria.

Agregada a estratégia de controle dos motores mostradas nas Figura 20 e 21 foi implementado o controle *Fuzzy* para o controle da velocidade dos motores, resultando em maior robustez do sistema, uma vez que a lógica *Fuzzy* permite certo grau de imprecisão. A implementação do controle *Fuzzy* será descrita posteriormente.

Visando permitir que esse projeto possa ser reutilizado posteriormente, permitindo o uso de novas técnicas de controle, preferiu-se dividir a etapa de controle do seguidor solar em dois blocos: kit seguidor solar e controlador do seguidor solar, como exibido na Figura 22.

**Figura 22 – Divisão do bloco controle do seguidor solar.**



Fonte: Autoria Própria.

O bloco kit seguidor solar engloba todos os circuitos necessários para fazer o acionamento dos motores, os circuitos necessários para a aquisição de dados de luminosidade e um circuito de controle responsável apenas pela gestão de segurança do sistema, todos apresentados no Apêndice A. A gestão de segurança trata-se de evitar colisões mecânicas, ao continuar acionando os motores quando o sistema já está em posição de fim de curso.

O bloco controle do seguidor solar é responsável pela tomada de decisão quanto à velocidade e sentido dos motores. Ambos blocos necessitam de um micro controlador, e devido a características como número de portas digitais e analógicas disponíveis, frequência de PWM, número de interrupções externas disponíveis e disponibilidade no laboratório onde foi executado o projeto, optou-se pelo uso de dois Arduinos Mega, um para cada bloco. Desse modo, para uso posterior é possível substituir o Arduino Mega do bloco controlador do seguidor solar e utilizar outro microcontrolador para comandar o sistema.

A seguir será apresentada uma descrição do funcionamento de cada funcionalidade do kit seguidor solar, e o método de controle aplicado ao controlador do seguidor solar.

### 3.7.1 ACIONAMENTO DOS MOTORES

Para realizar o acionamento dos motores, o kit seguidor solar precisa enviar pulsos sequenciais para as bobinas dos motores de passo, sendo a velocidade controlada pelo intervalo entre os pulsos. Isso é feito com o auxílio de módulos ponte H, como mostrado no Apêndice A.

Foram realizados alguns testes para verificar qual a velocidade máxima que o motor consegue trabalhar sem perder o passo. Também foram feitos testes para definir uma velocidade mínima para o sistema, de maneira que o sistema não torne-se muito lento. Essas velocidades foram setadas em software no micro controlador do kit, tornando possível variá-la nesse intervalo. Dessa maneira o micro controlador do kit recebe um pulso PWM do controlador, faz a leitura do *duty cycle* em porcentagem e envia os pulsos sobre as bobinas com velocidade proporcional a essa porcentagem.

Para definir o sentido de giro dos motores utiliza-se as interrupções do micro controlador do kit. Ao receber um sinal sobre um de seus pinos de interrupção o micro controlador chama uma função de movimento. Foi criada uma função de movimento para cada sentido de rotação de cada um dos motores, isto é, a função para rotação no sentido horário e anti-horário de M1, e também de M2, além das funções de parada programadas separadamente para cada um dos motores.

A fim de evitar danificar os motores e a estrutura foram colocados sensores de fim de

curso no sistema, conforme o circuito mostrado no Apêndice A. Quando estes são pressionados enviam um sinal para o micro controlador do kit que impede o movimento dos motores na direção na qual o painel já chegou ao fim do curso.

### 3.7.2 LEITURA DA RADIAÇÃO SOLAR

Para a leitura da radiação solar o kit seguidor solar conta com sensores LDRs e o painel solar com diodos *by-pass*, os quais já foram detalhado na seção 3.2. Esses sinais são enviados diretamente para o controlador, não sendo processados pelo micro controlador do kit.

### 3.7.3 TÉCNICA DE CONTROLE DO SEGUIDOR SOLAR

Para realizar o controle do movimento do seguidor solar é necessário definir o sentido do movimento e a sua velocidade. Para o primeiro foi utilizado um algoritmo para a tensão sobre os sensores de luminosidade e definir o sentido do movimento, para o segundo foi necessário usar controle *Fuzzy* uma vez que o sistema sofria muitas perturbações causadas pelos intemperismo, tornando-se muito difícil desenvolver um modelo matemático do sistema. A seguir será explicado mais detalhadamente como foi realizado esses controles.

#### 3.7.3.1 CONTROLE DO SENTIDO DOS MOTORES

O algoritmo de controle do sentido dos motores agrupa as estratégias de decisão demonstradas pelos fluxogramas apresentados nas Figuras 20 e 21. Ele inicia lendo a radiação solar por meio dos sensores LDRs e dos diodos *by-pass*, em seguida é feita a comparação entre os sensores dos lados opostos, norte-sul e leste - oeste, e verifica-se qual apresenta maior diferença. Caso a maior diferença seja no sentido norte-sul verifica-se o sinal do erro, caso seja positivo o sistema envia o comando para abaixar o painel, caso negativo envia-se o comando para abaixá-lo. Se a maior diferença for no sentido leste-oeste é utilizado a lógica análoga a anterior, sendo para erro positivo enviado o comando de sentido horário e para erro negativo enviado o comando de sentido anti-horário. Em seguida o erro é enviado para o controlador *Fuzzy* para definir a velocidade do movimento.

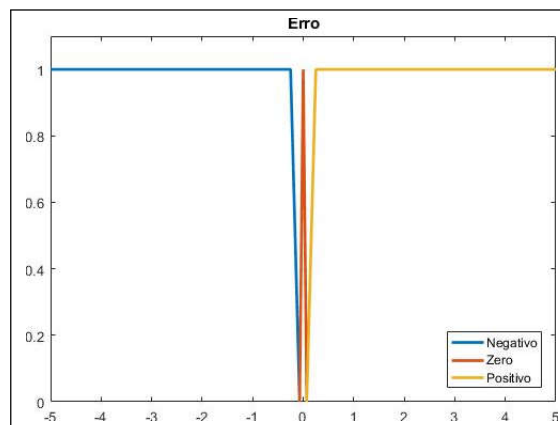
#### 3.7.3.2 CONTROLE DA VELOCIDADE DOS MOTORES

O primeiro passo para criação de um controle segundo a lógica *Fuzzy* é definir quais são as variáveis de entrada e saída. As variáveis de entrada de controle correspondem às utilizadas pelo operador para tomada de decisão quanto à resposta do sistema, neste caso o erro

entre os sensores de lados opostos, leste-oeste ou norte-sul, e as variáveis de saída são aquelas que deseja-se obter do controlador para aplicar ao sistema, sendo nessa situação a velocidade dos motores.

