



UNIVERSIDADE
ESTADUAL DE LONDRINA

CENTRO DE TECNOLOGIA E URBANISMO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA DE
CONTROLE ANALÓGICO COM
MOVIMENTO EM DOIS EIXOS APLICADO
EM PAINÉIS SOLARES**

Julio Cesar Guimarães

Londrina – Paraná
2012



UNIVERSIDADE
ESTADUAL DE LONDRINA

CENTRO DE TECNOLOGIA E URBANISMO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA DE CONTROLE ANALÓGICO COM MOVIMENTO EM DOIS EIXOS APLICADO EM PAINÉIS SOLARES

Candidato: Julio Cesar Guimarães

Orientador:

Prof. Dr. Carlos Henrique Gonçalves Treviso

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Estadual de Londrina como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Sistemas Eletrônicos

Especialidade: Eletrônica de Potência

Londrina – Paraná
2012

**Catálogo elaborado pela Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central
da Universidade Estadual de Londrina.**

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

G963i Guimarães, Julio Cesar.
Implementação de um sistema de controle analógico com movimento em dois eixos aplicado em painéis solares / Julio Cesar Guimarães. – Londrina, 2012.
96 f. : il.

Orientador: Carlos Henrique Gonçalves Treviso.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) –
Universidade Estadual de Londrina, Centro de Tecnologia e
Urbanismo, Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Elétrica, 2012.
Inclui bibliografia e anexos.

1. Sistemas eletrônicos analógicos – Teses. 2. Eletrônica de
potência – Teses. 3. Painel solar – Teses. 3. Geração de energia
fotovoltaica – Teses. 5. Engenharia elétrica – Teses. I. Treviso,
Carlos Henrique Gonçalves. II. Universidade Estadual de
Londrina. Centro de Tecnologia e Urbanismo. Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

CDU 621.472

Julio Cesar Guimarães

**Implementação de um Sistema de Controle Analógico
com Movimento em Dois Eixos Aplicado em Painéis
Solares**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Estadual de Londrina como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Carlos Henrique Gonçalves Treviso
UEL - Depto. de Engenharia Elétrica
Orientador

Prof. Dr. Luiz Carlos Gomes de Freitas
UFU – Universidade Federal de Uberlândia

Prof. Dr. Aziz Elias Demian Júnior
UEL - Depto. de Engenharia Elétrica

05 de julho de 2012

Dedico este trabalho aos meus pais.

Agradecimentos

Agradeço a Deus, que me deu força e vontade para superar todos os obstáculos encontrados no caminho até chegar a este momento.

Aos meus pais e aos meus irmãos pelo apoio que sempre me dedicaram durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Carlos Henrique Gonçalves Treviso, por participar diretamente na minha formação científica, pela amizade, empenho e competência que me deram muitos ensinamentos.

Aos técnicos do Departamento de Engenharia Elétrica, que propiciaram e infraestrutura necessária para realização deste trabalho.

Aos colegas de mestrado pelo companheirismo e saudável convivência.

A todos que por ventura não foram mencionados, mas que de forma direta ou indireta colaboraram com este trabalho.

Resumo

A geração de energia elétrica utilizando sistemas fotovoltaicos solares é uma tendência para melhorar a eficiência energética. Seguindo esta tendência, este trabalho mostra o projeto de um sistema eletrônico analógico para posicionamento de painéis solares em dois eixos. O sistema proposto é apto para operar por uma lógica de controle por modulação da largura de pulso (PWM) para inversores em ponte completa, acoplados a dois motores, que mantém o sistema fotovoltaico posicionado perpendicularmente ao Sol durante todo o período ensolarado, aumentando o aproveitamento da energia incidente. A fim de ilustrar o princípio de operação deste sistema, um estudo detalhado, incluindo simulações e resultados experimentais, é mostrado nos capítulos deste trabalho. A validade deste sistema é garantida pelos resultados obtidos.

Palavras-chave: painel solar, circuito de controle, energia fotovoltaica, conversão de energia.

Abstract

Electrical energy generation using solar photovoltaic systems is a trend to increase the energy efficiency. Following this trend, this work presents a project of an analog electronic system to drive a sun-tracking device to position solar photovoltaic panel. The system proposed is able to operate with a pulse-width-modulation (PWM) circuit control to full bridge inverters that are connected with two motors that will keep the photovoltaic system oriented directly to the sun during all sunny period. In order to illustrate the operational principle of this system, a detailed study, including simulation and experimental results is carried out. The validity of this system is guaranteed by the obtained results.

Key-words: solar panel, sun tracker, photovoltaic energy, energy conversion.

Sumário

Lista de Figuras	v
Lista de Tabelas	vii
Lista de Abreviaturas	viii
Introdução	16
1 Conversão de Energia Luminosa em Energia Elétrica	22
1.1 Introdução.....	22
1.2 Células Fotovoltaicas.....	23
1.2.1 Silício Cristalino (c-Si).....	23
1.2.2 Silício Amorfo Hidrogenado (a-Si).....	24
1.2.3 Telureto de Cadmio (CdTe).....	24
1.2.4 Disseleneto de Cobre e Índio (CuInSe ₂).....	25
1.3 Módulos Fotovoltaicos.....	25
1.3.1 Características Elétricas dos Módulos Fotovoltaicos.....	25
1.4 Sistemas Fotovoltaicos para Geração de Energia Elétrica.....	31
1.4.1 Sistemas Isolados.....	31
1.4.2 Sistemas Híbridos.....	32
1.4.3 Sistemas Interligados à Rede.....	33
1.5 Orientação do Módulo Fotovoltaico.....	33
1.6 Considerações Finais.....	35
2 Sistema de Controle Analógico	36
2.1 Introdução.....	36
2.2 Diagrama de Blocos.....	36
2.2.1 Sensores LDR (<i>light dependent resistor</i>).....	38
2.2.2 Sinal PWM (<i>pulse width modulation</i>).....	39
2.3 Funcionamento do Circuito de Controle dos Eixos.....	40
2.4 Conversor Flyback.....	45

2.5 Considerações Finais.....	45
3 Circuito de Potência para Acionamento dos Motores	46
3.1 Introdução.....	46
3.2 Inversor Monofásico.....	46
3.2.1 Funcionamento do Inversor.....	46
3.3 Semicondutores.....	48
3.4 Snnubers.....	49
3.5 Funcionamento do Inversor com Filtro de Saída.....	50
3.6 O Motor de Corrente Contínua.....	52
3.6.1 Estrutura.....	52
3.6.2 Funcionamento do Motor CC.....	53
3.6.3 Controle de Velocidade.....	54
3.7 Testes Realizados.....	56
3.7.1 Tensão na Carga com Sinal de Razão Cíclica de 50%.....	56
3.7.2 Tensão na Carga com Sinal de Razão Cíclica de 75%.....	58
3.8 Considerações Finais.....	59
4 Estrutura Mecânica	60
4.1 Introdução.....	60
4.2 Projeto da Estrutura Mecânica.....	60
4.3 Considerações Finais.....	63
5 Procedimentos de Projeto	64
5.1 Dimensionamento do Inversor para Acionamento dos Motores.....	64
5.1.1 Dimensionamento do Indutor.....	60
5.2 Dimensionamento dos Circuitos para Isolamento dos Pulsos (<i>Drives</i>).....	66
5.3 Dimensionamento do Conversor <i>Flyback</i>	73
5.4 Considerações Finais.....	77
6 Simulações, Coleta de Dados e Resultados	78
6.1 Introdução.....	78
6.2 Configuração do Sistema Fotovoltaico.....	78
6.2.1 Características do Módulo Fotovoltaico.....	78

6.2.2 Controlador de Carga.....	79
6.2.3 Interface de Comunicação.....	80
6.3 Operação do Sistema.....	81
6.4 Resultados Obtidos.....	81
6.5 Considerações Finais.....	82
7 Conclusão e Trabalhos Futuros	84
Referências	86
Anexo A – Circuito de controle de posição	89
Anexo B – Circuito limitador de luminosidade	90
Anexo C – Circuitos auxiliares	91
Anexo D – Circuito para isolamento dos pulsos (<i>drives</i>)	92
Anexo E – Circuito das fontes independentes para isolação dos pulsos	93
Anexo F – Circuito de controle do conversor <i>flyback</i>	94
Anexo G – Circuito do conversor <i>flyback</i>	95
Anexo H – Artigo relacionado ao trabalho publicado em congresso	96

Lista de Figuras

- Figura 1: Matriz energética primária (a), matriz energética de eletricidade (b).
- Figura 2: Atlas solarimétrico da Alemanha (a), atlas solarimétrico do Brasil (b).
- Figura 1.1: Efeito fotovoltaico.
- Figura 1.2: Painéis solares fotovoltaicos de c-Si de várias potências comercialmente disponíveis. [Fonte: SIEMENS Solar Industries].
- Figura 1.3: Conexão de células fotovoltaicas em paralelo.
- Figura 1.4: Conexão de células fotovoltaicas em série.
- Figura 1.5: Ligações possíveis para um diodo *bypass* entre células.
- Figura 1.6: Diodo de bloqueio.
- Figura 1.7: Curva dos parâmetros de potência máxima. Fonte: ISOFOTON – fabricante de módulos fotovoltaicos.
- Figura 1.8: Variação do MPPT com a radiação solar incidente (a) e com a carga (b).
- Figura 1.9: Curva característica corrente x tensão do módulo fotovoltaico em função da radiação solar incidente. [Fonte: ISOFOTON – fabricante de módulos fotovoltaicos].
- Figura 1.10: Curva característica corrente x tensão do módulo fotovoltaico em função da temperatura. [Fonte: ISOFOTON – fabricante de módulos fotovoltaicos].
- Figura 1.11: Curva característica potência x tensão do módulo fotovoltaico em função da radiação solar incidente. [Fonte: ISOFOTON – fabricante de módulos fotovoltaicos].
- Figura 1.12: Curva característica potência x tensão do módulo fotovoltaico em função da temperatura. [Fonte: ISOFOTON – fabricante de módulos fotovoltaicos].
- Figura 1.13: Configuração típica de um sistema fotovoltaico.
- Figura 1.14: Sistema fotovoltaico isolado.
- Figura 1.15: Topologia típica de um sistema híbrido.
- Figura 1.16: Topologia de sistema fotovoltaico interligado à rede.
- Figura 2.1: Diagrama de blocos do circuito de controle.
- Figura 2.2: Comportamento de saída do comparador PWM.
- Figura 2.3: Sensores LDR's separados pelo anteparo.
- Figura 2.4: Sensores LDR's instalados sobre a superfície do módulo fotovoltaico.
- Figura 2.5: Sinal PWM comparado com a onda triangular e os pulsos resultantes nas chaves do inversor monofásico.
- Figura 2.6 (a) e (b): Circuito para obtenção dos pulsos para controle do inversor.

Figura 2.7: Circuito limitador de luminosidade.

Figura 2.8: Pulsos complementares gerados pelo circuito de controle.

Figura 2.9: Forma de onda resultante dos pulsos complementares.

Figura 2.10: Montagem do circuito de controle junto à estrutura mecânica.

Figura 3.1: Esquema elementar do inversor.

Figura 3.2: Formas de onda e tensão para o inversor.

Figura 3.3: Circuito do inversor monofásico em ponte completa.

Figura 3.4: *Snubber* dissipativo convencional para um transistor.

Figura 3.5: Formas de onda de tensão e corrente na saída do inversor.

Figura 3.6: Inversor com filtro LC.

Figura 3.7: Filtro LC utilizado no inversor.

Figura 3.8: Filtros equivalentes – (a) e (b) possuem as mesmas características de funcionamento.

Figura 3.9: Funcionamento de um motor CC.

Figura 3.10: Esquema equivalente do motor CC.

Figura 3.11: Motor CC utilizado no projeto.

Figura 3.12: Tensão na carga com sinal de entrada de 12,5 kHz e $D = 50\%$.

Figura 3.13: Tensão na carga com sinal de entrada de 25 kHz e $D = 50\%$.

Figura 3.14: Tensão na carga com sinal de entrada de 12,5 kHz e $D = 75\%$.

Figura 3.15: Tensão na carga com sinal de entrada de 25 kHz e $D = 75\%$.

Figura 4.1: Estrutura de madeira para ensaios em laboratório.

Figura 4.2: Esquema de acoplamento da rosca sem fim no motor e na cremalheira.

Figura 4.3: Estrutura para posicionamento do painel solar.

Figura 4.4: Estrutura para posicionamento do painel solar com espelhos concentradores.

Figura 4.5: acoplamento do motor para controlar a inclinação.

Figura 4.6: acoplamento do motor para controlar o giro.

Figura 5.1: Circuito do *drive* para isolação dos pulsos.

Figura 5.2: Formas de onda na saída do opto acoplador e nos *gates* dos semicondutores do inversor.

Figura 5.3: Transformador do *drive* isolador de pulsos.

Figura 5.4: Curva de histerese de um núcleo de ferrite.

Figura 5.5: Circuito das fontes independentes.

Figura 5.6: Trajeto percorrido pela corrente durante a magnetização do núcleo.

Figura 5.7 – (a) Conversor Flyback, (b) Circuito T_{on} , (c) Circuito T_{off} .

Figura 6.1: Controlador de carga Phocos.

Figura 6.2: Configuração do sistema fotovoltaico.

Lista de Tabelas

Tabela 5.1: Tamanhos de núcleos EE.

Tabela 6.1: Resultados obtidos nas coletas de dados realizadas.

Lista de Abreviaturas

AC – Alternate Current

a-Si:H – Silício Amorfo Hidrogenado

CA – Corrente alternada

CC – Corrente contínua

CMOS – Complementary Metal Oxide Semiconductor

CO – Monóxido de carbono

CO₂ – Dióxido de carbono

c-Si – Silício Cristalino

DC – Direct Current

dB/dec – Decibel por década

Hz – Hertz

mH – mili Henri

mT – mili Tesla

μH – micro Henri

kWh – Kilo Watt hora

LDR – Light Dependent Resistor

mm – milímetro

MOSFET – Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor

PROINFA – Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica

PWM – Pulse Width Modulation

MPPT – Maximum Power Point Tracking

Wp – Watt pico

Ω – Ohm

Introdução

O aumento do consumo de energia decorrente de fatores como o progresso tecnológico e o avanço no desenvolvimento humano (caracterizado por parâmetros sócio-econômicos) são apontados como os fatores mais importantes na aceleração das alterações climáticas e ambientais observadas e descritas pela comunidade científica. O crescimento do consumo de energia mais que triplicou após a Revolução Industrial e estudos recentes mostram uma tendência de crescimento de demanda energética em consequência da recuperação econômica nos países em desenvolvimento. A tendência de crescimento atual indica que, na segunda década deste século, o consumo de energia nos países desenvolvidos seja ultrapassado pelo consumo nos países em desenvolvimento em virtude da melhoria dos parâmetros sócio-econômicos nesses países [1]. Fatores como o aumento da demanda energética em conjunto com a possibilidade de redução da oferta de combustíveis convencionais, aliados à crescente preocupação com a preservação do meio ambiente, estão impulsionando a comunidade científica a pesquisar e desenvolver fontes alternativas de energia menos poluentes, renováveis e que produzam menor impacto ambiental.

A matriz brasileira de oferta de energia primária, mostrada na figura 1a, demonstra que a queima de combustíveis fósseis responde por grande parte da demanda de energia no setor de transporte e atende a cerca de 40% da energia utilizada no setor agropecuário o que resulta em uma grande contribuição para emissão de gases do efeito estufa (CO₂, CO, etc.) no Brasil.

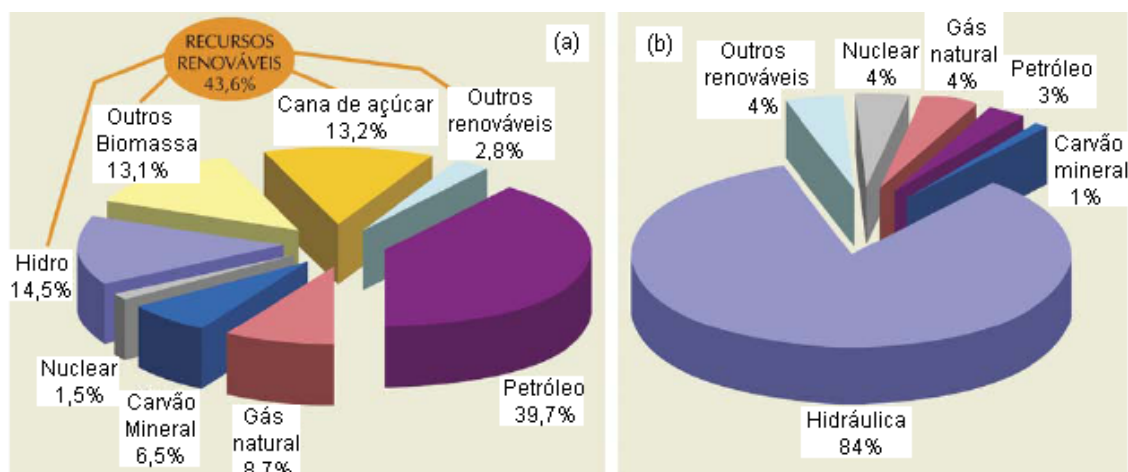


Figura 1: matriz energética primária (a), matriz energética de eletricidade (b).

Programas de incentivo para adoção da queima de biomassa (etanol e biodiesel) estão em implantação no país [2] e espera-se que em um futuro próximo, a biomassa contribua significativamente nestes setores, reduzindo a contribuição brasileira para a emissão global de gases de efeito estufa.

Atualmente, a energia hidráulica é a principal fonte de energia para a geração de eletricidade, conforme mostra a matriz de produção de eletricidade, ilustrada na figura 1b. Apesar de considerada uma fonte renovável e limpa, as usinas hidroelétricas produzem um impacto ambiental ainda não adequadamente avaliado, devido ao alagamento de grandes áreas [3]. Além disso, as principais bacias hidrográficas brasileiras com capacidade de geração hidroelétrica de alta densidade energética já estão praticamente esgotadas nos principais centros consumidores do país.

A energia nuclear é citada como uma fonte “limpa” de energia elétrica por não provocar a emissão de gases para a atmosfera. Sob o ponto de vista do desenvolvimento, é uma alternativa para cobrir o déficit de energia, diversificar as fontes de energia nacionais e viabilizar o programa nuclear brasileiro. O país conta com a sexta maior reserva de urânio do mundo e apenas 25% do território nacional foram mapeados. Contudo, a energia nuclear não tem sido bem aceita pela sociedade civil em razão do questionamento sobre os riscos associados ao problema do armazenamento dos rejeitos radioativos gerados.

Dentre as fontes renováveis de energia elétrica, a energia eólica é a que vem recebendo maior volume de investimentos por conta do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA – <http://www.mme.gov.br/>), coordenado pelo Ministério de Minas e Energia. A capacitação tecnológica da indústria nacional e o custo decrescente da eletricidade de origem eólica, quando associados ao enorme potencial eólico nacional (143,5 GW) [4], indicam que essa forma de geração poderá ocupar, em médio prazo, um importante papel no país, principalmente atuando como fonte descentralizada e complementar de energia acoplada à rede elétrica. No entanto, boa parte do território brasileiro, incluindo praticamente toda a região amazônica e central do Brasil, não apresenta condição de vento adequada para geração de eletricidade.

Pelo fato de estar localizado na sua maior parte na região tropical, o Brasil possui grande potencial para aproveitamento da energia solar durante todo ano [5, 6]. A utilização da energia solar traz benefícios em longo prazo para o país, viabilizando o desenvolvimento de regiões remotas onde o custo da eletrificação pela rede

convencional é demasiadamente alto com relação ao retorno financeiro do investimento, regulando a oferta de energia em períodos de estiagem, diminuindo a dependência do mercado de petróleo e reduzindo a emissão de gases poluentes à atmosfera como estabelece a Conferência de Kyoto [7]. Existem muitas possibilidades em médio e em longo prazo para aproveitamento dessa forma de energia renovável, que vai desde pequenos sistemas fotovoltaicos a até grandes centrais que empregam energia solar concentrada, ou a sistemas de produção de hidrogênio para utilização em células de combustível para a produção de trabalho com emissão zero de CO₂. No entanto, hoje em dia essa energia ainda tem uma participação incipiente na matriz energética brasileira. Apenas a energia solar térmica para aquecimento de água tem despertado interesse no mercado nacional.

Atualmente, um dos países que possui um ótimo programa de incentivo e também tecnologias para aproveitamento de energia solar é a Alemanha [8]. O programa alemão de incentivo às energias renováveis é baseado na obrigatoriedade de compra pela operadora de rede de toda a energia gerada pelas fontes renováveis, pagando ao gerador uma tarifa prêmio que é distinta para cada tecnologia. Os recursos captados por meio de um pequeno acréscimo na tarifa de todos os consumidores são depositados em um fundo, utilizado para reembolsar (na forma de tarifa prêmio) os consumidores que tenham instalado os sistemas fotovoltaicos. Neste caso, o incentivo é pago gradualmente, como um prêmio por kWh ao longo de vários anos, permitindo que os consumidores recuperem seu investimento.

Comparando os valores da média anual da radiação solar global incidente no plano horizontal da Alemanha com o Brasil, mostrados na figura 2, é possível verificar que mesmo a região da Alemanha mais favorecida, em termos de radiação solar, apresenta aproximadamente 1,4 vezes menos radiação do que a região brasileira menos ensolarada.

O Brasil possui excelentes níveis de radiação solar, pois está localizado em uma faixa de latitude na qual a incidência de radiação solar é muito superior à verificada no restante do mundo. Essa característica coloca o país em vantagem com relação aos países industrializados no que tange à utilização da energia solar fotovoltaica [9].

Algumas regulamentações recentes da ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica incentivam a utilização de energia fotovoltaica como alternativa para geração de energia, estimulando a micro e mini geração distribuída no Brasil. Em 17 de abril de

2012 foi aprovada uma Resolução Normativa que permite os consumidores gerar energia com sistemas convencionais, eólicos e/ou fotovoltaicos.

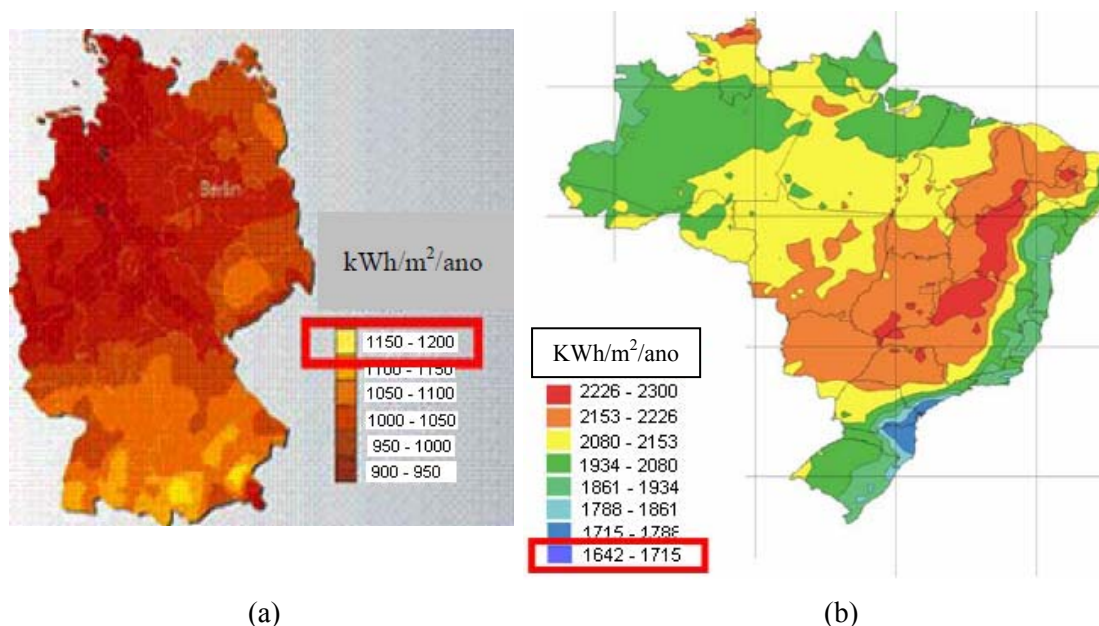


Figura 2: atlas solarimétrico da Alemanha (a), atlas solarimétrico do Brasil (b).

Neste sentido, no município de Tauá, Estado do Ceará, foi implantado o projeto da Central Geradora Solar Fotovoltaica Tauá [10], cujo projeto é de iniciativa privada em parceria com o Governo do Estado do Ceará. A central utilizará a radiação solar disponível na localidade para a geração de energia com capacidade instalada total de 50 MW por meio da utilização de painéis fotovoltaicos, sendo 5 MW correspondentes à primeira etapa de instalação e os 45 MW restantes correspondentes à segunda etapa. Cada painel fotovoltaico tem potência de 140 W a 230 W e a ligação entre eles resultará em 45 MW.

Observa-se que em países tropicais como o Brasil, a utilização da energia solar é viável em praticamente todo o território, em locais distantes dos centros de produção energética, sendo que sua utilização contribui para a redução da demanda energética nestes e, conseqüentemente, da perda de energia que ocorreria no sistema de transmissão [11].

Atualmente, o custo de sistemas fotovoltaicos para geração de energia elétrica é o principal fator que define a opção por outras fontes geradoras. Um sistema fotovoltaico não produz lixo tóxico, não polui o meio ambiente e não envolve impacto ambiental ou social. Assim, a justificativa para o desenvolvimento deste trabalho é a grande expectativa pela redução do custo de fabricação das células solares, projetado para algo abaixo dos US\$ 0,40/Watt contra os atuais US\$ 4,00/Watt [12].

Neste contexto, observa-se um aumento do interesse em pesquisas por tecnologias fotovoltaicas, graças aos novos incentivos governamentais para o desenvolvimento da geração de energia utilizando esta fonte renovável.

O presente trabalho tem por objetivo desenvolver e implementar um sistema de controle analógico com movimento em dois eixos aplicado em painéis fotovoltaicos, apresentando resultados obtidos por meio de simulações em laboratório do circuito de controle e do sistema completo de geração fotovoltaica de energia elétrica.

Os objetivos gerais deste trabalho são:

1 - analisar a viabilidade da utilização de sistemas de conversão de energia luminosa em energia elétrica, para instalações de pequeno porte;

2 – desenvolver um sistema fotovoltaico em laboratório para realização de simulações e obtenção de resultados para avaliação da eficiência energética do mesmo.

Os objetivos específicos são:

1 – desenvolver um sistema de controle de posição para um painel solar, por meio da utilização de uma lógica de controle PWM para inversor em ponte H, acoplado a dois motores para posicionamento em dois eixos, permitindo que o painel permaneça posicionado perpendicularmente ao Sol;

2 – analisar a viabilidade técnica do sistema considerando a facilidade de manutenção, utilização de componentes e sistemas disponíveis no mercado nacional;

3 – avaliar a eficiência energética do sistema para aplicações em instalações de pequeno porte.

Para alcançar estes objetivos, este trabalho está dividido da seguinte forma:

- Capítulo 1: são apresentadas as tecnologias para conversão da luz em energia elétrica, características das células fotovoltaicas, dos sistemas e parâmetros para implantação de sistemas fotovoltaicos.
- Capítulo 2: é demonstrado o sistema de controle adotado com suas características.
- Capítulo 3: apresenta-se o desenvolvimento dos circuitos de controle de potência utilizados para acionamento dos motores.
- Capítulo 4: neste capítulo demonstra-se o desenvolvimento da estrutura mecânica utilizada para posicionamento do painel solar.
- Capítulo 5: aborda os critérios e procedimentos de projetos adotados.
- Capítulo 6: são apresentadas as simulações realizadas e os resultados obtidos.

- Capítulo 7: conclusão e trabalhos futuros.
- Referências.
- Anexo A – Circuito de controle de posição.
- Anexo B – Circuito limitador de luminosidade.
- Anexo C – Circuitos auxiliares.
- Anexo D – Circuitos para isolamento dos pulsos (*drives*).
- Anexo E – Circuito das fontes independentes para isolação dos pulsos.
- Anexo F – Circuito de controle do conversor *flyback*.
- Anexo G – Circuito do conversor *flyback*.
- Anexo H – Artigo relacionado ao trabalho publicado em congresso.

Capítulo 1

Conversão de Energia Luminosa em Energia Elétrica

1.1 Introdução

A energia solar fotovoltaica é a energia da conversão direta da luz em eletricidade, denominado de efeito fotovoltaico. O efeito fotovoltaico, ilustrado na figura 1.1, é o aparecimento de uma diferença de potencial nos extremos de uma estrutura de um material semiconductor, produzida pela absorção da luz [11].

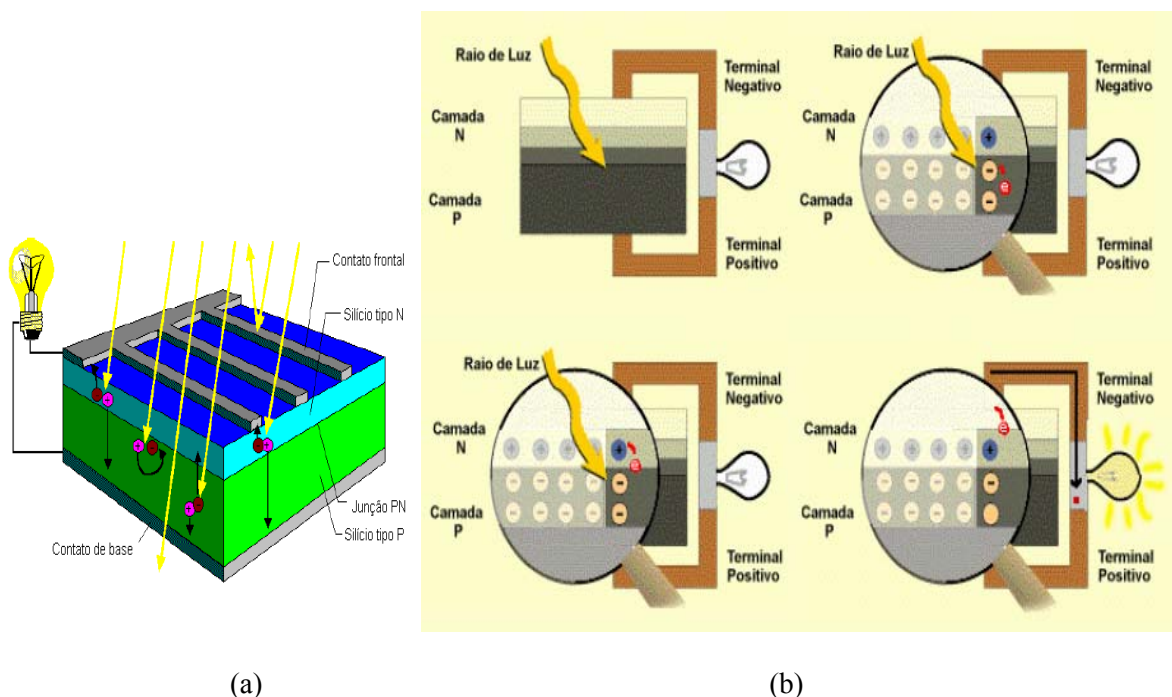


Figura 1.1: Efeito fotovoltaico.

Os materiais semicondutores utilizados para fabricação da célula fotovoltaica, o tipo de conexão e o número de células associadas são os fatores que influenciam na obtenção da potência que um módulo ou painel fotovoltaico pode gerar.

Neste capítulo serão apresentadas as topologias dos sistemas fotovoltaicos de geração de energia elétrica, as características dos módulos fotovoltaicos, os tipos de células fotovoltaicas e critérios de projetos de sistemas fotovoltaicos.

1.2 – Células Fotovoltaicas

Os maiores empecilhos na utilização de células fotovoltaicas são seu alto custo e baixo rendimento. A tecnologia atual de fabricação necessita de muita energia para que seja obtido material em estado muito puro, exigido na confecção das células, e no final obtêm-se painéis com aproximadamente 15% de rendimento apenas. Para um painel com 25 anos de vida útil, considerando o desgaste e manutenção do sistema, o kilowatt/hora custa, em média, R\$1,50 reais, contra os R\$0,40 o kilowatt/hora da energia produzida pelas usinas [13]. Projeções esperam que apenas em 2013 o preço da energia fotovoltaica se iguale ao da energia convencional, mas somente nas regiões brasileiras com maior incidência solar [14]. Por este motivo, é necessário buscar alternativas para tornar viável a utilização de células solares.

Dentre os diversos semicondutores utilizados para a produção de células solares fotovoltaicas, destacam-se por ordem decrescente de maturidade e utilização: o silício cristalino (c-Si); o silício amorfo hidrogenado (a-Si:H) ou simplesmente a-Si; o telureto de cádmio CdTe e os compostos relacionados ao disseleneto de cobre e índio CuInSe₂ ou CIS e ao disseleneto de cobre, gálio e índio CuInGaSe₂ ou CIGS. Neste último grupo, aparecem elementos que são altamente tóxicos (Cd, Se, Te) ou muito raros (Ga, Te, Se, In, Cd), ou ambos, o que se mostrou inicialmente um obstáculo considerável ao uso mais intensivo destas tecnologias. O silício é o segundo elemento mais abundante na superfície do planeta (mais de 25% da crosta terrestre é silício [15] e cem vezes menos tóxico que os outros elementos citados [16]).

1.2.1 – Silício Cristalino (c-Si)

A mais tradicional das tecnologias fotovoltaicas e a que ainda hoje apresenta maior escala de produção a nível comercial, o c-Si consolidou-se no mercado fotovoltaico internacional por sua extrema robustez e confiabilidade. O custo de produção destes painéis solares é, no entanto, elevado, razão pela qual esta tecnologia não é considerada por muitos analistas como séria competidora com as formas convencionais de geração de energia em larga escala. No entanto, o c-Si segue sendo o líder dentre as tecnologias fotovoltaicas para aplicações terrestres em qualquer escala. A figura 1.2 mostra módulos fotovoltaicos de c-Si.

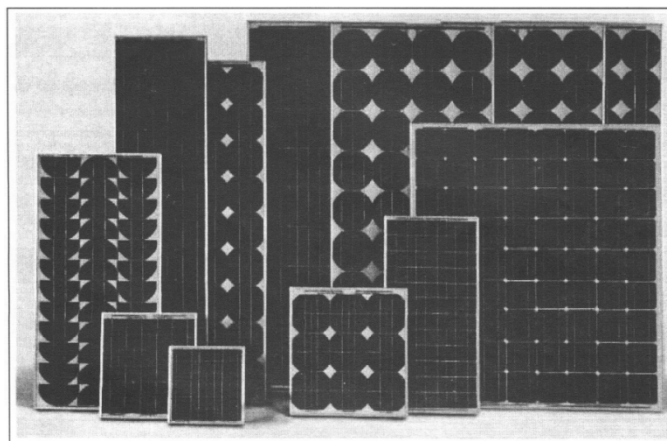


Figura 1.2: Painéis solares fotovoltaicos de c-Si de várias potências comercialmente disponíveis. [Fonte: SIEMENS Solar Industries]

O recorde de eficiência para células de c-Si, testadas em laboratório, é atualmente de 24,7% [18], muito próximo do máximo rendimento teórico. Os melhores painéis disponíveis no mercado, porém, têm eficiência em torno de 15%, pois as diferenças entre a eficiência da melhor célula de laboratório e painéis comerciais incluem perdas de interconexão entre células no painel, área ativa do painel e rendimento do processo produtivo.

1.2.2 – Silício Amorfo Hidrogenado (a-Si)

No início dos anos 80 o a-Si era visto como a única tecnologia fotovoltaica comercialmente viável em filmes finos (películas delgadas). Tendo primeiramente sido empregado em células solares, em meados da década de 70, imediatamente despontou como tecnologia ideal para aplicação em calculadoras, relógios e outros produtos onde o consumo elétrico é baixo. Por apresentar uma resposta espectral mais voltada para o azul, tais células se mostraram extremamente eficientes sob iluminação artificial, principalmente sob lâmpadas fluorescentes.

1.2.3 – Telureto de Cadmio (CdTe)

O mais recente competidor de c-Si e a-Si no mercado fotovoltaico para geração de potência é o CdTe, também na forma de filmes finos. Para aplicações em calculadoras este material já vem sendo usado há quase uma década, mas nas chamadas aplicações terrestres, somente na última década é que começaram a ser comercializados painéis solares de grandes áreas (o maior disponível atualmente tem uma área aproximada de 0,67m²).

Os custos de produção do CdTe são relativamente baixos para produção em grande escala e esta tecnologia tende a despontar como um competidor no mercado fotovoltaico para geração de energia elétrica. A relativamente baixa abundância dos elementos envolvidos e sua toxicidade são aspectos que têm de ser levados em conta, principalmente se esta tecnologia atingir quantidades significativas de produção.

O recorde de eficiência de células individuais de pequenas áreas foi, em laboratório, ao redor de 16%, sendo que painéis solares encontrados no mercado internacional apresentam eficiência entre 7 e 9% [18].

1.2.4 – Disseleneto de Cobre e Índio (CuInSe₂)

Outro competidor no mercado fotovoltaico, são os compostos baseados no disseleneto de cobre e índio (CuInSe₂ ou CIS) e disseleneto de cobre, gálio e índio (CuInGaSe₂ ou CIGS), principalmente por seu potencial de atingir eficiências relativamente elevadas e custos de produção relativamente baixos [19].

Células de CIS de pequenas áreas produzidas em laboratório apresentam no momento eficiências em torno de 18%. Painéis de grande área (aproximadamente 1m²) já se encontrem disponíveis no mercado com eficiência entre 9 e 10%.

1.3 – Módulos Fotovoltaicos

Devido à baixa tensão e corrente de saída em uma célula fotovoltaica, agrupam-se várias células formando um módulo. O arranjo das células nos módulos pode ser feito conectando-se em série ou em paralelo.

Ao conectar as células em paralelo, conforme mostrado na figura 1.3, somam-se as correntes de cada módulo e a tensão é exatamente a tensão de saída da célula. A corrente produzida pelo efeito fotovoltaico é contínua. Pelas características típicas das células (corrente máxima de aproximadamente 3A e tensão muito baixa, em torno de 0,7V) este arranjo não é utilizado, salvo em condições especiais, como por exemplo, em pequenas aplicações como dispositivos eletrônicos (relógios, calculadoras, etc.).

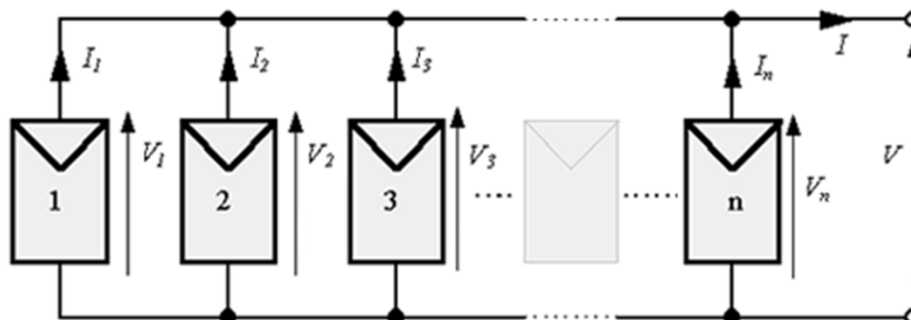


Figura 1.3: Conexão de células fotovoltaicas em paralelo.

A conexão mais comum de células fotovoltaicas é em série, pois nesta configuração soma-se a tensão de cada célula chegando a um valor final de 12 V ou mais (depende das características do módulo) e a corrente permanece com o mesmo valor, evitando que sejam utilizados condutores com elevadas bitolas, como mostra a figura 1.4, possibilitando a carga de acumuladores (baterias) que também operam nesta tensão.

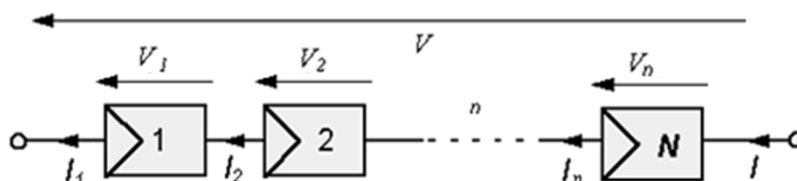


Figura 1.4: Conexão de células fotovoltaicas em série.