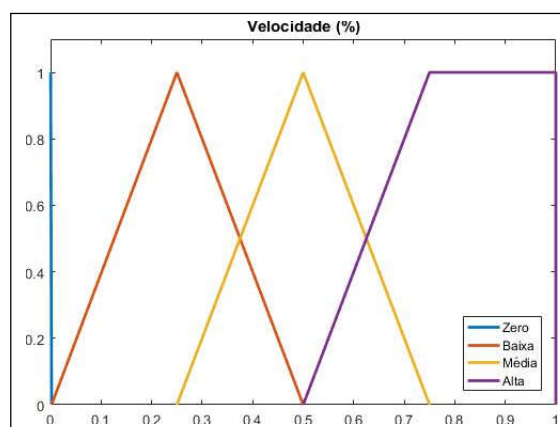
Sabe-se que a tensão de saída dos sensores varia de zero a 5V, logo o módulo do erro entre os sensores varia de  $-5$  a  $5$ . Como a velocidade dos motores é limitada pelo Kit seguidor solar o controle de velocidade deve-se definir a porcentagem de velocidade a ser aplicada, logo a saída de controle deve variar de 0 a 1. A partir dessas informações foram elaboradas as funções de pertinência para a entrada e saída do controlador *Fuzzy*, definindo grupos de maneira qualitativa. Essas funções são mostradas nas Figuras 23 e 24.

**Figura 23 – Função de pertinência da variável erro.**



Fonte: Autoria Própria.

**Figura 24 – Função de pertinência da variável velocidade.**

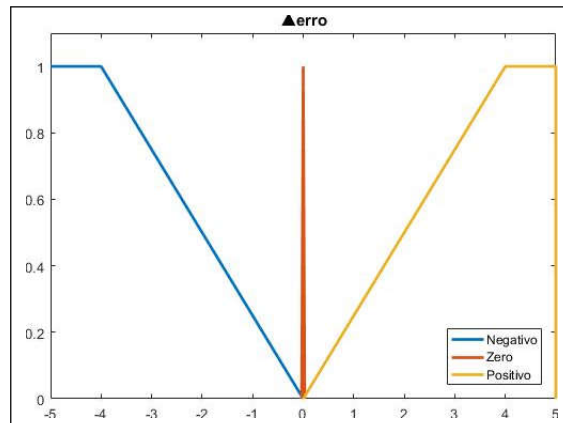


Fonte: Autoria Própria.

A partir da análise do sistema decidiu-se adotar mais uma variável de entrada para o controlador *Fuzzy*, a derivada do erro,  $\Delta_{erro}$ , que corresponde à taxa de variação da variável

erro. Essa variável foi normalizada no intervalo igual ao da variável erro, dando origem à função de pertinência exibida na Figura 25

**Figura 25 – Função de pertinência da variável  $\Delta_{erro}$ .**



**Fonte: Autoria Própria.**

O passo seguinte foi criar o conjunto de regras do sistema. Utilizando a metodologia proposta por Mamdani, que modela o controlador pelo método de inferência MAX-MIN, foram relacionadas as três funções de pertinência do modelo *Fuzzy*, apresentados anteriormente, gerando as regras apresentadas na Tabela 2.

**Tabela 2 – Base de regras do controlador *Fuzzy*.**

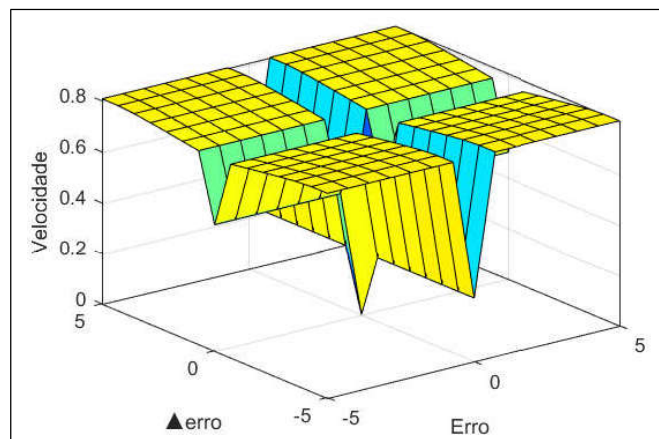
<b>Erro</b>	$\Delta_{erro}$	<b>Velocidade</b>
Negativo	Negativo	Alta
Negativo	Positivo	Alta
Zero	Negativo	Baixa
Zero	Positivo	Baixa
Positivo	Negativo	Alta
Positivo	Positivo	Alta
Zero	Zero	Zero
Negativo	Zero	Média
Positivo	Zero	Média

**Fonte: Autoria própria.**

A defuzzificação foi realizada pelo método do centro de área, pois esse resulta em um sinal de saída contínuo e com variações suaves, o que é essencial para não instabilizar um sistema em malha fechada (SILVA, 2013).

Transpondo esse modelo *Fuzzy* no MATLAB<sup>®</sup>, com auxílio da ferramenta *Fuzzy Logic Designer* foi possível criar o controlador *Fuzzy*, cuja superfície de controle é apresentada na Figura 26.

**Figura 26 – Superfície de controle *Fuzzy*.**



**Fonte: Autoria Própria.**

Portanto, para definir a velocidade dos motores deve-se calcular o erro e a derivada do erro dos sensores e aplicar sobre o controle *Fuzzy* que retorna a velocidade a ser utilizada.

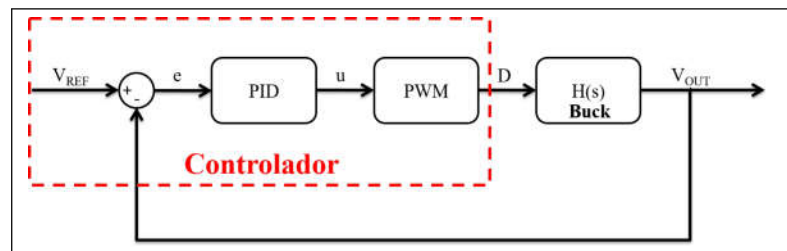
### 3.8 CONTROLE DO CONVERSOR CC-CC

O controle da tensão de saída do sistema fotovoltaico é feito pela variação da razão cíclica de chaveamento do conversor Buck. O controlador ajusta a razão cíclica por meio da verificação da tensão de saída do conversor, com propósito de manter a tensão de saída em 13,5V.

O controle da variação da razão cíclica é realizada por meio da técnica de controle PID, conforme ilustrado na Figura 27.



**Figura 27 – Esquemático do controlador do conversor Buck.**



Fonte: Autoria Própria.

O bloco Buck representa o conversor Buck juntamente com o filtro de saída, e é dado pela equação (16). O bloco PID representa a técnica de controle adotada pelo controlador, e é dado pela equação (17).  $V_{IN}$  corresponde a tensão de entrada no conversor Buck após regulada pelo filtro capacitivo de entrada.

Conforme apresentado na Figura 27, o controlador lê a tensão de saída e através da técnica de controle PID determina a razão cíclica a ser aplicada no conversor. A razão cíclica é transmitida ao transistor por meio do sinal PWM.

O controle do conversor Buck é feito de modo independente do controle do seguidor solar, logo, é necessário um outro micro controlador para realizar esse controle. Optou-se pelo uso de um Arduino Pro-Mini, uma vez que já havia disponível no laboratório e era suficiente para realizar esse controle.

Para o acionamento do Buck o kit possui um circuito auxiliar que transforma o pulso PWM proveniente do micro controlador, que varia de zero a 5V em um sinal PWM que varie de zero a 15V de mesma frequência para o acionamento do transistor do conversor Buck.

Os circuitos necessários para o acionamento e controle do conversor Buck é mostrado no Apêndice B.

A seguir será apresentado o projeto do controlador aplicado ao conversor Buck.

### 3.8.1 CÁLCULO DOS PARÂMETROS DE CONTROLE DO CONVERSOR BUCK

Sabe-se que a tensão de entrada no conversor Buck é proveniente do painel solar e pode variar de zero a 17,74V, entretanto essa tensão só pode ser aproveitada se for superior a tensão da bateria. Assim, criou-se uma condição em software para que o conversor Buck só seja acionado se a tensão de entrada for maior que 13,5V. Para a sintonia dos parâmetros PID inicialmente linearizou-se o sistema dado pela equação (16), adotando como tensão de entrada 15,12V, e para o cálculo de  $R_{carga}$  usou-se a equação (29).

$$R_{carga} = \frac{v_{OUT}^2}{P_M} \quad (29)$$

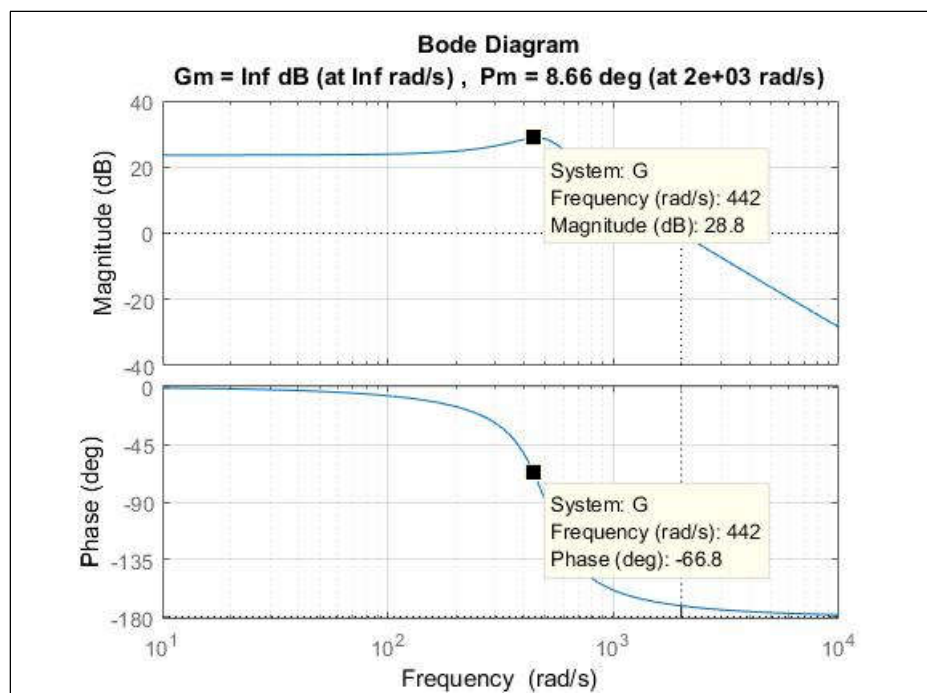
sendo  $P_M$  a potência máxima do painel solar. Fazendo o cálculo, usando  $v_{OUT}$  como 13,25V e  $P_M$  como 50W, obteve-se  $R_{carga}$  no valor de 3,51. As resistências internas do capacitor e do indutor foram desconsideradas, pois são desconhecidas.

A linearização foi necessária devido a incerteza quanto a tensão disponibilizada pelo painel, uma vez que esta é variável. Desse modo a função de transferência do sistema linearizado é expressa por

$$H(s) = \frac{3,78 \cdot 10^6}{s^2 + 284,9s + 250000} \quad (30)$$

A partir da equação (30) foi obtido o diagrama de Bode, exibido na Figura 28, que mostra o comportamento do sistema em diferentes frequências.

**Figura 28 – Diagrama de Bode do conversor Buck.**



Fonte: Autoria Própria.

Por meio do diagrama de Bode obtêm-se  $\omega_g$ ,  $M_g$  e  $\angle G(j\omega_g)$ . Adotando  $\sigma$  como  $9^{-1}$ ,  $PM$  como  $60^\circ$  e substituindo esses valores nas equações apresentadas na seção 2.6 encontram-se os parâmetros do controlador, dados por

$$K_P = 0,2319 \quad (31)$$

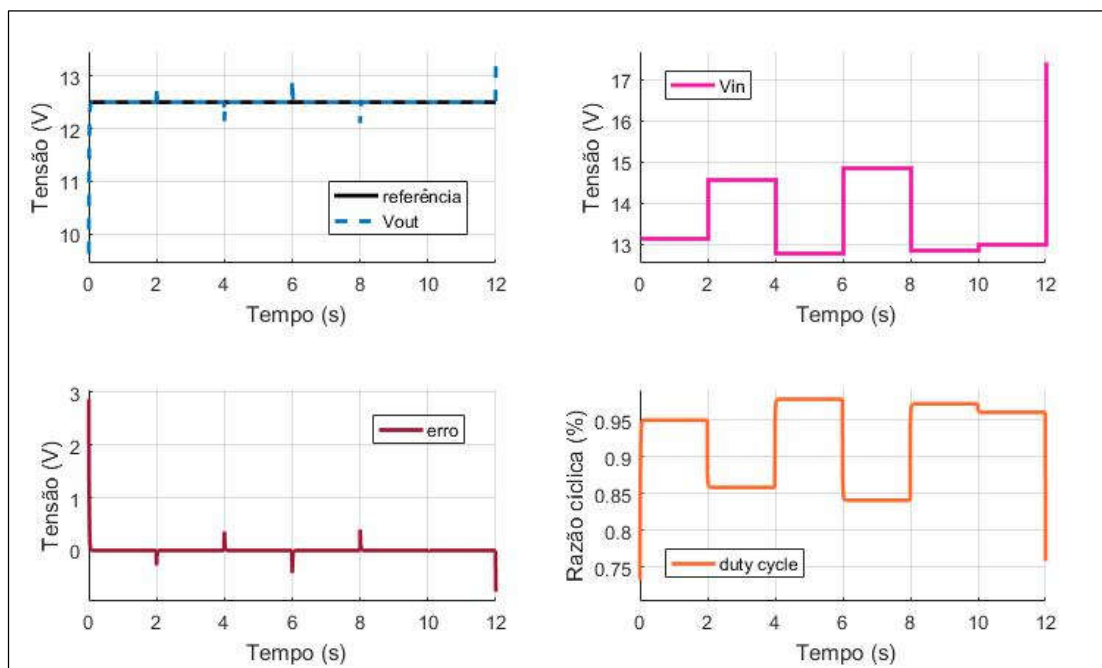
$$K_I = 25,0524 \quad (32)$$

$$K_D = 2,3844 \cdot 10^{-4} \quad (33)$$

A variável  $PM$  foi determinada visando obter desempenho satisfatório e proteger contra variações de comportamento do sistema. A variável  $\sigma$  foi variada e os parâmetros do controlador resultantes testados via simulação, sendo obtido o desempenho do sistema desejado quando seu valor atingiu  $9^{-1}$ .