Quando uma célula fotovoltaica dentro de um módulo, por algum motivo, estiver encoberta, a potência de saída do módulo reduzirá consideravelmente e, pelo fato de estar ligada em série, comprometerá o funcionamento das demais células no módulo. Para que toda a corrente de um módulo não seja limitada por uma célula de pior desempenho (no caso de estar encoberta), utiliza-se um diodo para criar um circuito alternativo, denominado *bypass*. Este diodo serve como um caminho alternativo para a corrente e limita a dissipação de calor na célula defeituosa. Geralmente o uso do diodo *bypass* é feito em agrupamentos de células, o que reduz custos em relação a configuração de se conectar um diodo em cada célula, conforme mostrado na figura 1.5.

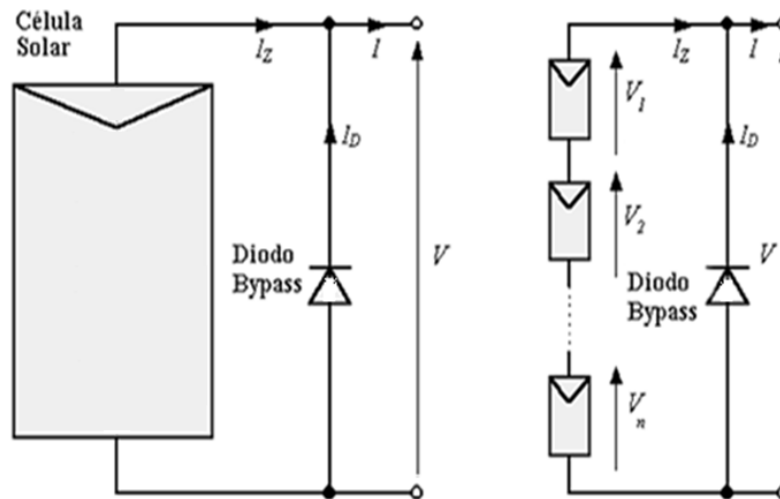


Figura 1.5: Ligações possíveis para um diodo *bypass* entre células.

Um problema que pode ocorrer é a circulação de uma corrente negativa pelas células fotovoltaicas, ou seja, ao invés de gerar corrente, o módulo passa a receber muito mais do que produz. Esta corrente pode causar queda na eficiência das células e, em alguns casos, a célula pode ser desconectada de arranjo causando a perda total do fluxo de potência do módulo. Para evitar isto, utiliza-se um diodo de bloqueio, mostrado na figura 1.6, impedindo assim, correntes reversas que podem ocorrer, caso o módulo seja conectado diretamente a um acumulador ou bateria.

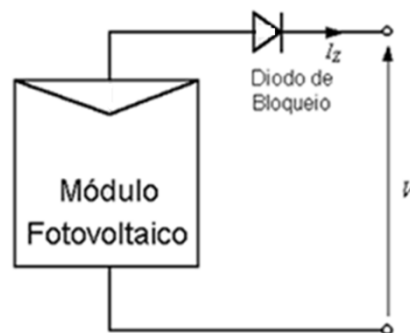


Figura 1.6: Diodo de bloqueio.

1.3.1 – Características Elétricas dos Módulos Fotovoltaicos

A característica de tensão e corrente de saída dos painéis depende da irradiação solar e da temperatura da célula fotovoltaica e estas variações causam flutuações no ponto de máxima potência (MPPT – *Maximum Power Point Tracking*), conforme mostra a figura 1.7. A figura 1.8 (a) e (b) mostra a variação do ponto de máxima potência com a radiação solar e a carga.

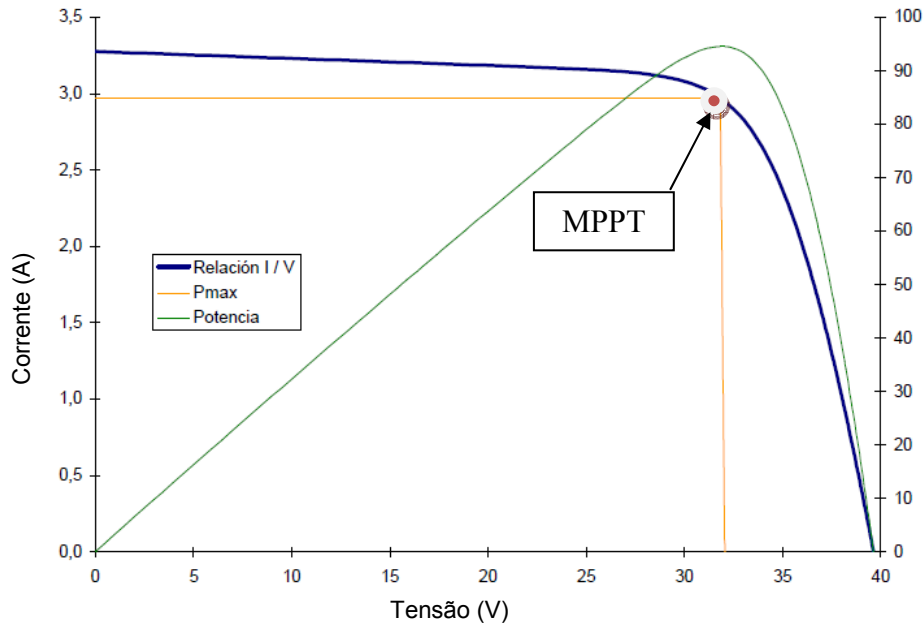


Figura 1.7: Curva dos parâmetros de potência máxima. [Fonte: ISOFOTON – fabricante de módulos fotovoltaicos]

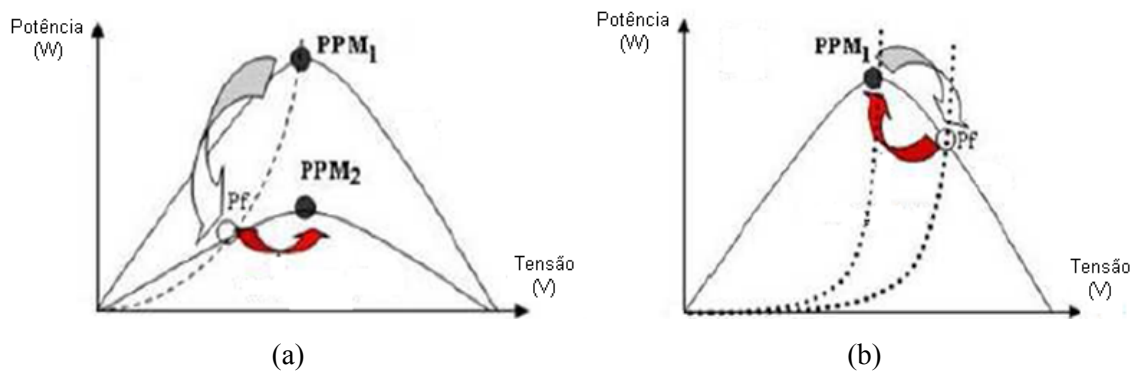


Figura 1.8: Variação do MPPT com a radiação solar incidente (a) e com a carga (b).

Conversores estáticos controlados são alocados entre geradores fotovoltaicos e cargas, com a finalidade de manter o sistema trabalhando no ponto de máxima potência. Visando maximizar a potência fornecida pelo painel fotovoltaico são utilizados circuitos de controle MPPT, os quais possuem como base principal de funcionamento a busca de máxima potência.

Devido à complexidade desse controle, atualmente vários estudos são desenvolvidos no ramo da eletrônica com o objetivo de propor novas configurações de controle do MPPT. Mais informações estão disponíveis em [17].

Além deste parâmetro, há outras características elétricas que melhor definem a funcionalidade do módulo. As principais características elétricas de um módulo fotovoltaico são:

- Tensão de circuito aberto (V_{oc});
- Corrente de curto-circuito (I_{sc});
- Tensão de potência máxima (V_{mp});
- Corrente de potência máxima (I_{mp});
- Potência em Wp (Watt pico).

A unidade de potência Watt pico (Wp), específica da tecnologia solar fotovoltaica, significa que cada Wp instalado deverá transferir 1 W de potência quando o módulo fotovoltaico for submetido às condições normalizadas, que são: radiação solar incidente de 1 kW/m^2 e temperatura das células fotovoltaicas de $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Os fabricantes de módulos fotovoltaicos especificam a eficiência destes para vários valores de radiação solar incidente, uma vez que as condições climáticas causam variações da radiação incidente e, também, para várias temperaturas de trabalho.

Para o correto dimensionamento de um sistema de fotovoltaico, devem ser consideradas as seguintes curvas características do painel solar:

- curvas corrente-tensão ($I \times V$) em função da radiação solar incidente, (figura 1.9) e da temperatura, (figura 1.10);
- curvas potência-tensão ($P \times V$) em função da radiação solar incidente, (figura 1.11), e da temperatura, (figura 1.12).

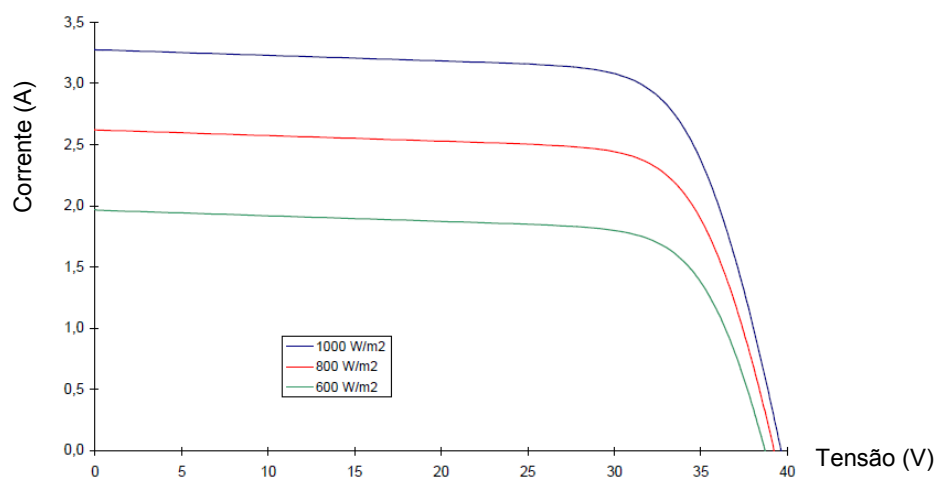


Figura 1.9: Curva característica corrente x tensão do módulo fotovoltaico em função da radiação solar incidente. [Fonte: ISOFOTON – fabricante de módulos fotovoltaicos]

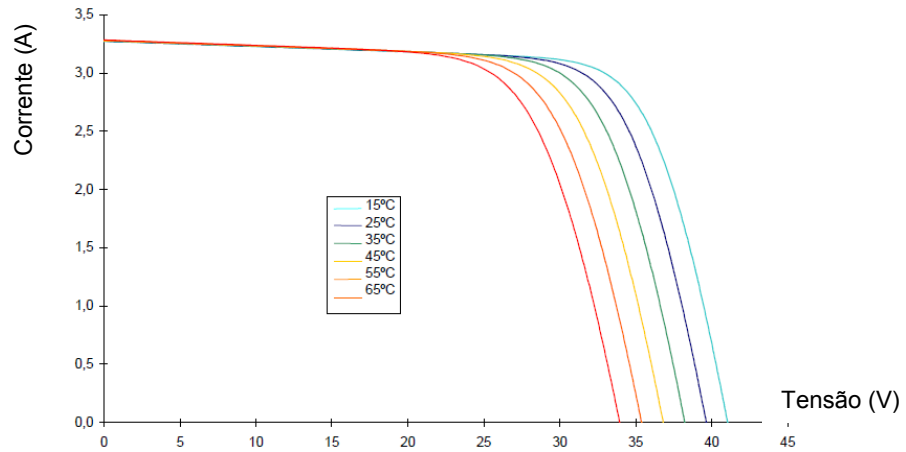


Figura 1.10: Curva característica corrente x tensão do módulo fotovoltaico em função da temperatura.

[Fonte: ISOFOTON – fabricante de módulos fotovoltaicos]

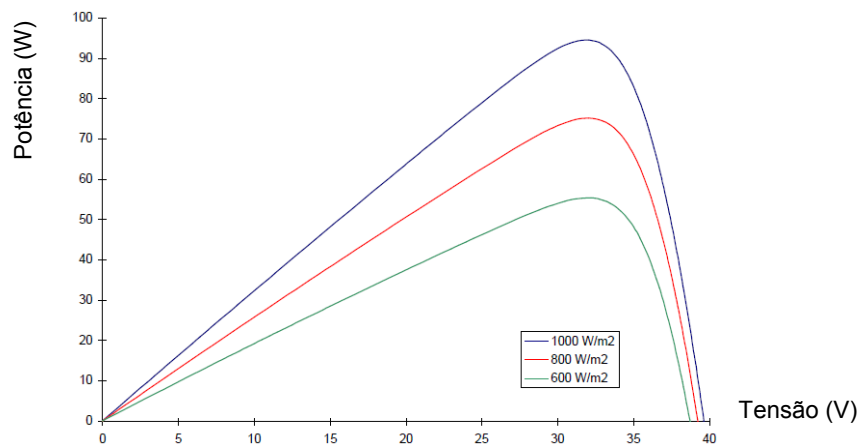


Figura 1.11: Curva característica potência x tensão do módulo fotovoltaico em função da radiação solar incidente. [Fonte: ISOFOTON – fabricante de módulos fotovoltaicos]

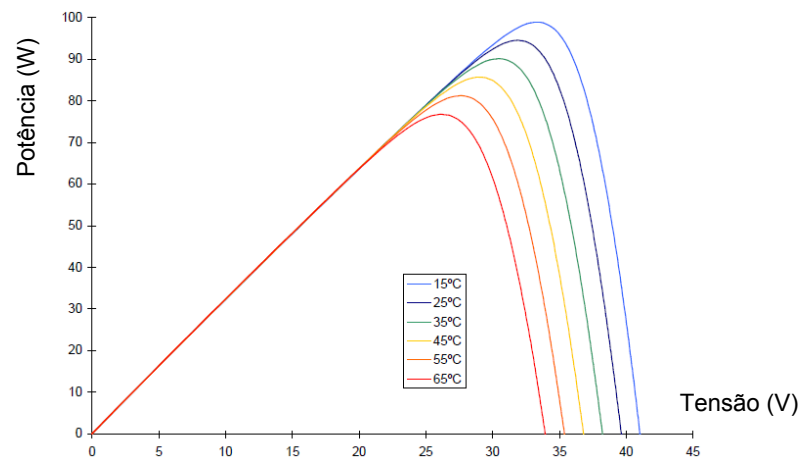


Figura 1.12: Curva característica potência x tensão do módulo fotovoltaico em função da temperatura.

[Fonte: ISOFOTON – fabricante de módulos fotovoltaicos]

1.4 - Sistemas Fotovoltaicos para Geração de Energia Elétrica

Os sistemas fotovoltaicos podem ser classificados em três categorias distintas: sistemas isolados, híbridos e conectados a rede. Os sistemas obedecem a uma configuração básica onde o sistema deverá ter uma unidade de controle de potência e também uma unidade de armazenamento [11], conforme mostrado na figura 1.13.

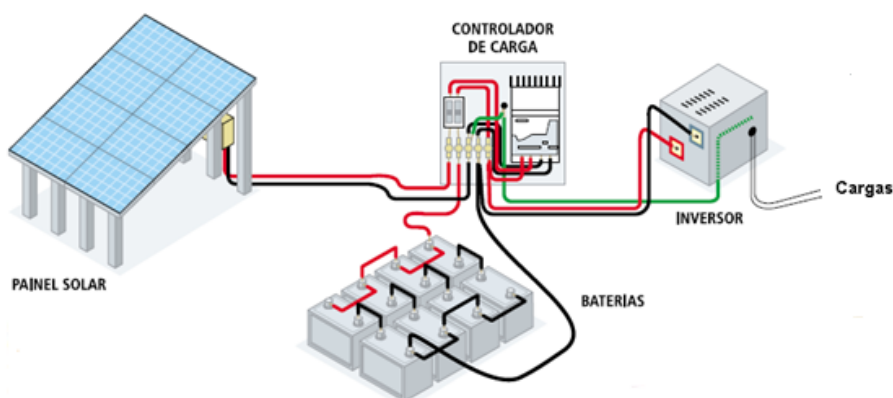


Figura 1.13: Configuração típica de um sistema fotovoltaico.

1.4.1 – Sistemas Isolados

Os sistemas isolados, em geral, são utilizados em locais remotos, como instalações rurais. Pode alimentar cargas em CC, quando o painel fotovoltaico alimenta diretamente a carga, neste caso toda a energia gerada é consumida instantaneamente, sem armazenamento, como por exemplo, a alimentação de bombas d'água. Quando o sistema utiliza armazenamento de energia, este é feito por meio de um banco de baterias, neste caso utiliza-se um controlador de carga que tem a função de não permitir que haja danos nas baterias causados por sobrecarga ou descarga profunda. Além de proteger as baterias o controlador também monitora o consumo de energia das cargas, evitando que o painel fotovoltaico fique sujeito a condições de sobrecargas.

Geralmente, em sistemas fotovoltaicos isolados utiliza-se a configuração mostrada na figura 1.14, pois é freqüente o uso de cargas CA, por isso torna-se indispensável o uso de inversores CC-CA e controladores de carga. Mais informações disponíveis em [28].

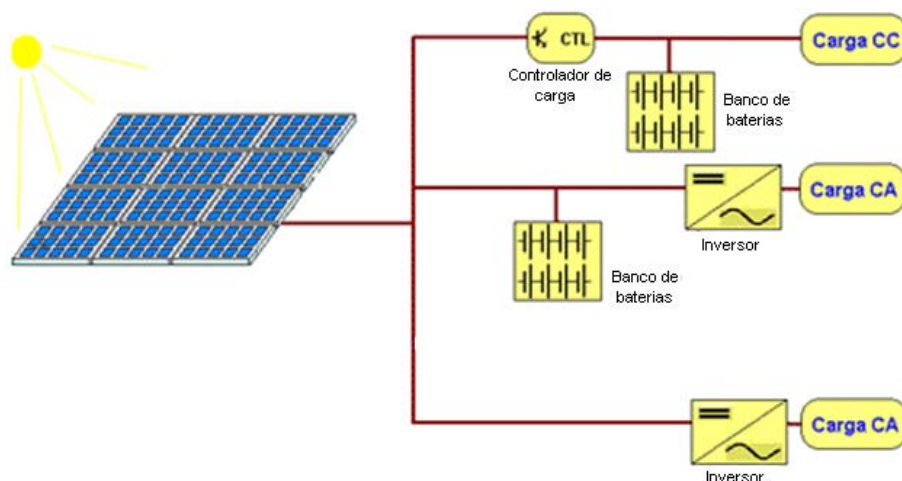


Figura 1.14 – Sistema fotovoltaico isolado.

1.4.2 – Sistemas Híbridos

São sistemas que, desconectados da rede convencional, apresentam várias fontes de geração de energia, como por exemplo: turbinas eólicas, geração a *diesel*, módulos fotovoltaicos entre outras, conforme mostra a figura 1.15. A utilização de várias formas de energia elétrica torna-se complexo na necessidade de otimizar o controle da transferência da energia gerada. É necessário um controle de todas as fontes para que haja máxima eficiência na transferência da energia para a carga.

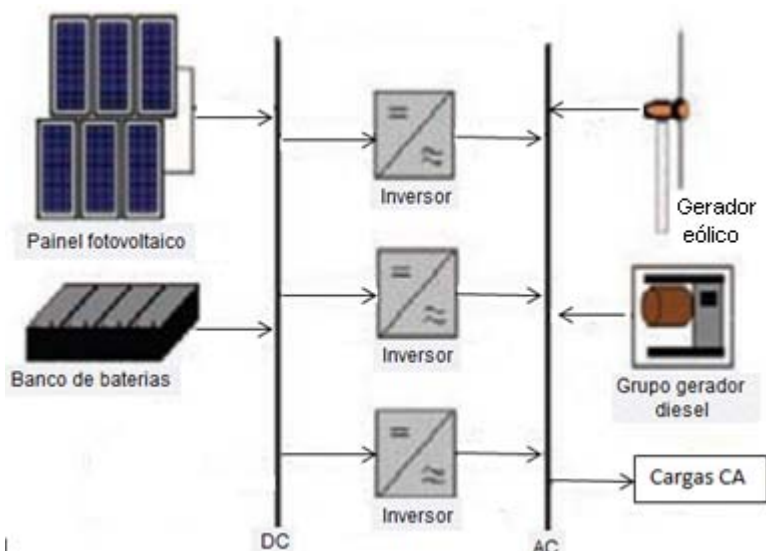


Figura 1.15: Topologia típica de um sistema híbrido.

Geralmente, os sistemas híbridos são empregados para sistemas de médio a grande porte vindo a atender um número maior de usuários. Por trabalhar com cargas de corrente contínua, o sistema híbrido também apresenta um inversor. Devido à grande

complexidade de arranjos e à multiplicidade de opções, a forma de otimizar o sistema torna-se um estudo particular para cada caso.

1.4.3 – Sistemas Interligados à Rede

Estes sistemas utilizam vários painéis fotovoltaicos e não armazenam energia, pois toda a geração é entregue diretamente na rede. Este sistema representa uma fonte complementar ao sistema elétrico de grande porte ao qual está conectado. Todo o arranjo é conectado em inversores, conforme mostrado na figura 1.16, que logo em seguida, são conectados diretamente na rede. Os inversores devem satisfazer às exigências de qualidade e segurança para que a rede não seja afetada.

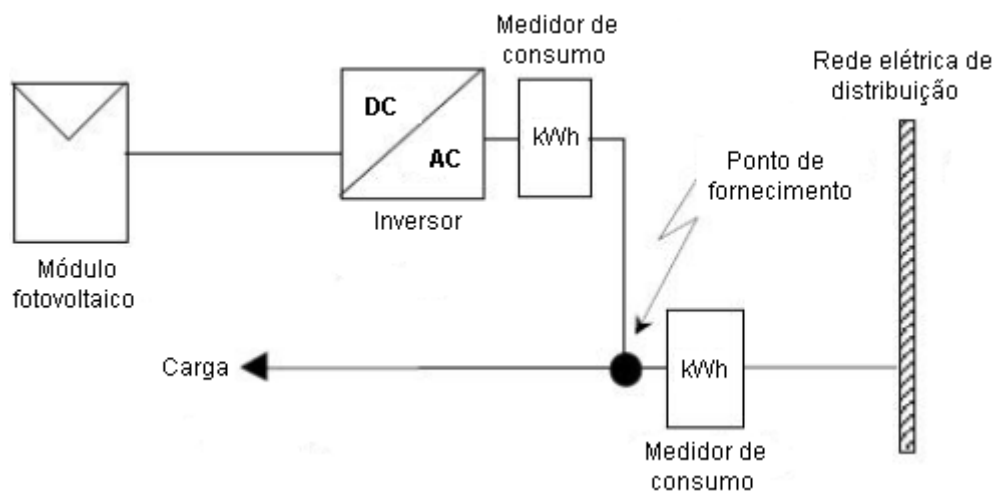


Figura 1.16: Topologia de sistema fotovoltaico interligado à rede.

Atualmente, muitos estudos são desenvolvidos para avaliar a paridade do sistema fotovoltaico com a rede, pois isto envolve custos operacionais e questões regionais que influenciam no custo final da energia gerada por estes sistemas. Mais informações estão disponíveis em [8].

1.5 – Orientação do Módulo Fotovoltaico

Uma maneira de aumentar o rendimento das células fotovoltaicas é posicionar o módulo fotovoltaico adequadamente para obter máxima incidência de raios solares. Com movimentação do painel sobre o eixo horizontal, é possível obter entre 15% e 20% a mais de energia durante o ano dependendo do local, se comparado ao posicionamento convencional (painel estático com a mesma inclinação da latitude do local) [20]. Análises econômicas mostram que o custo do seguidor de sol de eixo

simples é de R\$0,25 o kilowatt/hora gerado, valor bem abaixo do custo da energia obtida pelos painéis fotovoltaicos estáticos. Ao comparar dois painéis solares idênticos, sendo um móvel e outro estático, o rendimento aumentou de 8,84% para 10,89%, ou seja, um acréscimo de 20% [20].

Com a finalidade de beneficiar-se da máxima captação de energia ao longo do ano, duas condições devem ser observadas [21]. A primeira considera que, para uma operação adequada, os módulos devem estar orientados para o Equador. Para instalações localizadas no território brasileiro (Hemisfério Sul), os módulos fotovoltaicos estáticos devem estar orientados em direção ao Norte Verdadeiro. Porém, esta regra pode não ser válida caso o clima local varie muito durante um dia típico, por exemplo, se ocorre neblina durante a manhã e a maioria da insolação ocorre à tarde, ou caso se deseje privilegiar a geração em alguma hora específica do dia.

Na maioria das regiões o Norte Verdadeiro não coincide com o Norte Magnético (indicado pela bússola). A diferença entre o Norte Verdadeiro e o Norte Magnético é denominada de Declinação Magnética do Lugar. A verificação da direção Norte-Sul por meio de uma bússola está sujeita a grandes desvios. Este fato pode ser percebido colocando-se um pequeno ímã próximo a uma bússola, que sofrerá uma alteração na indicação da direção. Deve-se consultar um mapa de declinação magnética para achar a correção angular, que deverá ser aplicada à leitura da bússola e também, evitando objetos metálicos, fontes de campo magnético, etc.

A segunda condição a ser observada refere-se ao ângulo de inclinação dos arranjos fotovoltaicos. Em geral, a inclinação deve ser igual à latitude do local onde o sistema será instalado, mas nunca inferior a 10° , para favorecer a auto-limpeza dos módulos. Vale lembrar ainda que, em locais com muita poeira, é necessário limpar periodicamente a superfície do módulo, uma vez que a sujeira afeta a captação de luz, reduzindo seu desempenho. No entanto, deve-se cuidar para não danificar o vidro ou qualquer outro material de cobertura do módulo.

O ângulo de inclinação que maximiza a geração de energia varia com a época do ano e com a latitude do local onde o sistema será instalado. Para maximizar a energia gerada ao longo do ano, a inclinação do arranjo fotovoltaico deve estar dentro de 10° no entorno da latitude do local. Por exemplo, um sistema posicionado, ao longo

de todo ano, em uma latitude de 35° pode ter um ângulo de inclinação de 25° a 45°, sem uma redução significativa no seu desempenho anual. Dependendo da aplicação e das condições climáticas ao longo do ano, podem ser utilizadas outras inclinações que privilegiem a geração em épocas específicas.

O planeta Terra, durante o movimento angular ao redor do Sol, descreve em trajetória elíptica um plano que é inclinado de, aproximadamente, 23,5° com relação ao plano equatorial. A posição angular do Sol, ao meio dia solar, em relação ao plano do Equador, é denominada de Declinação Solar (d). Este ângulo varia com o dia do ano, dentro dos seguintes limites:

$$-23,5^\circ \leq d \leq 23,5^\circ$$

A soma de declinação solar com a latitude local determina a trajetória do movimento aparente do Sol para um determinado dia em uma dada localidade na Terra.

O correto posicionamento de um painel fotovoltaico é um fator fundamental para obter o máximo possível de radiação luminosa incidente, garantindo alta eficiência do sistema. Atualmente, há tecnologias computacionais (*software*) que permitem a análise preliminar do local onde se pretende implantar um sistema de geração fotovoltaico. Um *software* utilizado é o PVsyst (<http://www.pvsyst.com>), o qual elabora relatórios com informações sobre as variáveis (radiação solar, orientação adequada, etc.) a serem consideradas no dimensionamento de um sistema fotovoltaico.

1.6 – Considerações Finais

Para o dimensionamento de sistemas fotovoltaicos devem ser observados aspectos como: integração com o local a ser instalado (edificações ou locais remotos como campos, áreas abertas, etc.), resistência a altas temperaturas, custo e características elétricas dos painéis, previsão do consumo das cargas e dimensionamento do banco de baterias. Mais informações estão disponíveis em [27] e [28].

Um sistema fotovoltaico rastreador apresenta um ganho de 15% a 20% na geração de energia, em relação a um sistema fixo, pelo fato de estar posicionado sempre perpendicularmente ao Sol, o que permite aproveitar ao máximo a radiação solar incidente [11] e [20].

Capítulo 2

Sistema de Controle Analógico

2.1 – Introdução

O sistema para controle é constituído por um circuito para geração de sinal PWM para movimentação do painel fotovoltaico, utilizando dois motores CC de 12V. A localização da fonte luminosa é realizada por meio de um circuito eletrônico que, ao detectar a posição do Sol por meio de sensores LDR's (*light dependent resistor*), fornece aos semicondutores do inversor os pulsos de disparo.

Este capítulo apresenta o desenvolvimento do circuito de controle, assim como o funcionamento do mesmo, a importância dos sensores LDR's utilizados e a geração do sinal PWM adotado neste projeto.

2.2–Diagrama de Blocos

O circuito de controle, cujo diagrama de blocos está mostrado na figura 2.1, possui sensores LDR's, componente cuja resistência muda linearmente conforme varia a incidência de luz sobre o mesmo [26]. Estes sensores estão posicionados sobre o painel fotovoltaico.

De posse das tensões sobre os sensores, estas são comparadas em um amplificador diferencial (subtrator). Com este circuito obtêm-se na saída uma tensão igual à diferença entre os sinais aplicados, multiplicada por um ganho, situação suficiente para saber o quão diferente está a incidência de luz nos sensores: quanto mais próximo da tensão *offset*, mais direcionado perpendicularmente à fonte de luz está o painel, pois a intensidade luminosa nos dois sensores deve ser muito próxima ou igual. Quanto maior é esta diferença, acima ou abaixo da tensão de *offset*, mais a direita ou a esquerda está a fonte de luz, pois um dos sensores está mais iluminado que o outro. Após o estágio diferencial, o sinal passa ainda por um circuito integrador para suavizar as variações na tensão de saída do amplificador diferencial.

Os pulsos de chaveamento são obtidos após a modulação por largura de pulso (comparador PWM).

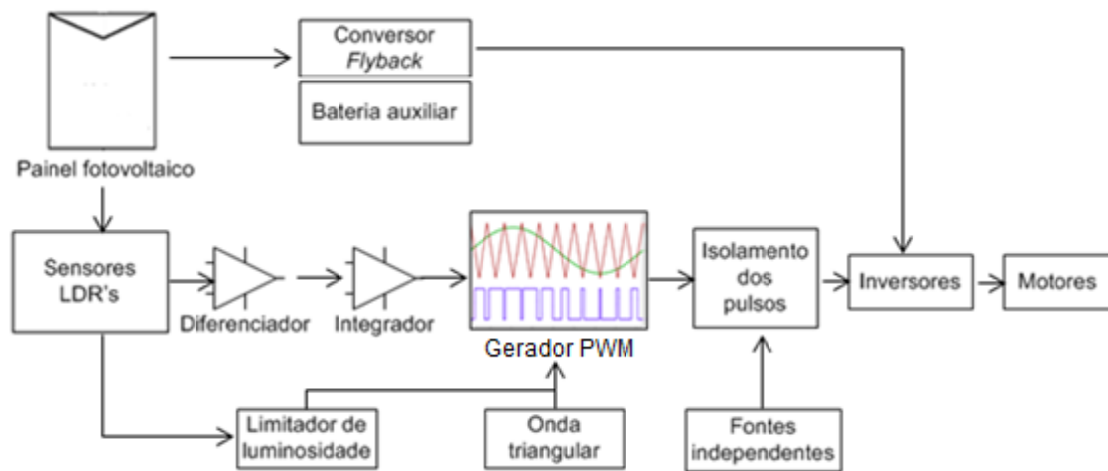


Figura 2.1: Diagrama de blocos do circuito de controle.

Utilizando um amplificador operacional para comparar o sinal de tensão CC, proveniente do amplificador diferencial e integrador, com uma onda periódica que neste caso, é uma onda triangular que oscila acima e abaixo desta tensão CC, obtendo assim, na saída do comparador, um sinal com ciclo ativo específico. O circuito para geração da onda triangular está mostrado no Anexo C.

Considerando a onda triangular na entrada inversora do amplificador, o sinal tem saída alta durante a parte do período em que a tensão CC é maior que a tensão da triangular, e saída baixa caso contrário (figura 2.2). Invertendo as entradas, obtêm-se o sinal complementar, para controlar os quatro semicondutores do inversor.

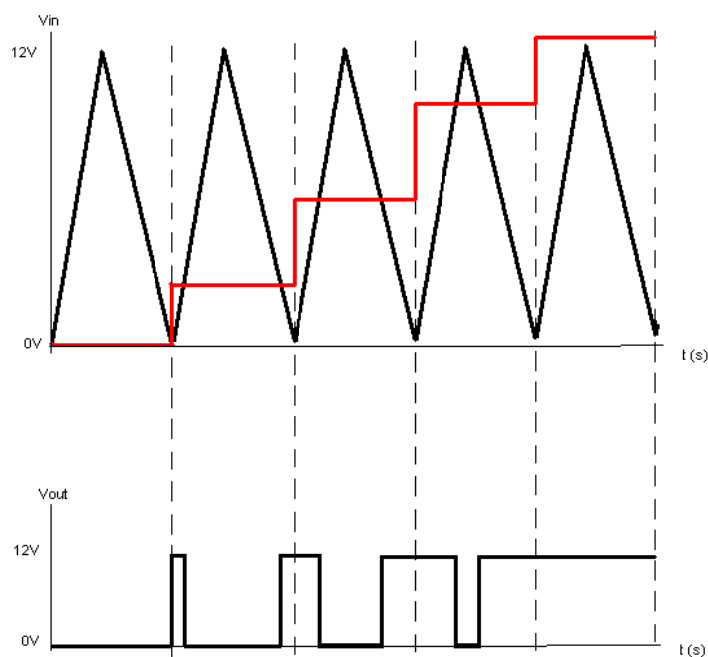


Figura 2.2: Comportamento da saída do comparador PWM

Além dos estágios da lógica para obtenção dos pulsos, há também outros circuitos que completam a lógica de controle, que são:

- regulador de tensão, para gerar a tensão *offset* dos sinais utilizados (mostrado no Anexo C);
- gerador de onda triangular, para utilizar no comparador PWM; duas fontes independentes, para isolar duas das chaves do inversor;
- circuito de isolamento dos pulsos (*drive* de isolamento), para interface entre o circuito de controle e o inversor;
- circuito limitador de luminosidade, para manter o sistema de posicionamento parado enquanto não houver luz suficiente para posicionar adequadamente o painel;
- conversor *flyback* para fornecer uma tensão contínua e estável de 15 V aos circuitos.

Estes circuitos são úteis para contornar algumas necessidades da lógica de controle e o funcionamento destes será explicado no decorrer do trabalho.

2.2.1 – Sensores LDR (*light dependent resistor*)

Como o intuito é posicionar o módulo perpendicularmente em relação ao Sol, os pulsos do inversor devem ser obtidos baseados na distribuição da incidência de luz no painel solar. A obtenção de informação sobre a irradiação de luz no ambiente é feita por meio de sensores LDR's, posicionados próximos à superfície da placa solar.

Utilizando os sensores configurados em um divisor de tensão, são obtidos valores de tensão relacionados linearmente à potência do estímulo luminoso.

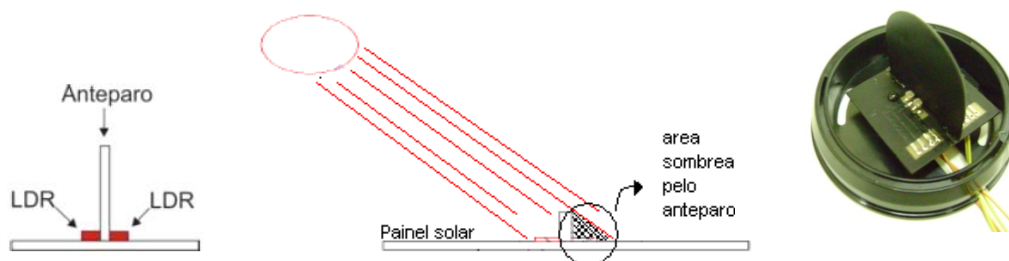


Figura 2.3: Sensores LDR's separados pelo anteparo.

O diferencial é obtido pela diferença da intensidade luz incidente, por meio de um anteparo entre os sensores (figura 2.3). A diferença entre os sinais obtidos é aplicada ao circuito de controle, conforme citado anteriormente.

Foram utilizados dois conjuntos sensores, conforme mostrado na figura 2.4, instalados sobre a superfície do módulo fotovoltaico: o primeiro para controlar o giro e o segundo para controlar a inclinação. Cada conjunto de sensores é composto por quatro LDR's (dois LDR's conectados em paralelo em cada lado do anteparo), pois assim obteve-se uma taxa de variação suave da resistência com a variação da intensidade luminosa, promovendo uma equalização dos valores reais apresentados pelos LDR's, o que resultou em maior equilíbrio dos valores, evitando deslocamentos rápidos que causariam solavancos na estrutura durante o posicionamento do sistema.



Figura 2.4: Sensores LDR's instalados sobre a superfície do módulo fotovoltaico.

Os sensores foram instalados em suportes posicionados acima do painel solar, com proteção para não haver incidência de luz proveniente dos espelhos refletores.

2.2.2 – Sinal PWM (*pulse width modulation*)

Para gerar o sinal PWM é realizada a comparação entre o sinal do integrador do circuito de controle (figura 2.5), e uma onda triangular de 25 kHz de frequência. Quando o sinal do integrador possuir um valor maior que o da onda triangular, o controle ativa as chaves ímpares do inversor e se o sinal possuir valor menor que a onda triangular, as chaves pares são ativadas, conforme mostrado na figura 4.5.

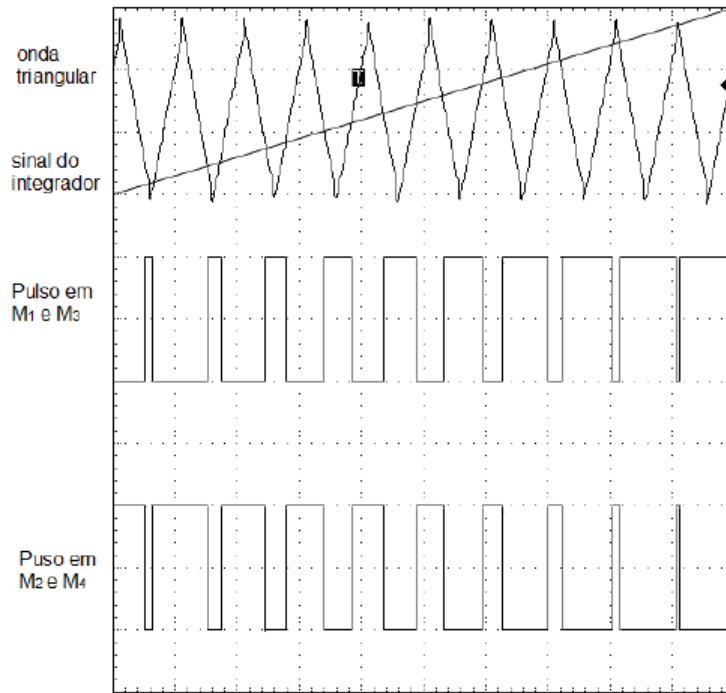


Figura 2.5: Sinal PWM comparado com a onda triangular e os pulsos resultantes nas chaves do inversor monofásico.

2.3 – Funcionamento do Circuito de Controle dos Eixos

A lógica de controle consiste em comparar as informações obtidas pelos dois conjuntos de sensores LDR's e depois utilizar o sinal diferencial em um comparador PWM. Os sinais passam primeiramente pelo amplificador diferenciador compreendido pelos componentes R5, R6, R7, R8 e U1C, conforme figura 2.6 *a* e *b*, cujo sinal de saída é a diferença das tensões aplicadas nas entradas, multiplicada por um ganho. Como a alimentação negativa de todos os amplificadores operacionais está aterrada, é adicionado 7,5 V de *offset*. Se não houvesse o *offset* positivo, a tensão de saída seria sempre 0 V quando a tensão aplicada à entrada inversora (V_-) fosse maior que a tensão na entrada não-inversora (V_+). Com a adição dos 7,5 V, obtêm-se na saída do diferenciador tensão entre 0 V e 7,5 V para $V_- > V_+$.