Simulando o sistema em malha fechada, com controlador, variando a tensão de entrada no Buck atinge o resultado mostrada na Figura 29.

**Figura 29 – Simulação do conversor Buck com controlador.**



Fonte: Autoria Própria.

Observando a Figura 29 é possível perceber que com o uso do controlador o sistema consegue manter a saída do conversor sobre a referência, com erros inferiores a 1V e estabilizando-se rapidamente após os distúrbios. Mas para isso é necessário que o sistema só seja acionado quando a tensão de entrada seja superior à referência, uma vez que o aspecto construtivo de um conversor Buck não permite elevar a tensão. Caso o conversor seja acionado quando a tensão de entrada é inferior à referência a ação de controle desestabiliza.

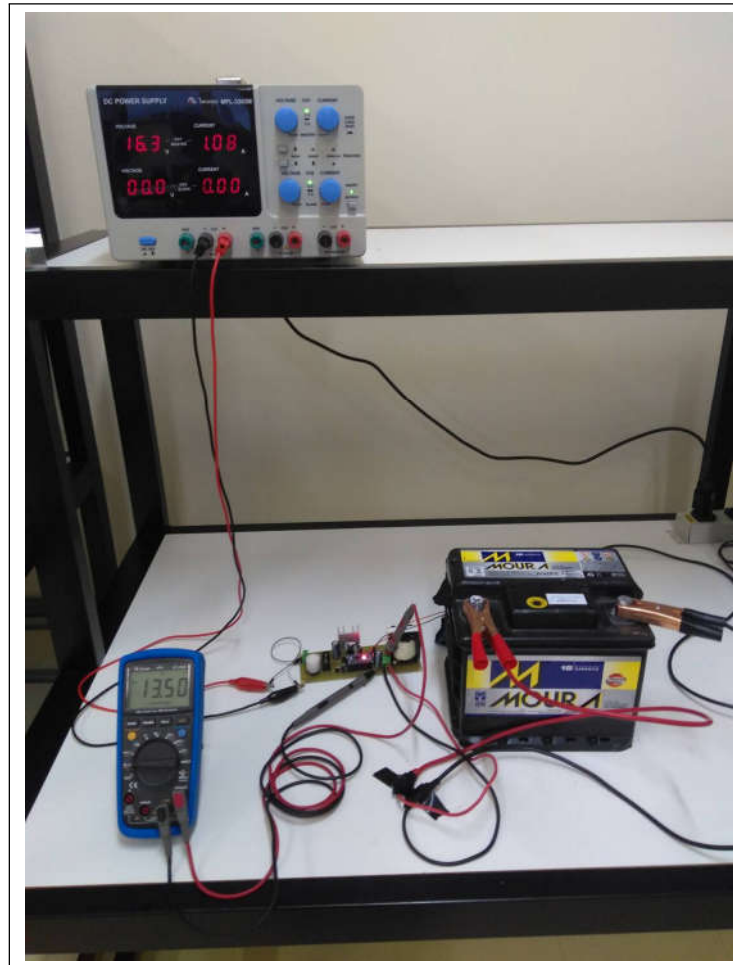
## 4 RESULTADOS

O protótipo foi construído e para realizar a validação do movimento do seguidor solar este foi exposto ao sol, e conseguiu realizar o movimento de maneira satisfatória quando há presença de luminosidade direta, isto é, quando o dia não está nublado. Para dias nublados o seguidor apresenta falhas, pois os sensores foram calibrados para ter maior precisão na presença de maior luminosidade. A calibração é realizada a partir da escolha do resistor que compõe o divisor de tensão junto com o LDR. Usando um resistor de valor maior,  $10K\Omega$ , por exemplo, resulta em maior precisão na presença de menor luminosidade, como luz artificial e dias nublados, enquanto ao usar um resistor de valor menor,  $1K\Omega$ , como usado nesse sistema, resulta em maior precisão na presença de maior luminosidade.

Caso a estrutura esteja localizada próximo a algum objeto que cause sombreamento sobre os sensores, um prédio por exemplo, o sistema procurará mover-se para evitar o sombreamento, mesmo que isso signifique não seguir o sol. Entretanto, essa estratégia acaba por compensar, pois uma área maior do painel receberá raios solares, mesmo que com ângulo de incidência seja diferente de  $0^\circ$ .

Para realizar a validação do controle PID sobre o conversor CC-CC realizou-se um experimento de bancada, colocando uma fonte variável na entrada e a bateria na saída, e com o auxílio de um multímetro verificou-se a tensão sobre o capacitor de saída do conversor Buck. Variou-se a tensão de entrada entre 14V a 18V e a tensão de saída manteve-se fixa em 13,5V, como mostrado na Figura 30.

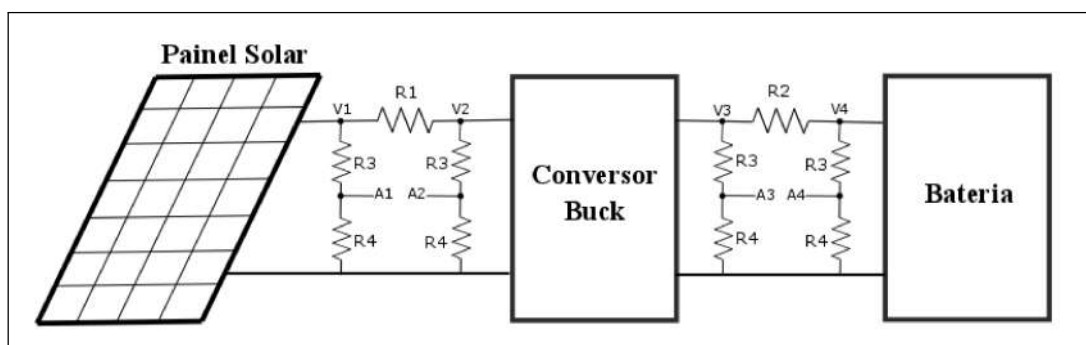
**Figura 30 – Teste do circuito do Conversor Buck.**



Fonte: Autoria Própria.

Uma vez que o controle do conversor foi validado o Buck foi adicionado ao sistema do seguidor solar, recebendo o painel solar na entrada e a bateria na saída. Então foi montado o circuito da Figura 31 para verificar as tensões e correntes de entrada e saída do sistema, a fim de verificar a eficiência.