Por meio da análise do circuito pela lei de corrente de Kirchhoff, a tensão de saída do diferenciador é dada por:

$$V_{dif} = 10 \cdot V_{sensor2} - 11 \cdot \left[\frac{\frac{R7}{1K} \cdot V_{sensor1} + 7,5}{\left(1 + \frac{R7}{1K}\right)} \right] \quad (2.1)$$

Este valor de tensão é aplicado ao integrador, composto pelo capacitor C1 e U1D. Os 7,5 V de tensão na entrada positiva agem como *offset*, resultando na saída do integrador 7,5V quando as duas entradas apresentarem valores iguais. Este estágio faz com que a tensão aumente ou diminua lentamente quando os sensores apresentarem valores de resistências diferentes um do outro.

O estágio final da lógica de controle para obtenção dos pulsos é o comparador PWM. Até este ponto, os valores de tensão obtidos pelos sensores foram comparados entre si e depois integrados, mantendo 7,5 V_{DC} de *offset*. Agora, o sinal é comparado com uma onda triangular, também com 7,5 V_{DC} de *offset*, frequência de 25 kHz para geração dos pulsos para disparo das chaves do inversor. Com esta comparação entre uma tensão contínua e outra oscilando, é possível obter sinal com o ciclo ativo desejado. Durante um período de onda triangular, enquanto a tensão aplicada à entrada não-inversora é maior que a aplicada na inversora, o pulso de saída é alto, caso contrário a saída é baixa. Como o valor da tensão contínua é proveniente do estágio diferencial, então está diretamente relacionada à diferença das tensões obtidas nos divisores de tensão dos sensores.

Assim, na saída do comparador PWM temos pulsos com ciclo ativo relacionado à diferença de tensão nos sensores. O circuito de controle implementado para controlar os movimentos do sistema nos dois eixos está mostrado no Anexo A.

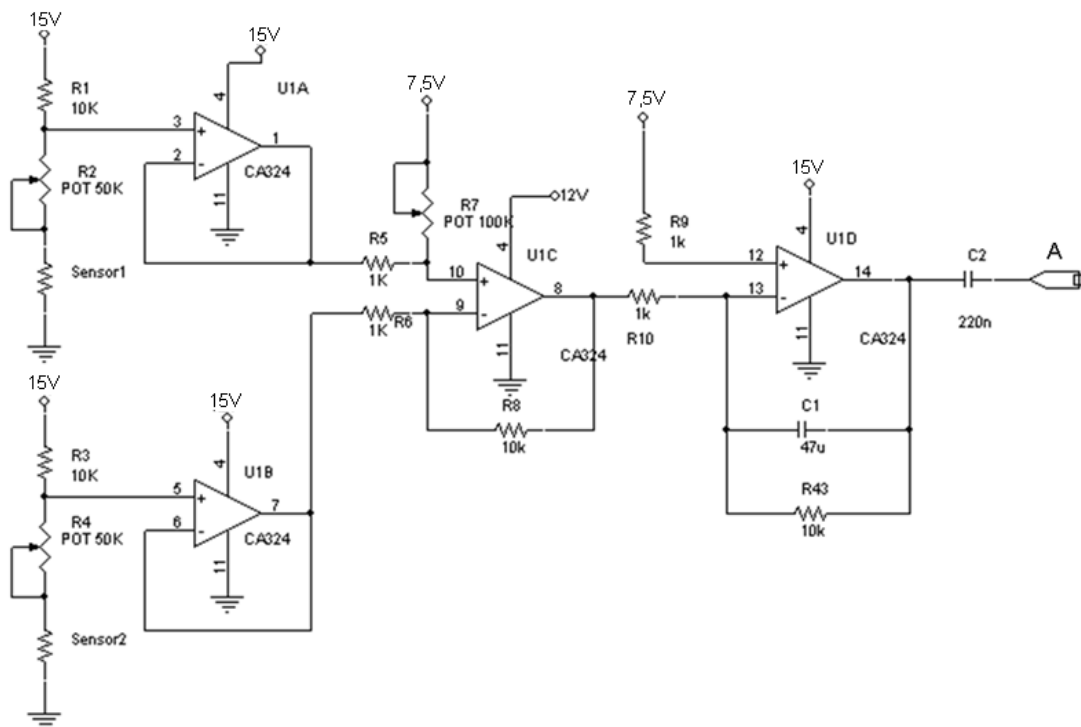


Figura 2.6 (a): Circuito para obtenção dos pulsos para controle do inversor.

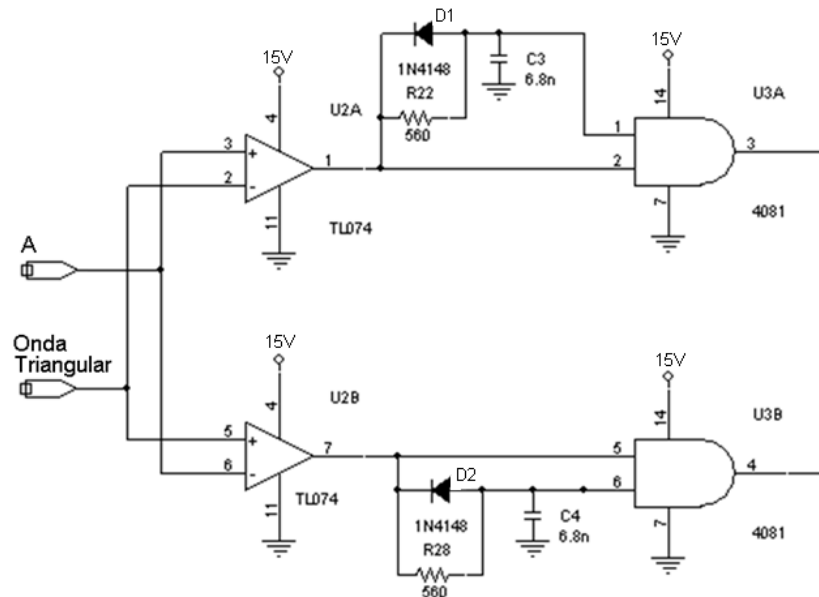


Figura 2.6 (b): Circuito para obtenção dos pulsos para controle do inversor.

Foi necessário considerar a condição de operação com baixa luminosidade, isto é, quando anoitecer ou quando o céu estiver parcial ou totalmente nublado. Assim, nesta condição o circuito de controle pára de gerar sinais de pulso para os inversores. Isto foi feito por meio do circuito limitador de luminosidade mostrado na figura 2.7. Este circuito recebe o sinal de tensão dos sensores LDR's e compara os mesmos com uma tensão de *offset*, ajustada em um valor específico. Quando houver baixa incidência de luz, a saída “*Enable1*”, que está conectada ao circuito de controle juntamente com a saída de pulsos em uma porta “AND”, estará em 0 (zero), fazendo com que não haja pulsos na saída do circuito de controle. O circuito implementado está mostrado no Anexo B.

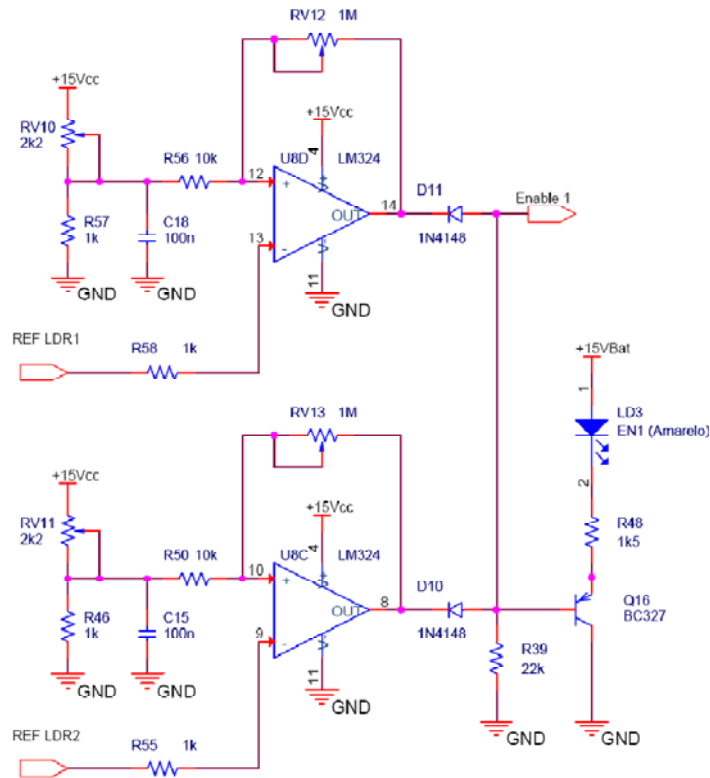


Figura 2.7: Circuito limitador de luminosidade.

O circuito de controle apresentou na saída das portas AND U3A e U3B (figura 2.6 b) as formas de onda apresentadas na figura 2.8, na qual observa-se que em momento algum ocorre simultaneamente nível lógico alto, o que danificaria os semicondutores.

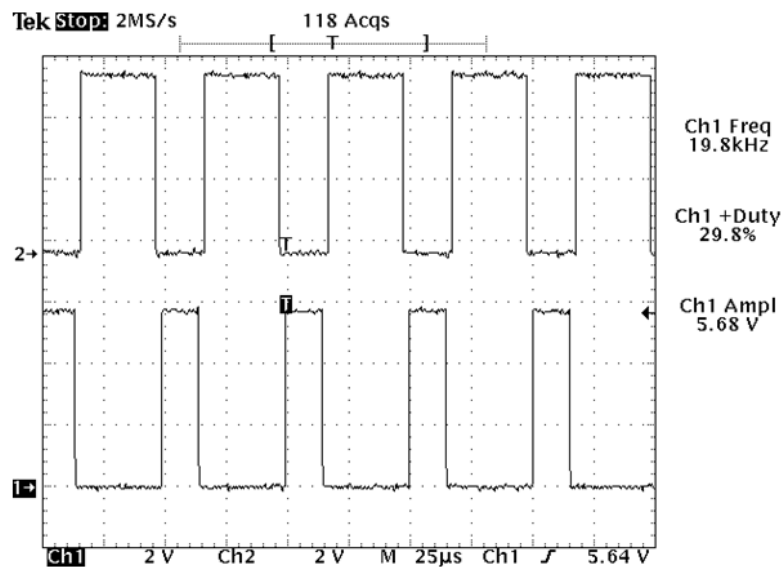


Figura 2.8: Pulsos complementares gerados pelo circuito de controle.

A figura 2.9 mostra o sinal resultante da soma das duas formas de onda. Observa-se a existência de um intervalo de tempo sem pulso alto, resultado do tempo de

carga do capacitor do circuito RC (figura 2.6 b) presente em uma das entradas da porta AND, garantindo que os quatro MOSFET's não conduzam simultaneamente.

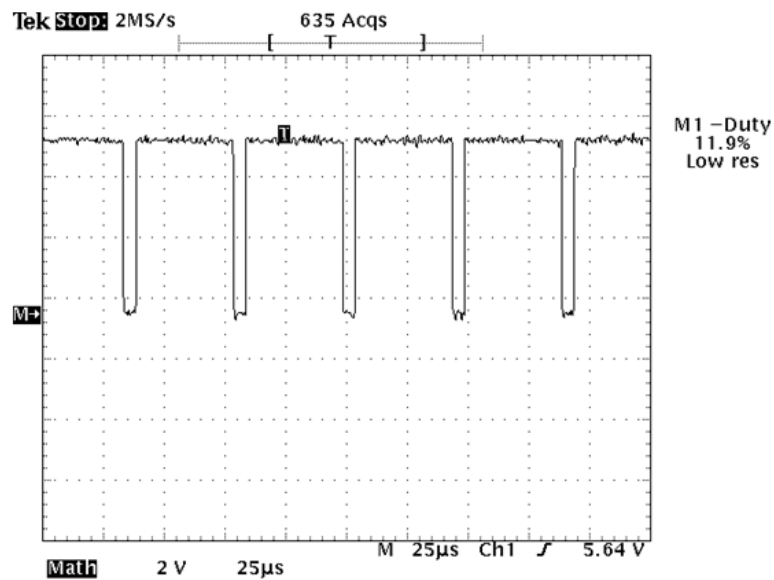


Figura 2.9: Forma de onda resultante dos pulsos complementares.

Após a realização de testes do circuito de controle em laboratório, o mesmo foi montado em placa de circuito impresso e instalado em um painel junto à estrutura mecânica, conforme mostra a figura 2.10 a, b e c.

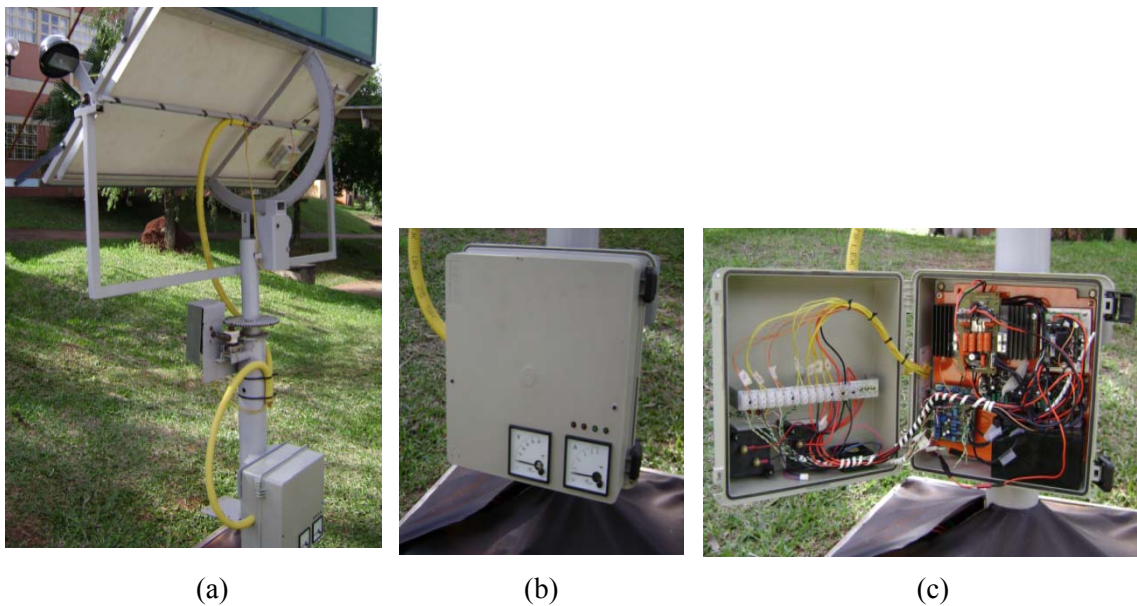


Figura 2.10: Montagem do circuito de controle junto à estrutura mecânica.

2.4 – Conversor *Flyback*

Todo o sistema de controle, que é constituído pelo circuito de controle analógico, inversor e *drives* isoladores de pulsos, precisa ser alimentado pela energia gerada pelo módulo fotovoltaico. Para isto, foi implementado um conversor *flyback* modo contínuo, operando com controle em malha fechada (mostrado no Anexo F), com tensão estável de saída de 15 V, considerando que a tensão de entrada pode variar de 24 V a 30 V (variação apresentada na saída do painel fotovoltaico).

Para a implementação do conversor, considerou-se a condição de baixa radiação solar, que ocorre com céu nublado ou à noite, pois nestas situações não há fornecimento de energia suficiente para o conversor alimentar o sistema de controle. Para solucionar isto, utilizou-se uma bateria auxiliar, conectada à saída do conversor, que também alimenta o sistema de controle.

No momento em que houver radiação solar adequada, o conversor *flyback* volta a alimentar todo o sistema de controle e também recarrega a bateria. O circuito do conversor implementado está mostrado no Anexo G.

2.5 – Considerações Finais

O circuito de controle proposto inicialmente apresentou uma taxa de variação dos pulsos de saída, para os inversores, demasiadamente rápida, dificultando e estabilização do sistema na posição perpendicular ao Sol. Quando isso ocorria, os motores para posicionamento movimentavam-se para um lado ou outro, sem parar no ponto correto. Isto foi solucionado alterando os valores dos resistores e do capacitor do amplificador diferencial para obter um ganho melhor, permitindo que a ação integral apresentasse uma taxa de variação suave, para o correto posicionamento do painel.

Inicialmente foi utilizado um conjunto de sensores LDR's, constituído por um LDR em cada lado do anteparo, porém verificou-se que a taxa de variação da resistência com a variação da luminosidade era demasiadamente elevada, o que causava solavancos durante o posicionamento do módulo. Isto foi solucionado adicionando mais um LDR, conectado em paralelo, em cada lado do anteparo, para obter uma taxa de variação suave da resistência dos mesmos, resultando em movimentos lentos durante o posicionamento do módulo. Durante o período ensolarado, verificou-se que os LDR's apresentam mudanças na taxa de variação da resistência, devido à influência da temperatura, porém isto não afetou o rastreamento do Sol pelo circuito de controle.

Capítulo 3

Circuito de Potência para Acionamento dos Motores

3.1 – Introdução

O posicionamento do módulo fotovoltaico perpendicular ao Sol, é realizado por meio do controle de dois motores: um para girar e outro para inclinar o painel. Cada motor é controlado por um inversor monofásico em ponte-completa (*full bridge*) [23] que fornece uma tensão positiva ou negativa, conforme o controle é feito pelo sinal PWM para chaveamento dos semicondutores. O inversor é monofásico, alimentado por um conversor *flyback* com tensão estável de saída de 15 V.

O funcionamento do inversor empregado no projeto com suas principais formas de onda, assim como a operação dos motores utilizados são mostrados neste capítulo.

3.2 – Inversor Monofásico

Com o intuito de controlar o sentido de rotação e velocidade do motor utilizou-se um inversor (conversor CC-CA). Os inversores têm a função de transformar uma tensão contínua e estável, fornecida pelo conversor *flyback*, em uma tensão positiva ou negativa para os motores. Os níveis de tensão ou de corrente podem ser fixos ou variáveis, assim como sua frequência de operação [22]. Atualmente, existem dois tipos de inversores, classificados de acordo com: número de fases, forma de utilização de semicondutores de potência, comutação e formas de ondas de saída [23].

3.2.1 – Funcionamento do Inversor

Com a utilização de quatro semicondutores MOSFET's nos dois braços do inversor, o funcionamento consiste em disparos cruzados dos semicondutores, isto é, M1 conduzindo com M3 e M2 com M4, conforme o esquema elementar mostrado na figura 3.1.

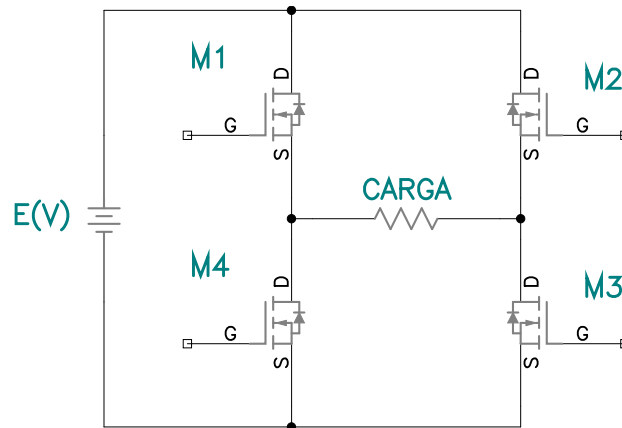


Figura 3.1: Esquema elementar do inversor.

A seguir são mostradas as etapas dos disparos, enquanto que a figura 3.2 mostra os pulsos em todas as chaves e a forma de onda na saída para uma carga puramente resistiva.

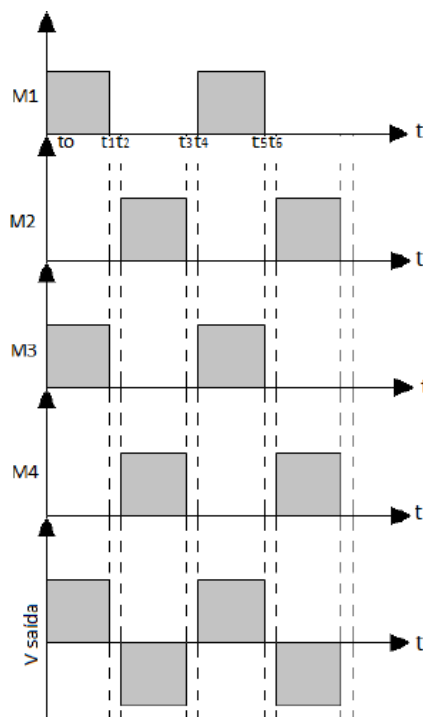


Figura 3.2: Formas de onda e tensão para o inversor.

Como visto na figura 3.2, quando os semicondutores ímpares (M1 e M3) conduzem, a tensão de saída do inversor será positiva e quando os semicondutores pares (M2 e M4) estiverem conduzindo a saída será negativa.

- Etapa 1: $T_0 < t < T_1$

Neste momento M1 conduz junto com M3 e a tensão da fonte DC é aplicada na carga.

- Etapa 2: $T_1 < t < T_2$

Para evitar a condução simultânea de M1 com M4 (ou M2 com M3) resultando em um curto-circuito, todos os semicondutores estão em corte, não havendo tensão aplicada na carga.

- Etapa 3: $T_2 < t < T_3$

Neste momento M2 conduz com M4 e a tensão da fonte DC é aplicada na carga com polaridade invertida.

- Etapa 4: $T_3 < t < T_4$

Para evitar a condução simultânea de M1 com M4 (ou M2 com M3) resultando em um curto-circuito, ocorre um intervalo de tempo (tempo morto) no qual os transistores permanecem em corte, não havendo tensão aplicada na carga, como ocorre igualmente na etapa 2. O circuito do inversor monofásico utilizado neste trabalho, com os MOSFET's, é mostrado na figura 3.3.

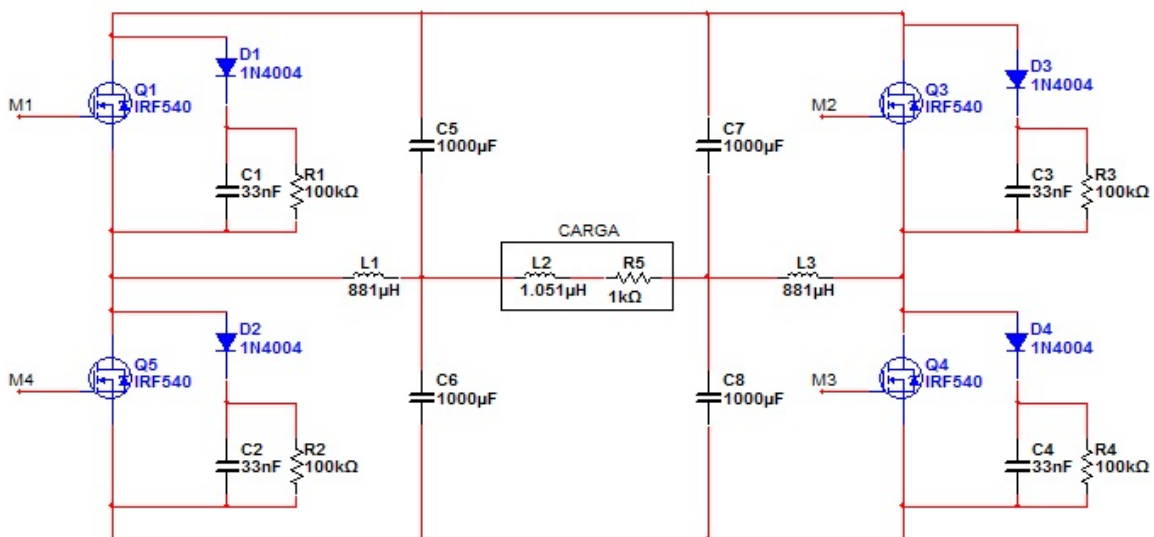


Figura 3.3: Circuito do inversor monofásico em ponte completa.

3.3 – Semicondutores

Considerou-se para escolha dos transistores utilizados a tensão aplicada nos mesmos, bem como as correntes: média, eficaz e de pico, que circularão nestes. Os semicondutores estão sujeitos a tensão de entrada do inversor, que é 15 V.

Para determinar a corrente eficaz e a média considerou-se uma carga puramente resistiva. Como a razão cíclica pode atingir 100% devido às características de controle [24], para o caso mais crítico a corrente média possui valor igual ao da corrente eficaz.

Para suportar estas condições operacionais deste trabalho, foi selecionado um transistor MOSFET modelo IRF-540, cujos parâmetros (obtidos do *datashet*) são os seguintes:

- Tensão *drain-source* - $V_{DS} = 100 \text{ V}$;
- Tensão *drain-gate* - $V_{DRG} = 100 \text{ V}$;
- Corrente de dreno contínua (25°C) - $I_D = 22 \text{ A}$;
- Corrente de dreno contínua (100°C) - $I_D = 15 \text{ A}$;
- Corrente de dreno pulsada (na região segura de operação) - $I_{DM} = 88 \text{ A}$;

3.4 – Snubbers

Durante o processo de chaveamento do conversor, podem surgir oscilações de alta frequência nos transistores e também nos diodos de potência devido às indutâncias intrínsecas existentes nas trilhas e componentes e também às capacitâncias dos semicondutores, com elevadas derivadas de tensão e corrente.

Um modo de evitar tais problemas é inserir um *snubber*, podendo este estar em série ou em paralelo com o componente a ser protegido. Isso mantém o MOSFET em uma área de operação segura. O *snubber* pode ser passivo (utilizam resistores, capacitores, indutores e diodos) ou ativo (incluem transistores e outros elementos ativos, sendo usualmente mais complexos que os passivos). Também podem ser classificados como dissipativos (a energia armazenada no *snubber* pode ser dissipada em um resistor) ou regenerativos (caso a energia armazenada seja transferida para a entrada e/ou para a saída).

Os *snubbers* são pequenos circuitos inseridos em circuitos estáticos de potência, cuja função é controlar os efeitos produzidos pelas reatâncias intrínsecas do circuito e podem amortecer oscilações, controlar a taxa de variação de tensão e/ou corrente e ainda, grampear sobretensões. Com o projeto adequado do *snubber*, os semicondutores apresentam menor dissipação de potência média, picos menores de tensão, corrente e potência dissipada. Isto resulta em maior confiabilidade, maior eficiência, menor peso, menor volume e menos interferência eletromagnética. Suas características são maximizadas quando sua posição na placa de circuito impresso for o mais próximo

possível do semiconductor a ser protegido [24]. A figura 3.4 mostra o esquema para *snubber* tipo dissipativo, utilizado neste projeto com um diodo ultra-rápido modelo UF-4004.

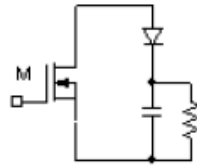


Figura 3.4: *Snubber* dissipativo convencional para um transistor.

3.5 – Funcionamento do Inversor com Filtro de Saída

A implementação de um filtro deve-se ao fato do circuito de controle operar em alta frequência e no momento em que o painel estiver posicionado com ângulo de 90° com o Sol, o controle fornecerá um sinal para as chaves com razão cíclica de 50% e frequência de 25 kHz (adotado neste trabalho) e a tensão antes do filtro LC ficará alternando nessa frequência com a forma de onda mostrada na figura 3.5.

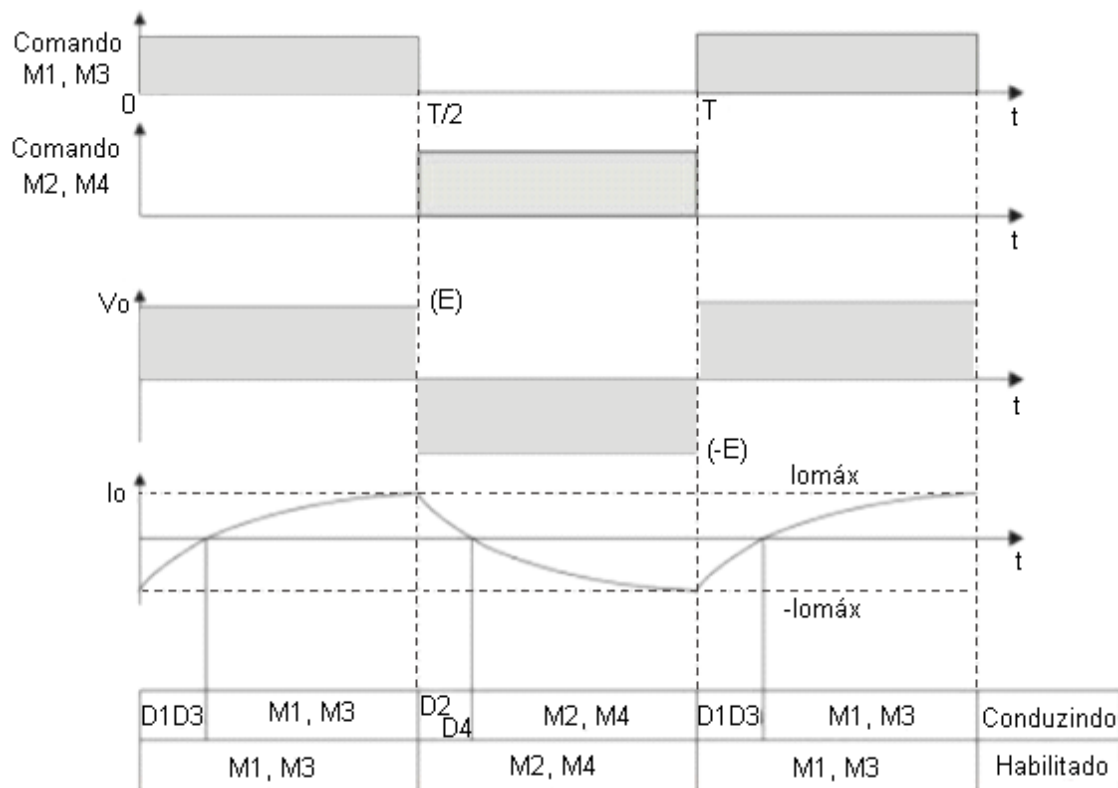


Figura 3.5: Formas de onda de tensão e corrente na saída do inversor.

Tornou-se necessário implementar um filtro LC que eliminasse as variações em altas frequências e passasse para a carga somente o valor médio dos pulsos enviados pelo circuito de controle. O filtro implementado é do tipo passa-baixa com frequência de corte de 120 Hz. A equação 3.1 permite de dimensionamento dos componentes do filtro LC.

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3.1)$$

O esquema do circuito com o filtro passa-baixa é mostrado na figura 3.6 e o esquema completo está mostrado na figura 3.3.

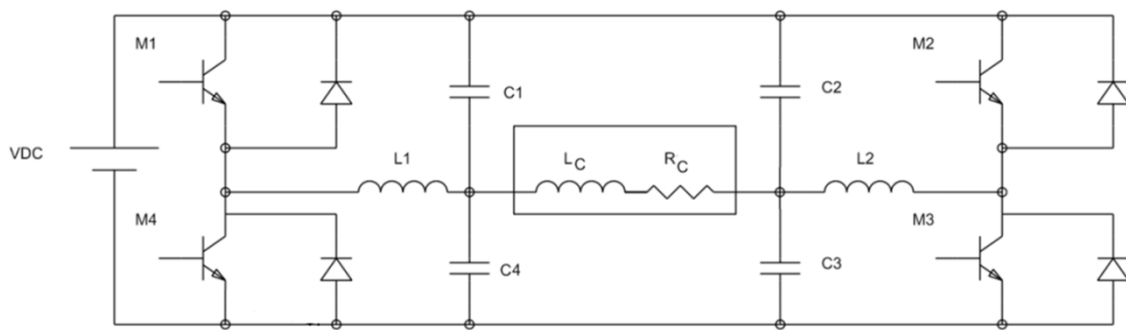


Figura 3.6: Inversor com filtro LC.

O circuito equivalente para entrada AC foi utilizado para determinar a frequência de corte do filtro, a figura 3.7 mostra a simplificação de um filtro LC análogo ao utilizado neste projeto.

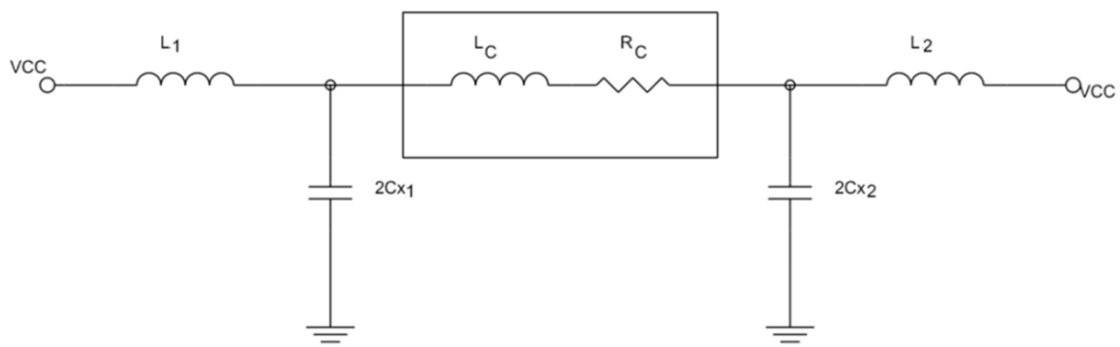


Figura 3.7: Filtro LC utilizado no inversor.

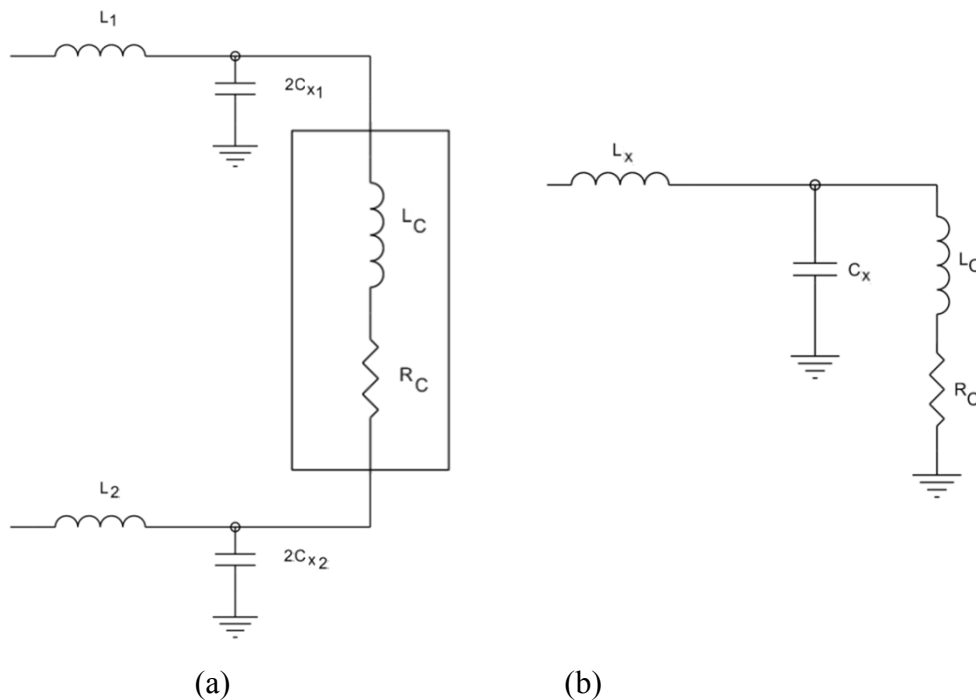


Figura 3.8: Filtros equivalentes – (a) e (b) possuem as mesmas características de funcionamento.

A partir da simplificação apresentada na figura 3.8 obtêm-se a equação 3.2 para o filtro LC do inversor. Considerando um indutor L_X com baixa reatância indutiva (para que haja baixa perda no indutor), uma frequência de corte de 120 Hz, que resulta em uma atenuação de 3 dB nesta frequência, um valor de indutância de 880 μH , que apresenta baixa impedância ($X_L = 0,664 \Omega$) para a frequência de corte, pode-se determinar o valor do capacitor por meio da equação 3.2, que é de 1000 μF .

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{2C_x L_x}} \quad (3.2)$$

Assim, o filtro LC apresenta, para frequências maiores que a frequência de corte, uma atenuação de 40 dB/dec.

3.6 – O Motor de Corrente Contínua

3.6.1 – Estrutura

O motor de corrente contínua de duas estruturas magnéticas:

- Estator (enrolamento de campo ou ímã permanente);
- Rotor (enrolamento de armadura).

O estator é composto por uma estrutura ferromagnética com pólos salientes aos quais são enroladas as bobinas que formam o campo. O rotor é um eletroímã constituído de um núcleo de ferro com enrolamentos na superfície que são alimentados por um sistema mecânico de comutação. Este sistema é formado por um comutador e por escovas fixas, que exercem pressão sobre o comutador e que são ligadas aos terminais de alimentação. O propósito do comutador é inverter a corrente na fase de rotação apropriada de forma que o conjugado desenvolvido seja sempre na mesma direção.

Os enrolamentos do rotor compreendem bobinas de n espiras. Ambos os lados de cada enrolamento são inseridos em ranhuras com espaçamento igual ao de dois pólos do estator de modo que, quando os condutores de um lado estão sob o pólo norte, os condutores do outro lado estão sob o pólo sul. As bobinas são conectadas em série por meio das lâminas do comutador, com o final da última conectada ao início da primeira.

3.6.2 – Funcionamento do Motor CC

Um desenho esquemático de um motor CC é mostrado na figura 3.9, onde o estator é representado por meio de ímãs permanentes e o rotor é representado por uma bobina de fio de cobre por onde circula uma corrente elétrica. Uma vez que as correntes elétricas produzem campos magnéticos, essa bobina se comporta como um ímã permanente, com os pólos resultantes norte e sul.

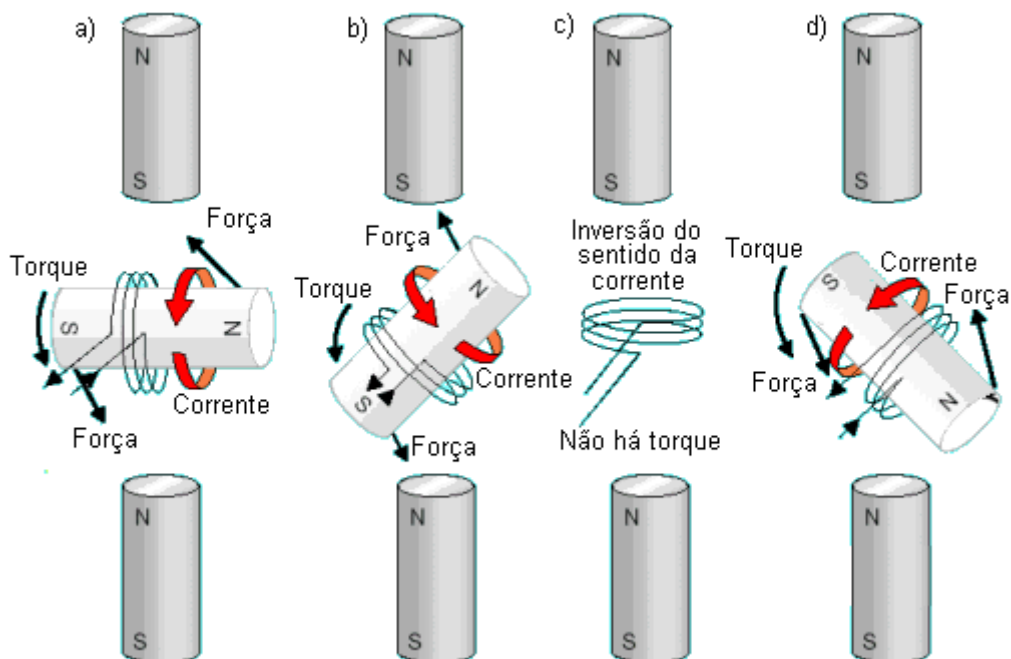


Figura 3.9: Funcionamento de um motor CC.

Iniciando a descrição pela situação ilustrada em (a), a bobina está posicionada horizontalmente, como pólos opostos se atraem, a bobina experimenta um torque que age no sentido de girar no sentido anti-horário. A bobina sofre aceleração angular e continua seu giro para esquerda, conforme ilustrado em (b).

O torque continua até que os pólos da bobina alcancem os pólos opostos dos imãs fixos (estator). Nesta situação (c), a bobina girou 90° , não há torque algum, uma vez que a direção da força eletromagnética passa pelo centro da rotação. Assim, o rotor está em equilíbrio, ou seja, a força e o torque resultantes são nulos. Este é o instante adequado para inverter o sentido da corrente na bobina. Agora, os pólos de mesmo nome estão muito próximos e a força de repulsão é intensa. Devido à inércia do rotor e como a bobina já apresenta um momento angular “para a esquerda”, esta continua girando para a esquerda no sentido anti-horário e o novo torque, agora propiciado por forças de repulsão, como em (d), colabora para a manutenção e aceleração do movimento de rotação.