**Figura 31 – Circuito usado para validação do sistema.**



Fonte: Autoria Própria.

Para a aquisição de dados foi utilizada a placa NI USB 6008, a qual lê tensões de  $-10$  a  $10V$ . Por essa causa foi necessário realizar os divisores de tensão representados pelos resistores R3 e R4, já que a tensão no barramento é superior a  $10V$ .

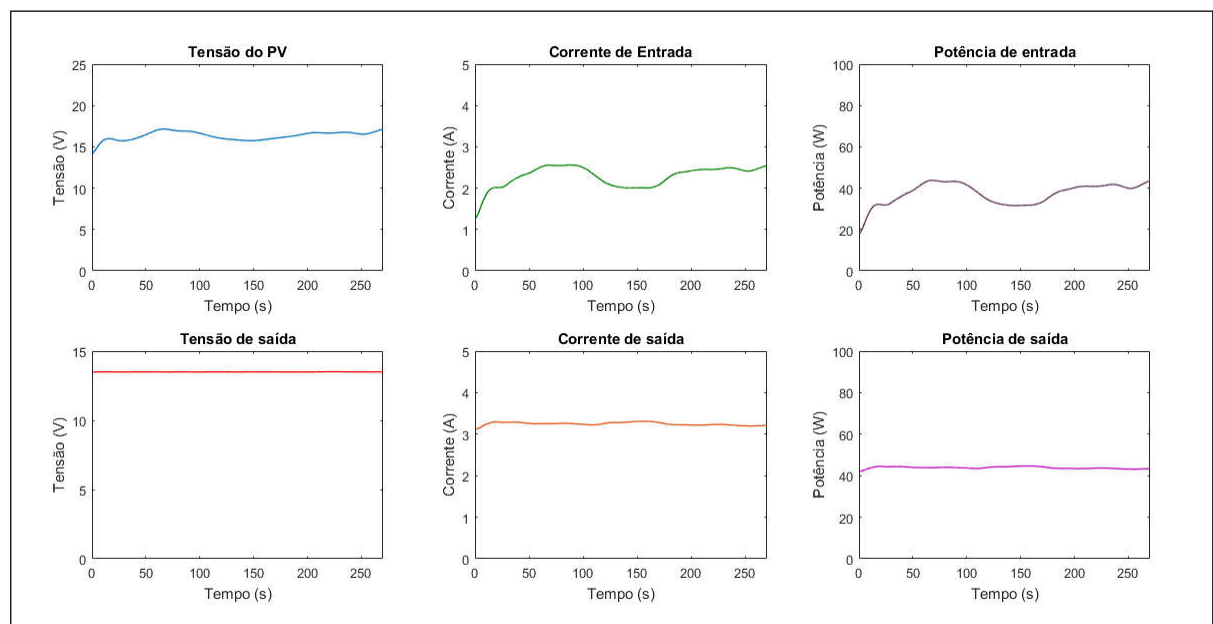
Os resistores R1 e R2 são de  $0,1\Omega$ , e são utilizados para medir as correntes de entrada e saída respectivamente. As correntes podem ser calculadas a partir da queda de tensão sobre a resistência, e seu valor nominal, como mostrado nas equações (34) e (35).

$$I_{IN} = \frac{V1 - V2}{R1} \quad (34)$$

$$I_{OUT} = \frac{V3 - V4}{R2} \quad (35)$$

Foram realizados ensaios a fim de verificar o ganho de potência obtido ao realizar o seguimento solar. Iniciaram-se os testes com o painel paralelo à superfície da bancada, então o sistema realizou o reposicionamento de maneira automática. A Figura 32 mostra os resultados adquiridos às 9 horas da manhã no mês de maio, quando o sol ainda encontrava-se a Nordeste, e o céu estava com poucas nuvens.

**Figura 32 – Resultados do teste 1 do sistema.**

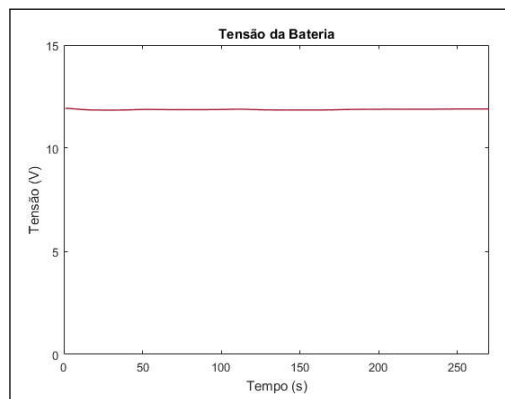


**Fonte: Autoria Própria.**

É perceptível na Figura 32 um grande ganho de potência com o ajuste do painel solar. Entre o tempo 100 e 180 segundos uma nuvem pouco densa colocou-se entre o sol e o painel, reduzindo levemente a produção de energia.

Na saída foi obtida uma tensão fixa, com picos de menos de  $0,5V$ . A corrente de saída não depende apenas da saída do Buck, mas também da tensão da bateria, que por sua vez tem pequenas variações pois é responsável por alimentar os motores. Como a potência de entrada e a tensão da bateria são variáveis a corrente de saída contém pequenas variações. Como a tensão e corrente de saída variam pouco a potência de saída apresenta o mesmo comportamento. Nesse mesmo teste a tensão da bateria também foi monitorada e é mostrada na Figura 33.

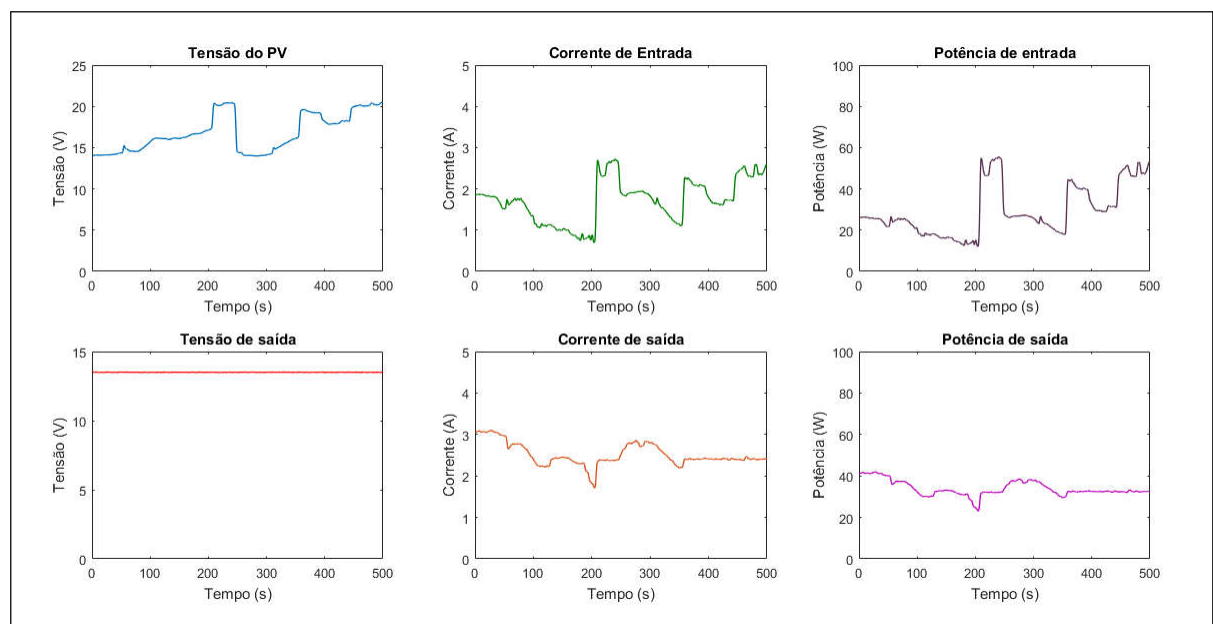
**Figura 33 – Tensão na Bateria durante teste 1.**



Fonte: Autoria Própria.

Também foi realizado um teste as 11 da manhã do mesmo dia, no qual sempre que o sistema encontrava a posição correta a bancada era movimentada colocando o painel em posição desfavorável, o resultado desse teste é mostrado na Figura 34.

**Figura 34 – Resultados do teste 2 do sistema.**

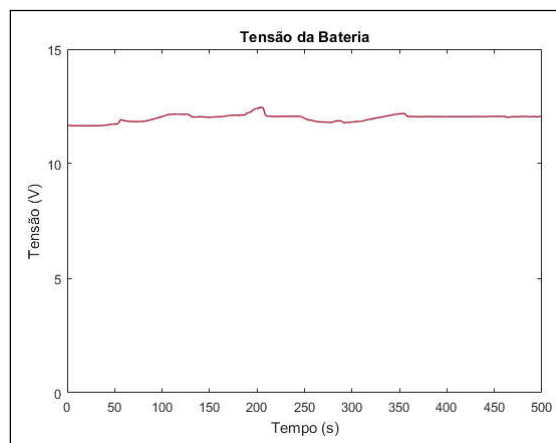


Fonte: Autoria Própria.

O sistema iniciou em uma posição desfavorável, alcançou pela primeira vez a posição correta aos 210 segundos, então a bancada foi movida colocando o painel em posição desfavorável novamente aos 250 segundos, alcançando a posição correta aos 360 segundos, então a bancada foi movida pela última vez aos 400 segundos e o sistema alcançou a posição correta aos 450 segundos.

Novamente a tensão da bateria foi monitorada e percebeu-se que a bateria teve uma variação de tensão maior, conforme observado na Figura 35, o que pode ser explicado com a necessidade de alimentar os motores por quase todo o período de aquisição de dados.

**Figura 35 – Tensão na Bateria durante teste 2.**



**Fonte: Autoria Própria.**



## 5 CONCLUSÃO

O sistema do seguidor solar juntamente com conversor Buck apresentou resultados satisfatórios, conseguindo em alguns momentos extrair uma potência superior as apresentadas em condições de teste padrão (STC), como observado na Figura 32 onde a potência de entrada atingiu valores superiores a 50W.

Entretanto foi verificada uma falha no sistema. Como os sensores utilizados não diferenciam a radiação direta da difusa, caso o seguidor solar inicie seu movimento em um ponto oposto ao correto o sistema não consegue chegar ao ponto correto, pois utiliza a diferença de luminosidade sobre os sensores, e quando a luminosidade sobre os sensores se equilibram, mesmo que o painel não esteja com a face voltada para o sol o sistema cessa o movimento.

O conversor Buck comportou-se da maneira desejada, mantendo a tensão de saída fixa e com erros pequenos, além de transferir uma corrente considerável para a bateria, logo o controle PID mostrou-se eficiente.

O uso da lógica Fuzzy mostrou-se válida pois não necessita de um modelo matemático do sistema, o qual não é possível extrair devido as características climáticas.

### 5.1 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

O projeto apresentado nesse trabalho pode ser utilizado como base para o estudo mais profundo da viabilidade do uso se um seguidor solar de dois eixos, podendo ser feita a comparação com uma estrutura fixa que utilize o mesmo modelo de painel fotovoltaico.

Outra ponto a ser estudado a fim de analisar a viabilidade do método é a relação entre a energia gerada e a energia exigida pelo sistema para realizar o rastreamento solar.

## REFERÊNCIAS

- AKYIAMA. **Treinamento de motores de passo, drives e introdução a servo acionamentos.** [S.l.], 2009.
- ALVES, A. F. Desenvolvimento de um sistema de posicionamento automático para painéis fotovoltaicos. Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2008.
- ANICETO, J. M. A. **Conversor DC-DC com busca de ponto de potência máxima (MPPT) para painéis solares.** Tese (Doutorado) — Faculdade de Ciências e Tecnologia, 2010.
- BARG, E. K. Protótipo de um controlador de temperatura baseado em lógica fuzzy utilizando um microcontrolador. **Projeto de Graduação (Departamento de Ciências da Computação)- Universidade Regional de Blumenau, 57pp**, 2002.
- BILOBROVEC, M.; MARÇAL, R. F. M.; KOVALESKI, J. L. Implementação de um sistema de controle inteligente utilizando a lógica fuzzy. **XI SIMPEP, Bauru/Brasil**, 2004.
- CARVALHO, D. R. et al. Desenvolvimento de um rastreador solar biaxial. Universidade Federal de Viçosa, 2011.
- CARVALHO, P. et al. Estudo estatístico de radiação solar visando o projeto de unidades de dessalinização acionadas por painéis fotovoltaicos sem baterias. **Proceedings of Agrener GD**, 2004.
- CASTRO, R. M. Introdução à energia fotovoltaica. **DEEC/Secção de Energia, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa**, 2007.
- DRIANKOV, D.; HELLENDORRN, H.; REINFRANK, M. Introduction. In: **An Introduction to Fuzzy Control**. [S.l.]: Springer, 1996. p. 1–36.
- FACCIN, F. Abordagem inovadora no projeto de controladores PID. 2004.
- FILHO, J. I. d. C. R. Potencial para uso de seguimento solar em sistemas fotovoltaicos: estudo de caso para fortaleza/CE. UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ, 2013.
- GNOATTO, E. et al. Desempenho de painel fotovoltaico de um sistema isolado. **5º Encontro de Energia no Meio Rural**, SciELO Brasil, 2004.
- GÖKHAN, O. et al. Solar tracking systems and a two-axis active prototype with stepwise movement. 2014.
- GOMIDE, F. A. C.; GUDWIN, R. R. Modelagem, controle, sistemas e lógica fuzzy. **SBA Controle & Automação**, v. 4, n. 3, p. 97–115, 1994.
- GONZAGA, D. A. Desenvolvimento e análise de desempenho de sistema seguidor solar de dois graus de liberdade. UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO, 2013.
- HSING, A. Solar panel tracker. California Polytechnic State University, 2010.