Estas atrações e repulsões bem coordenadas é que fazem o rotor girar. A inversão do sentido de corrente, denominada de comutação, no momento oportuno, é indispensável para a manutenção dos torques favoráveis, os quais garantem o funcionamento dos motores.

3.6.3 – Controle de Velocidade

O controle de velocidade de um motor de corrente contínua se dá por meio do controle da tensão aplicada em sua armadura. O modelo elétrico do motor de corrente contínua, disposto na figura 3.10, mostra as características elétricas do mesmo.

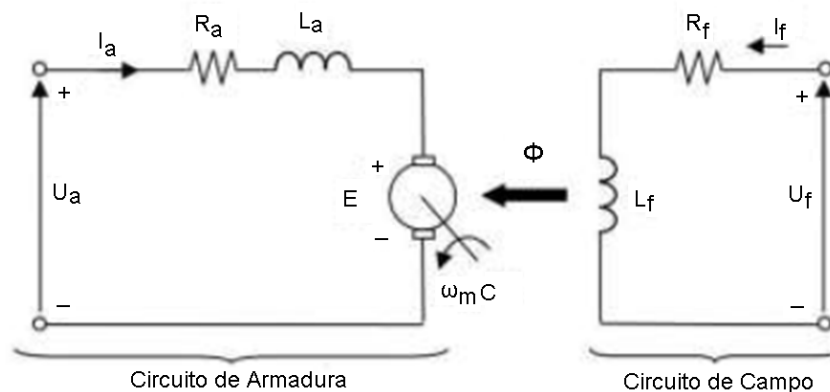


Figura 3.10: Esquema equivalente do motor CC.

Utilizando a lei de Kirchoff:

$$U_a = R_a I_a L I_a + E \quad (2.3)$$

Onde:

U_a = tensão da armadura (V);

R_a = resistência da armadura (Ω);

I_a = corrente da armadura (A);

E = força eletromotriz induzida (V).

Considerando que a resistência da armadura é muito pequena e a corrente constante, é possível simplificar a equação para:

$$U_a = E \quad (2.4)$$

Pela lei da indução de Faraday, sabe-se que a força eletromotriz é proporcional à rotação e ao fluxo magnético.

$$E = K_1 \Phi n \quad (2.5)$$

Onde:

K_1 = constante que depende da construção do motor;

Φ = fluxo magnético no entreferro;

n = velocidade de rotação do motor;

Combinando as equações acima:

$$N = U_a K_1$$

Portanto, a velocidade de rotação é proporcional à tensão aplicada na armadura e inversamente proporcional ao fluxo no entreferro.

O controle de velocidade, até a velocidade nominal, é feito por meio da variação do valor da tensão da armadura do motor, mantendo-se o fluxo constante. Velocidades superiores à nominal podem ser obtidas pela diminuição da intensidade do fluxo, mantendo-se a tensão da armadura constante. Para diminuição deste fluxo é necessária a diminuição da corrente de campo, controle este que foge do escopo deste trabalho. A velocidade nominal do motor é definida por meio da corrente de armadura nominal, pelos aspectos térmicos do dimensionamento do motor e da tensão da resistência da armadura.

Quando o torque requerido pela carga for constante, o motor demanda uma corrente de armadura praticamente constante e somente durante acelerações geradas pelo aumento do valor da tensão é que a corrente eleva-se transitoriamente para acelerar a máquina, retornando após isso ao valor inicial.

Sendo assim, em regime, o motor CC opera com corrente de armadura praticamente constante e o valor desta corrente é determinado pela carga aplicada no eixo. Assim, no modo de variação de rotação por meio da variação da tensão da armadura, até a rotação nominal, o motor tem a disponibilidade de acionar a carga exercendo um torque constante em qualquer valor de rotação de regime estabelecida.

Observa-se que uma grande vantagem do motor CC é o alto torque que apresenta quando opera com baixas rotações e também, torque constante até o valor de rotação nominal.

Neste projeto utilizou-se um motor de corrente contínua de 12 W, usado em limpador pára-brisa de veículos. Esse tipo de motor possui um redutor no eixo, que diminui a velocidade angular a aumenta o torque. O motor utilizado, mostrado na figura 3.11, possui valores de indutância e resistência de 1,054 mH e 16,19 Ω , respectivamente.



Figura 3.11: Motor CC utilizado no projeto.

3.7 – Testes Realizados

Após a montagem do circuito de controle (para geração de pulsos PWM) e do inversor, conectado ao motor, os testes foram realizados por meio da obtenção da forma de onda de saída do inversor. Foram obtidos sinais de razão cíclica (D) igual a 50% (carga em equilíbrio) e de 75%. O intuito destes testes foi verificar se a operação do sistema ocorria conforme os parâmetros de projeto.

3.7.1 – Tensão na Carga com Sinal de Razão Cíclica de 50%

A figura 3.12 mostra a tensão no motor com sinal de entrada de 12,5 kHz e razão cíclica 50% e a figura 3.13 mostra a tensão no motor com sinal de entrada de 25 kHz e razão cíclica 50%.

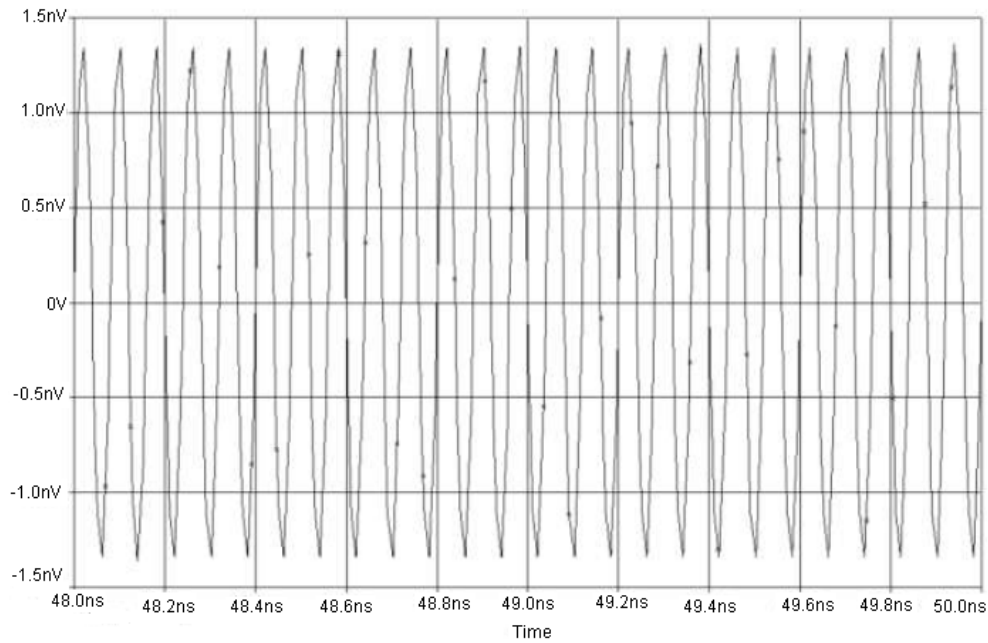


Figura 3.12: Tensão na carga com sinal de entrada de 12,5 kHz e $D = 50\%$.

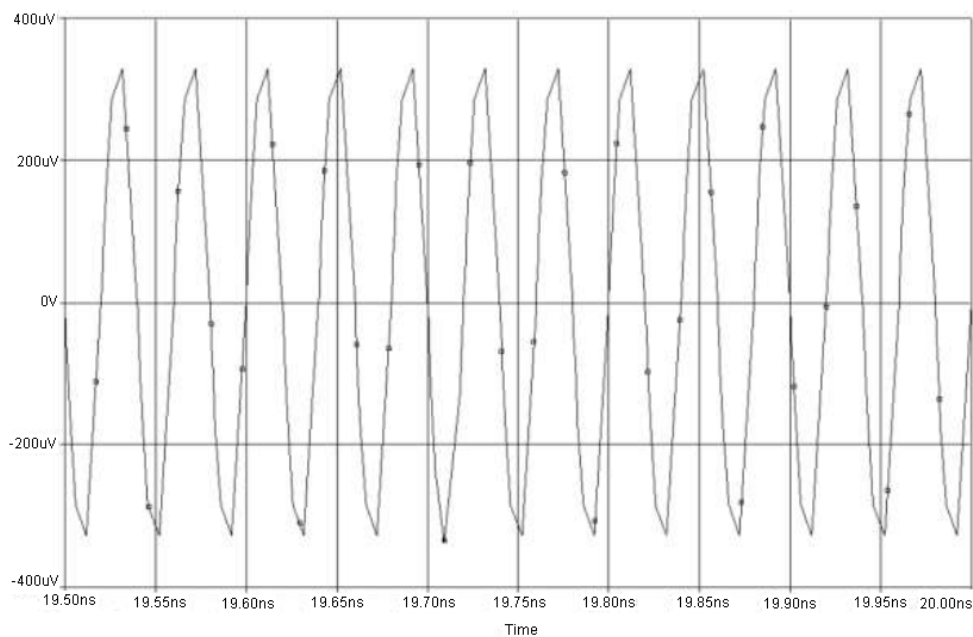


Figura 3.13: Tensão na carga com sinal de entrada de 25 kHz e $D = 50\%$

Observa-se, por meio dos gráficos, uma diminuição da tensão com o aumento da frequência de operação e que, quando o circuito opera acima da frequência de corte do filtro, a tensão média no motor é de valor próximo a zero, mostrando que o motor permanece parado nesta condição.

3.7.2 – Tensão na Carga com Sinal de Razão Cíclica de 75%

A figura 3.14 mostra a tensão no motor com sinal de entrada de 12,5 kHz e razão cíclica 75% e a figura 3.15 mostra a tensão no motor com sinal de entrada de 25 kHz e razão cíclica 75%.

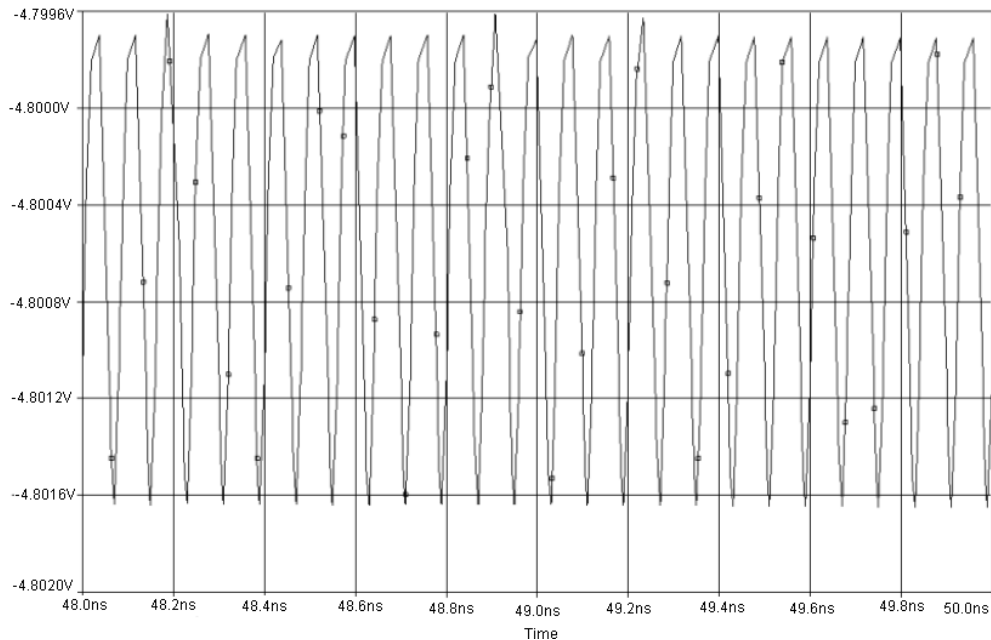


Figura 3.14: Tensão na carga com sinal de entrada de 12,5 kHz e $D = 75\%$.

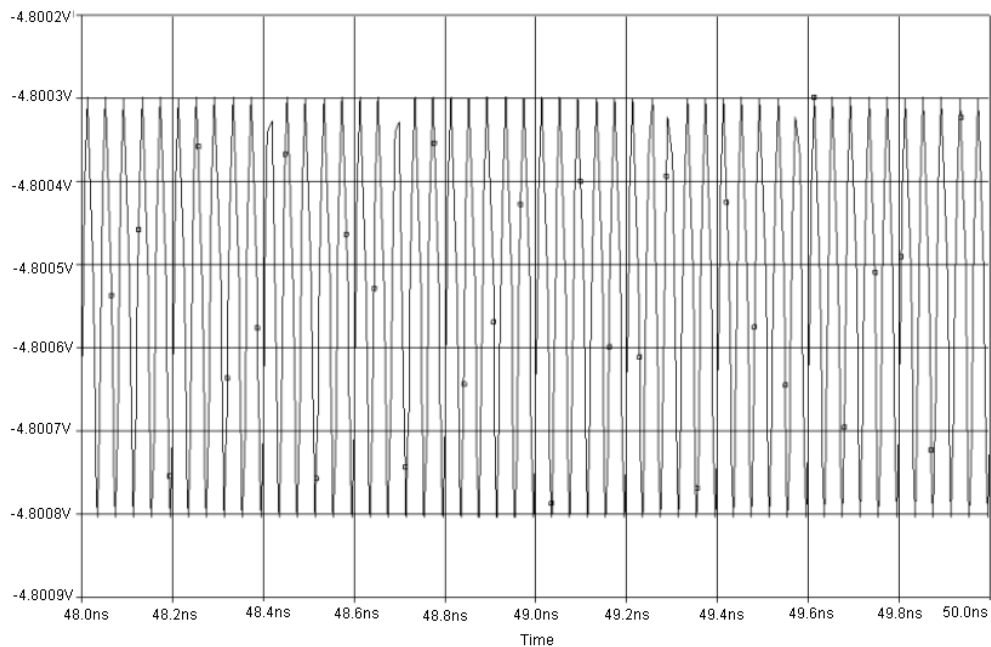


Figura 3.15: Tensão na carga com sinal de entrada de 25 kHz e $D = 75\%$.

Verificou-se, por meio dos gráficos que quando ocorria variação da razão cíclica surgiram tensões com valores em módulo próximos a 5 V de pico, ou seja, quando o

circuito de controle fornecer sinais com razões cíclicas diferentes de 50% (quando o motor está parado) surgirá uma tensão na saída do inversor, fazendo com que o motor tenha potência suficiente para movimentar o painel fotovoltaico para a posição adequada.

3.8 – Considerações Finais

Verificou-se, por meio dos testes realizados, que o circuito de acionamento dos motores funcionou satisfatoriamente, fornecendo tensão suficiente para os motores, conforme as características previstas em projeto, sendo que não houve a necessidade de adaptações ou mudanças no modelo proposto inicialmente.

Observou-se que os motores utilizados promovem uma movimentação lenta e suave do sistema mecânico, posicionando do módulo fotovoltaico de acordo com o deslocamento do Sol ao longo do dia. Apresentam alta durabilidade e resistência, pois ficaram expostos ao calor e umidade durante a realização dos testes sem apresentar falhas.

Capítulo 4

Estrutura Mecânica

4.1 – Introdução

Este capítulo apresenta o desenvolvimento da estrutura mecânica utilizada para o posicionamento do painel solar. A estrutura foi desenvolvida de forma empírica, de modo a obter os resultados esperados para validar o projeto proposto, sendo que inicialmente foi implementada em um eixo e posteriormente em dois eixos.

O movimento em dois eixos do painel solar, conforme proposto neste trabalho, é realizado por meio de uma estrutura composta por dois motores CC, utilizados em sistemas automotivos para limpador de pára-brisas, devido ao fato de serem robustos (apresentam alta durabilidade, resistência ao calor e umidade), de baixo custo e de fácil manutenção.

4.2 – Projeto da Estrutura Mecânica

Inicialmente, foi montada uma estrutura de madeira, conforme mostra a figura 4.1, que permitia movimentação em apenas um eixo para ensaios em laboratório. O suporte foi confeccionado em madeira devido à facilidade em se encontrar este material e também à sua fácil manipulação. No suporte foi fixada uma guia com dentes para acoplamento na cremalheira, que por sua vez foi acoplada ao eixo móvel.

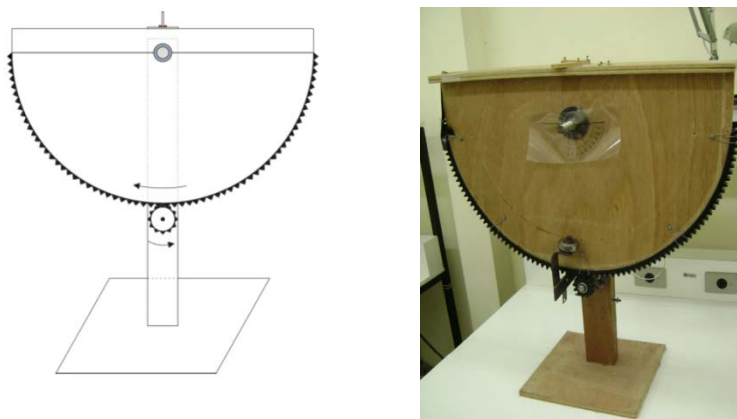


Figura 4.1: Estrutura de madeira para ensaios em laboratório.

A rosca sem fim foi instalada diretamente no eixo do motor, conforme mostra a figura 4.2, para proporcionar um travamento do sistema quando o motor estiver parado.

Caso isso não ocorresse, o peso da placa faria com que o motor retornasse ao ponto de equilíbrio e assim, o sistema de controle teria que fornecer potência constantemente para manter o painel fotovoltaico na posição adequada.

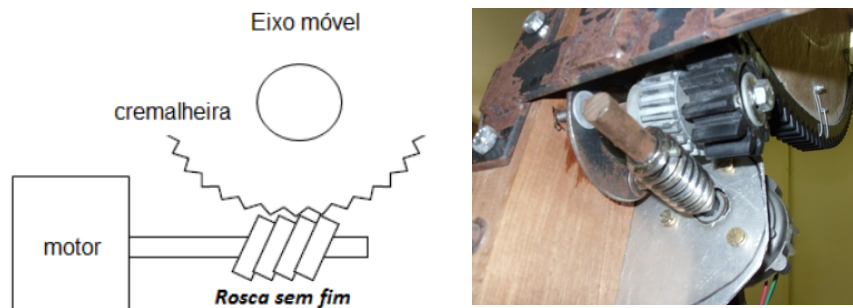


Figura 4.2: Esquema de acoplamento da rosca sem fim no motor e na cremalheira.

O motor foi instalado o mais próximo possível do suporte a fim de reduzir o tamanho do conjunto e facilitar o encaixe.

A estrutura montada para posicionar o painel solar de acordo com o escopo deste trabalho é mostrada na figura 4.3.



Figura 4.3: Estrutura para posicionamento do painel solar.

Possui movimentação em dois eixos, permitindo que ocorra por meio do circuito de controle, a inclinação e o giro simultaneamente. Desta forma é obtido o correto posicionamento do painel fotovoltaico.

Como o intuito deste trabalho é aproveitar o máximo possível de energia luminosa, foram instalados na estrutura espelhos concentradores posicionados a 45° de

inclinação em relação ao eixo normal do painel, com o objetivo de aumentar a intensidade luminosa incidente, conforme mostra figura 4.4. Isso promoveu maior incidência de luz sobre o painel fotovoltaico, aumentando a eficiência durante a captação e geração de energia, pois assim há maior radiação solar sobre as células fotovoltaicas, não havendo perdas ou redução considerável da potência gerada, mesmo em condições de baixa luminosidade (céu parcialmente nublado).



Figura 4.4: Estrutura para posicionamento do painel solar com espelhos concentradores.

Os espelhos foram fixados na estrutura por meio de parafusos e tirantes com rosca sem fim, de tal forma que a distribuição das tensões e esforços ocorresse sem causar aumento indesejado de carga nos eixos dos motores. Foram fixados de modo que não ocorresse incidência de luz sobre os sensores detectores de luz solar, evitando assim eventuais erros de posicionamento do painel.

O controle da inclinação da estrutura é feito pelo sistema de acoplamento, mostrado na figura 4.5 (a) e (b), e o controle do giro, pelo sistema de acoplamento mostrado na figura 4.6 (a) e (b).