- KARIMOV, K. S. et al. A simple photo-voltaic tracking system. **Solar energy materials and solar cells**, Elsevier, v. 87, n. 1, p. 49–59, 2005.
- KELMAN, J. et al. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil/Agência Nacional de Energia Elétrica**. [S.l.], 2005.
- KLEIN, P. A. T.; WEBER, L. Aplicação da lógica fuzzy em software e hardware. **1a Edição, Ed. Ulbra**, 2003.
- LIRA, J. R. V. Desenvolvimento de um rastreador solar do tipo polar com ajuste do ângulo de inclinação. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2014.
- LJUNG, L. **System Identification: Theory for the User, PTR Prentice Hall Information and System Sciences Series**. [S.l.]: Prentice Hall, New Jersey, 1999.
- MANUAL, B. U. Fuzzy logic for g toolkit reference manual. 1997.
- MARINESCU, D.; MARINESCU, C. Control optimizing algorithm for soft sun-trackers. In: IEEE. **Automation, Quality and Testing, Robotics, 2006 IEEE International Conference on**. [S.l.], 2006. v. 1, p. 54–57.
- MONDAL, A. **Digital PID Controller Design for DC-DC Buck Converter**. Tese (Doutorado) — National Institute of Technology, Rourkela, 2014.
- MOORE, C.; HETTHESSY, J.; BARS, R. Control modes-closed-loop response. **Instrument Engineers' Handbook, Volume Two: Process Control and Optimization**, CRC Press, v. 2, p. 135, 2005.
- NASCIMENTO, C. A. do. **Princípio de funcionamento da célula fotovoltaica**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Lavras, 2004.
- OGATA, K.; MAYA, P. Á.; LEONARDI, F. **Engenharia de controle moderno**. [S.l.]: Prentice Hall, 2003.
- OLIVEIRA, M. M. Análise do desempenho de um gerador fotovoltaico com seguidor solar azimutal. 2008.
- PEREIRA, F. Guia de manutenção de instalações fotovoltaicas. **Editora: Publindústria**, 2012.
- PETRY, C. A.; BARBI, I. Introdução aos conversores cc-cc. 2001.
- PRINSLOO, G.; DOBSON, R. **Solar Tracking: High precision solar position algorithms, programs, software and source-code for computing the solar vector, solar coordinates & sun angles in Microprocessor, PLC, Arduino, PIC and PC-based sun tracking devices or dynamic sun following hardware**. [S.l.]: Gerro Prinsloo, 2015.
- RANA, S. A study on automatic dual axis solar tracker system using 555 timer. **International Journal of Scientific & Technology Research**, v. 1, p. 77–85, 2013.
- SHIRAHIGE, A. B. **Metodologia para aferição da ação de controle proporcional integral derivativa implementada em controladores industriais**. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2007.

SILVA, M. M. d. **Controle de posição de uma plataforma plana para captação de radiação solar**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2013.

SILVA, R. A. C. Inteligência artificial aplicada a ambientes de engenharia de software: Uma visão geral. **INFOCOMP Journal of Computer Science**, v. 4, n. 4, p. 27–37, 2005.

TECHNOLOGY, N. K. S. **Specification sheet**. Disponível em: <<http://www.solarbrasil.com.br/images/solarbrasil/downloads/KM50.pdf>>. Acesso em: 03 jun. 2016.

TREVELIN, F. C. et al. Estudo comparativo entre métodos de rastreamento solar aplicados a sistemas fotovoltaicos. UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, 2014.

TUDORACHE, T.; KREINDLER, L. Design of a solar tracker system for pv power plants. **Acta Polytechnica Hungarica**, v. 7, n. 1, p. 23–39, 2010.

VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R. Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações. **São Paulo, Érica**, 2012.

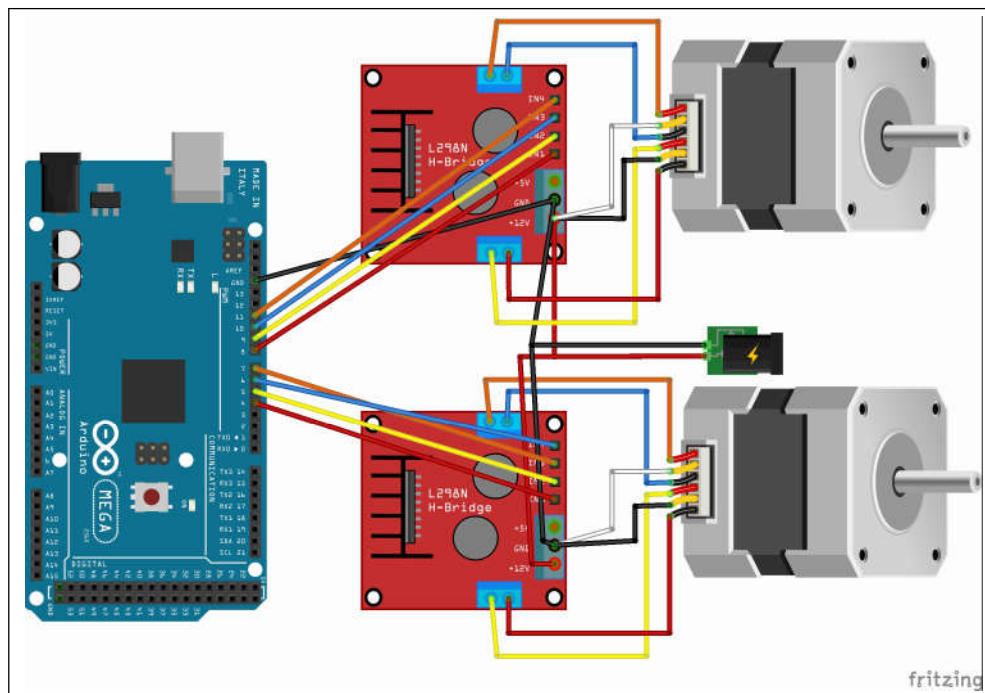
WUIDART, L. Topologies for switched mode power supplies. **STMicroelectronics, Application note**, 1999.

## APÊNDICE A – CIRCUITOS DO KIT SEGUIDOR SOLAR

### A.1 ACIONAMENTO DOS MOTORES

Para realizar acionamento dos motores o sistema contou com auxílio de módulos L298N, que funcionam como uma ponte H. A Figura 36 mostra como foram realizadas as ligações. O Arduino Mega exibido nesse circuito é o controlador do bloco Kit Seguidor Solar exibido na Figura 22.

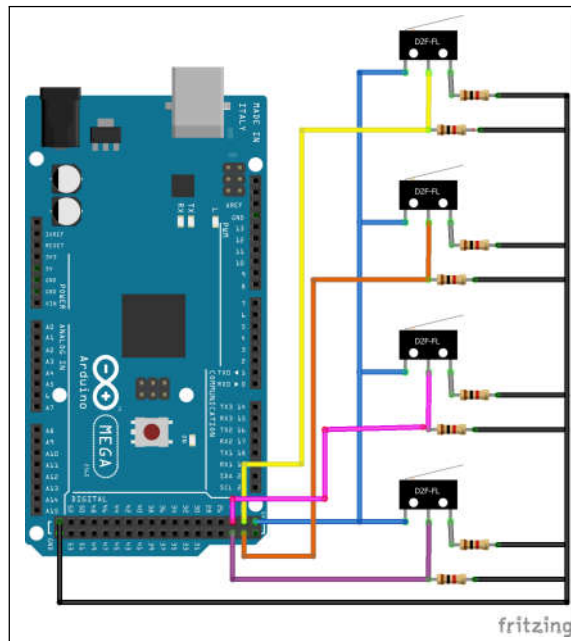
**Figura 36 – Circuito de acionamento dos motores.**  
**Fonte: Autoria própria.**



### A.2 SENSORES DE FIM DE CURSO

O circuito mostrado na Figura 37 é responsável pela gestão de segurança do seguidor solar. O Arduino Mega mostrado no circuito faz parte do bloco Kit Seguidor Solar apresentado na Figura 22.

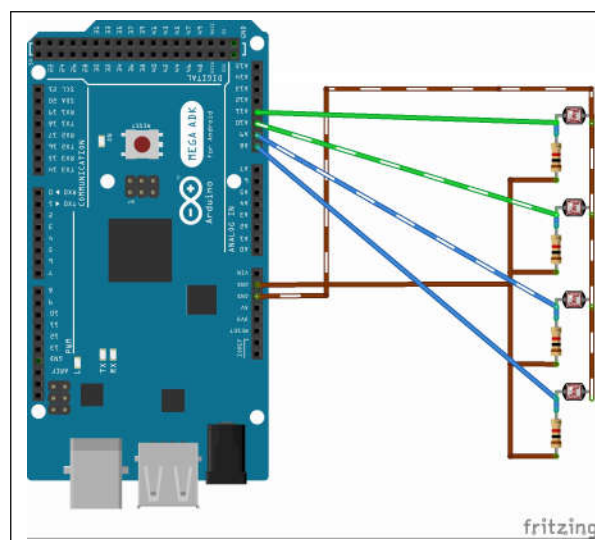
**Figura 37 – Circuito dos sensores de fim de curso.**  
**Fonte: Autoria própria.**



### A.3 SENSORES LDRS

Para verificar o nível de luminosidade o sistema utiliza sensores LDRs. Contudo para que esses sensores possam transmitir os dados ao micro controlador é necessário o uso do circuito mostrado na Figura 38. O Arduino Mega presente no circuito é o bloco Controlador apresentado na Figura 22.

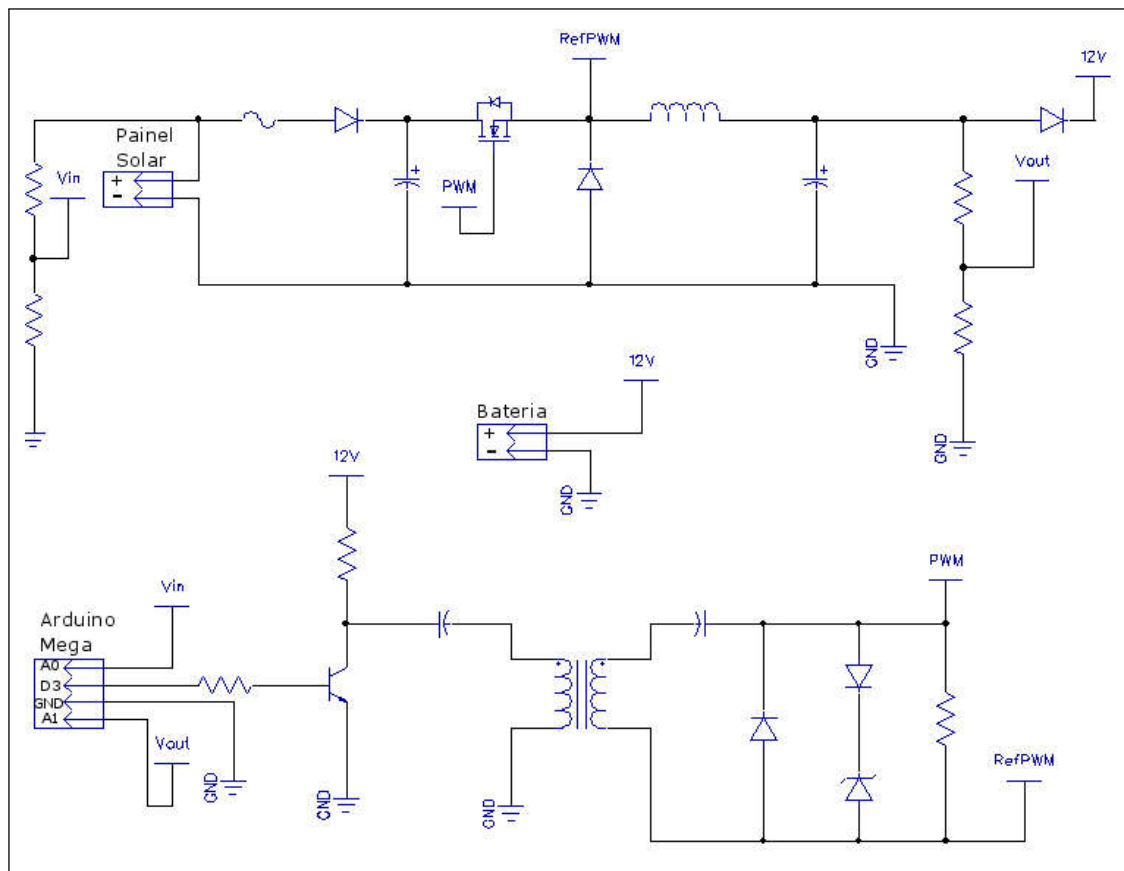
**Figura 38 – Circuito dos sensores LDRs.**  
**Fonte: Autoria própria.**



## APÊNDICE B – CIRCUITOS DO CONVERSOR BUCK

Para realizar o controle do conversor Buck o sistema faz a leitura da tensão de saída do conversor com o auxílio de um circuito divisor de tensão. Por segurança o conversor Buck só deve ser acionado quando a tensão de entrada do conversor for maior que a tensão desejada na saída. Para a leitura da tensão de entrada também é utilizado um circuito divisor de tensão. A Figura 39 mostra o conversor Buck juntamente com os filtros de entrada e saída, os circuitos divisores de tensão necessários para a leitura das tensões de entrada e saída do conversor, e o circuito de acionamento.

**Figura 39 – Circuito do Conversor Buck.**  
**Fonte: Autoria própria.**



A parte inferior da Figura 39 refere-se ao circuito de acionamento do Buck, onde os pinos A0, A1 e D3 descreve os pinos analógicos e digitais do Arduino Mega.