Os motores utilizados para movimentação nos dois eixos são de corrente contínua de uso em limpador de pára-brisas automotivo.

Cada motor possui um redutor de velocidade acoplado ao eixo, permitindo baixa rotação e impedindo movimentos quando desenergizado, ou seja, ocorre o travamento do módulo quando o mesmo está parado em uma determinada posição, promovendo economia de energia.

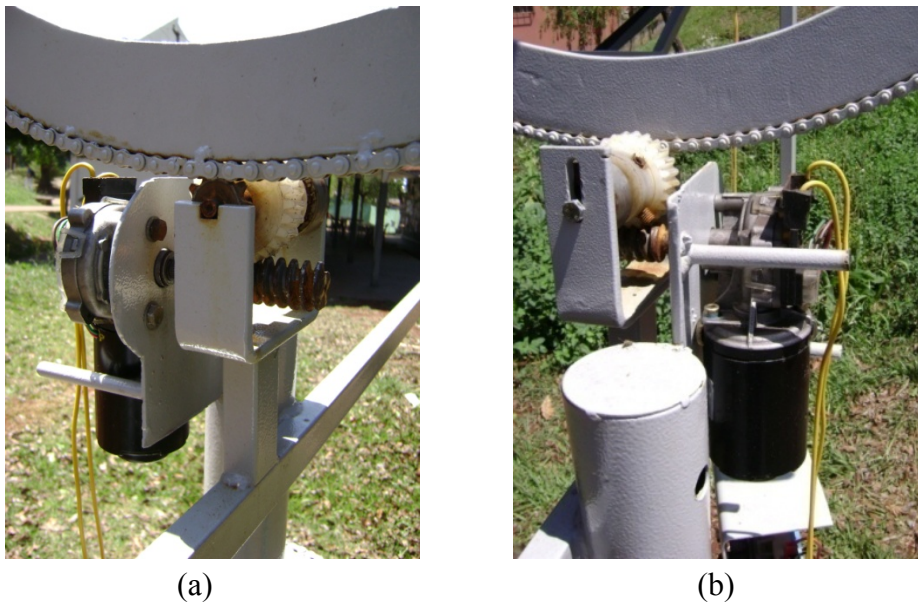


Figura 4.5: acoplamento do motor para controlar a inclinação.

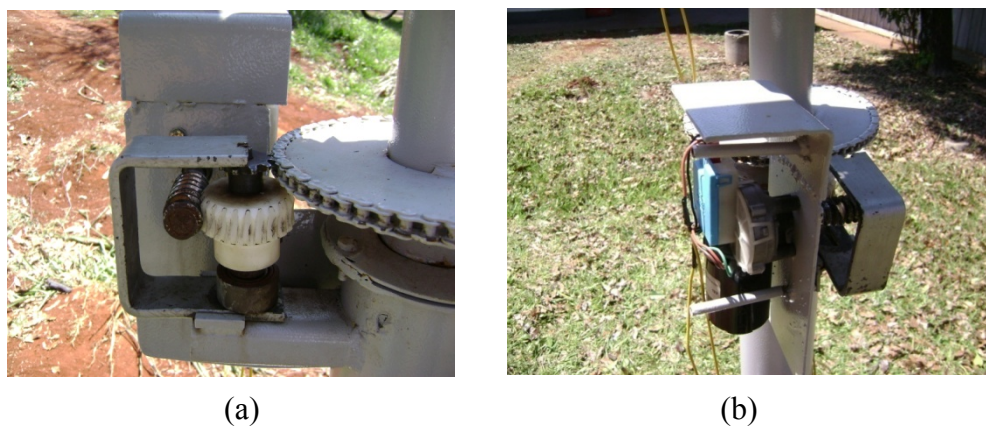


Figura 4.6: acoplamento do motor para controlar o giro.

4.3 – Considerações Finais

Após a realização dos ensaios, percebeu-se que a estrutura suportou todo o peso do sistema (espelhos concentradores e o módulo fotovoltaico) sem apresentar qualquer problema mecânico.

O sistema de acoplamento composto pelo redutor e engrenagens funcionou adequadamente, fazendo uma movimentação lenta e sem solavancos.

O conjunto formado pela estrutura, sistema de acoplamento e sistema de apoio para os espelhos concentradores, não foi projetado por um profissional de engenharia mecânica e mesmo assim funcionou satisfatoriamente.

Capítulo 5

Procedimentos de Projeto

5.1 – Dimensionamento do Inversor para Acionamento dos Motores

O inversor é do tipo *full-bridge* (ponte completa). O dimensionamento do inversor consiste nas seguintes etapas:

- escolha do tipo de núcleo;
- dimensionamento do indutor;

Os cálculos são demonstrados a seguir.

5.1.1 Dimensionamento do Indutor

Dimensionamento do indutor para um núcleo EE 30/15/7, cujos parâmetros são mostrados na tabela 5.1.

Tabela 5.1: Tamanhos de núcleos EE.

Tamanho	$A_p(\text{cm}^4)$	CEM(cm)	$l_e(\text{cm})$	$A_e(\text{cm}^2)$	$A_s(\text{cm}^2)$
20/10/5	0,48	3,8	4,29	0,312	28,6
30/15/7	0,71	5,6	6,69	0,597	34,8
30/15/14	1,43	6,7	6,69	1,2	43,2
42/21/15	4,66	9,3	9,7	1,82	89,1
42/21/20	6,14	10,5	9,7	2,4	97,5
55/28/21	13,3	11,6	12,3	3,54	150
65/33/26	29,1	15,0	14,7	5,32	312

Fonte: Thornton – fabricante de núcleos de ferrite.

Onde:

A_p : fator físico do núcleo determinado pelo produto da área efetiva (A_e) com a área de janela (A_j), que é a área disponível para os enrolamentos;

A_e : área efetiva do núcleo, ou seja, a área pela qual flui o campo magnético;

l_e : caminho magnético efetivo do núcleo;

A_s : área da superfície do núcleo.

Cálculo da energia do indutor:

$$E = \frac{Ku.Kj.B_{\max}}{2.10^4} . 10^{(\log Ap)/z}$$

$$Ku = 0,4$$

$$Kj = 397$$

$$B_{\max} = 0,3$$

$$E = \frac{0,4.397.0,3}{2.10^4} . 10^{(\log 0,71)/1,136}$$

$$E = 1761,97 \mu J$$

Cálculo da indutância:

$$E = \frac{LI^2}{2}$$

$$L = \frac{2.E}{I^2}$$

$$L = \frac{2.1761,97.10^{-6}}{2^2}$$

$$L = 880,985 \mu H$$

Cálculo da indutância do núcleo e da largura do entreferro:

$$Al = \frac{Ae^2 . B_{\max}^2}{2.E}$$

$$Al = 91,94.10^{-9} H / esp^2$$

$$lg = \frac{u_0 . Ae}{Al}$$

$$lg = 0,82 mm$$

Cálculo do número de espiras:

$$N = \sqrt{L/Al}$$

$$N = 97,88 \text{ voltas}$$

Cálculo da bitola do condutor de cobre:

$$J = Kj . Ap^{-0,12}$$

$$J = 413,66 A / cm^2$$

$$A_{cu} = \frac{I_{ef}}{J} = \frac{2}{413,66}$$

$$A_{cu} = 0,00483 cm^2$$

Para esta área de cobre o condutor mais próximo é 20 AWG, que possui área de 0,005176 cm².

5.2 – Dimensionamento dos Circuitos para Isolamento dos Pulsos (*Drives*)

Para o correto acionamento dos semicondutores do inversor, os pulsos devem ser condicionados para que o sinal possua valor de tensão adequado ao *gate* de cada semiconductor e para que os mesmos sejam aterrados isoladamente uns dos outros. Desta forma, torna-se necessário implementar uma interface entre o circuito de controle e o de potência, que é o *drive* para isolação dos pulsos. A figura 5.1 mostra o circuito do *drive* implementado para esta finalidade.

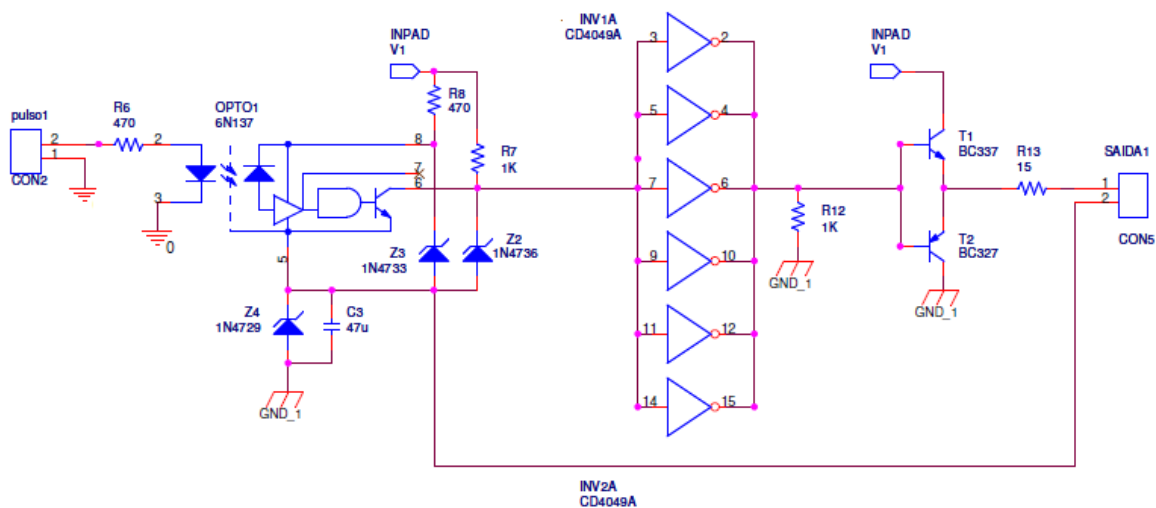


Figura 5.1: Circuito do *drive* para isolação dos pulsos.

O opto acoplador 6N137 recebe o pulso proveniente do comparador PWM no pino de entrada do CI (circuito integrado). Internamente no CI, o diodo emissor de luz presente entre os pinos 2 e 3 faz com que o foto-diodo de saída conduza. O sinal ainda passa por um inversor e então, o *gate* do transistor recebe sinal lógico baixo, entrando em corte. Deste modo, quando há sinal positivo na entrada, a saída do CI apresenta nível lógico baixo. Na ausência de pulso (entrada em nível lógico baixo) o foto-diodo não conduz, o inversor fornece nível lógico alto à base do transistor, que entra em condução e leva a saída para o nível lógico alto.

A tensão de saída do opto acoplador precisa ainda ser manipulada, pois o 6N137 apresenta tensão máxima de saída de 5 V, quando os transistores do inversor necessitam de $V_{GS} \geq 10$ V. A utilização de um inversor CMOS na saída do CI tanto torna adequado o valor de tensão, como também inverte novamente o sinal, deixando o mesmo com forma de onda igual ao gerado pelo comparador PWM. Para excitar o inversor, entretanto, as tensões de referência do opto acoplador são alteradas por meio dos diodos zener DZ1 de 3,1 V e DZ3 de 6,8 V, onde DZ1 aplica tensão de 3,1 V no pino de

referência do circuito integrado, fazendo com que a saída atinja este mesmo valor para saída em nível lógico baixo. Para a saída em nível lógico alto os dois em série aplicam a tensão de 9,9 V.

A escolha do circuito integrado 6N137 se deu devido à necessidade de utilizar um opto acoplador com foto-diodo de alta velocidade para que a forma de onda de saída não fosse deformada na frequência de trabalho. O circuito completo do *drive* para o acionamento dos semicondutores do inversor está mostrado no Anexo C e as formas de onda na saída do opto acoplador são mostradas na figura 5.2.

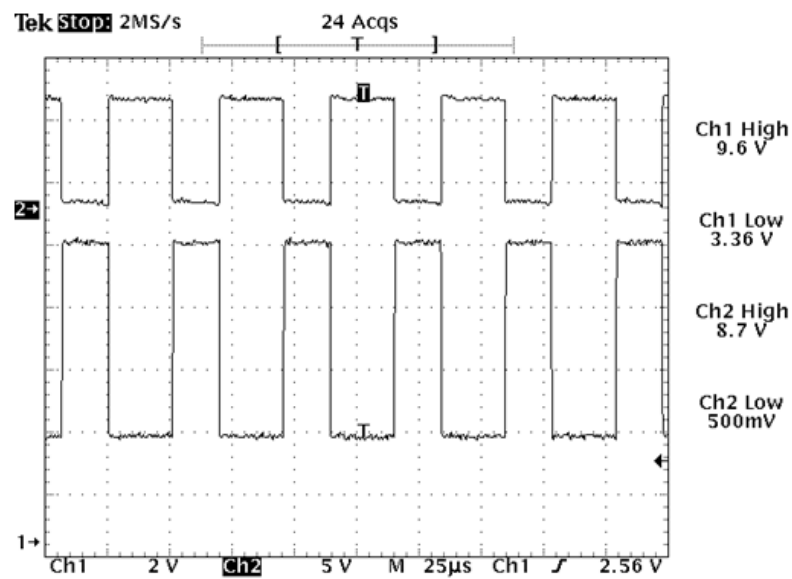


Figura 5.2: Formas de onda na saída do opto acoplador e nos *gates* dos semicondutores do inversor.

Para obter as fontes isoladas para os pulsos das chaves do inversor, utilizou-se um transformador com um enrolamento primário e dois secundários, mostrados na figura 5.3

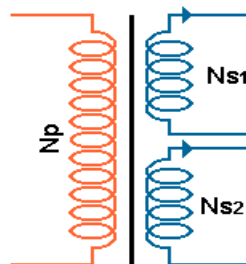


Figura 5.3: Transformador do *drive* isolador de pulsos.

O transformador foi projetado para alimentar o circuito do drive isolador de pulso, sendo alimentado pelo conversor *flyback* com 15 V aplicados no enrolamento primário. Considerando as perdas existentes, os enrolamentos secundários foram projetados para uma tensão de 15 V. Com estas informações e dados sobre as condições de trabalho e os parâmetros físicos do núcleo utilizado, dimensiona-se este transformador, conforme cálculos mostrados a seguir.

Dados necessários para o dimensionamento: $f_s = 25$ kHz e $D_{\text{máx}} = 0,45$

Foi utilizado um núcleo EE 25/10/5, o qual possui as seguintes características construtivas (conforme tabela 1):

- $A_p = 0,48$ cm⁴
- $l_e = 4,28$ cm (ou 42,8 mm)
- $A_e = 0,312$ cm²
- Fator de indutância $A_l = 1300$ nH/esp², valor obtido do fabricante de núcleos de ferrite, Thornton.

Utilizando a equação 5.1, calcula-se a energia armazenada no núcleo (E_m):

$$E_m = \frac{A_e^2 \times B_{\text{máx}}^2}{2 \times A_L} \quad (5.1)$$

Onde $B_{\text{máx}}$ deve ser um valor de densidade do campo magnético que mantenha a permeabilidade constante em condições de variações de temperatura e com campo magnético $H_{\text{máx}}$ aplicado.

Analisando a curva de histerese de um núcleo de ferrite, como a da figura 5.4, e supondo que o núcleo sofrerá uma temperatura máxima de 100 °C, o $B_{\text{máx}}$ utilizável é aproximadamente 250 mT. Considerando um núcleo com entreferro, este valor tende a ser maior devido a inclinação da curva de magnetização. Um valor típico de $B_{\text{máx}}$ que pode ser utilizado é de 300 mT [26].

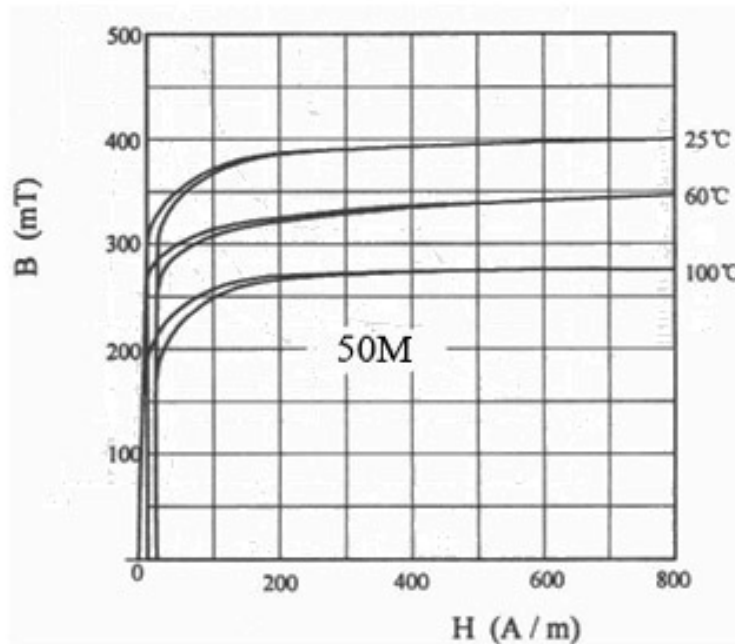


Figura 5.4: Curva de histerese de um núcleo de ferrite.

Desta forma, aplicando os valores na equação 5.1, determina-se o valor da energia armazenada no núcleo (E_m):

$$E_m = \frac{(31 \times 10^{-6})^2 \times (300 \times 10^{-3})^2}{2 \times 1300 \times 10^{-9}}$$

$$E_m = 33,265 \mu\text{J}$$

Sabendo que a frequência de trabalho é de 25 kHz e que o período total de um ciclo é o inverso da frequência de trabalho, então:

$$T = \frac{1}{f_s} = 40 \mu\text{s}$$

Considerando $D_{\text{máx}} = 0,45$:

$$t_{ON} = 0,45 \times 40 \mu\text{s} = 18 \mu\text{s}$$

Para calcular a indutância do enrolamento do transformador considerou-se que a energia armazenada no núcleo (E_m) é igual à energia armazenada pelo indutor, assim pela equação 4.2 tem-se que:

$$E_m = \frac{1}{2} \times L \times I^2 \quad (5.2)$$

Sabe-se que:

$$V_L = L \times \frac{dI}{dt}$$

Ou:

$$I = \frac{V_L}{L} \times t \quad (5.3)$$

Substituindo a equação 5.3 na equação 5.2 e isolando a variável L, encontra-se:

$$L = \frac{1}{2} \times \frac{V^2 \times t^2}{E_m}$$

Onde:

- V: valor de tensão na qual o enrolamento está submetido;
- t: tempo no qual o enrolamento estará submetido à tensão V, ou seja, é o tempo t_{ON} .

Considerando que o enrolamento primário do transformador é alimentado por uma tensão de 15V e que t_{ON} já foi determinado e vale $18 \mu s$, então:

$$L = \frac{1}{2} \times \frac{(15)^2 \times (18 \mu)^2}{33,265 \mu} = 1,129 \text{ mH}$$

Conhecendo o valor da indutância, é possível determinar o número de espiras necessárias por meio da seguinte equação:

$$L = A_L \times N^2 \text{ ou } N = \sqrt{\frac{L}{A_L}}$$

Substituindo os valores de L e A_L , encontra-se:

$$N = \sqrt{\frac{1,129 \text{ m}}{1300 \text{ n}}} \cong 29 \text{ espiras}$$

Também é possível determinar o valor de espiras do enrolamento primário do transformador a partir da fórmula abaixo:

$$N_1 = \frac{V_i \times t_{ON}}{A_e \times \Delta B} = \frac{15 \times 18 \mu}{31 \times 10^{-6} \times 0,3} \cong 29 \text{ espiras}$$

Para calcular o número de espiras do secundário, utiliza-se a relação de transformação, já conhecida:

$$N_2 = N_1 \times \frac{V_2}{V_1} = 29 \times \frac{15}{15} = 29 \text{ espiras}$$

Como os dois secundários são idênticos, ambos possuem 29 espiras.

Para determinar o diâmetro do fio de cobre a ser utilizado, buscou-se conhecer o maior valor de corrente que circulará pelos enrolamentos, que neste caso será a corrente do primário. Assim, pela equação (3):

$$I = \frac{12}{1,095m} \times 18 \mu = 197 \text{ mA}$$

Considerando que esta corrente não é elevada e não circulará constantemente pelos enrolamentos, além do fato do núcleo usado ser relativamente pequeno para o número de espiras enroladas, adotou-se um fio de cobre de bitola 23 AWG.

O circuito das fontes independentes isoladas para os pulsos do inversor é mostrado na figura 5.5.

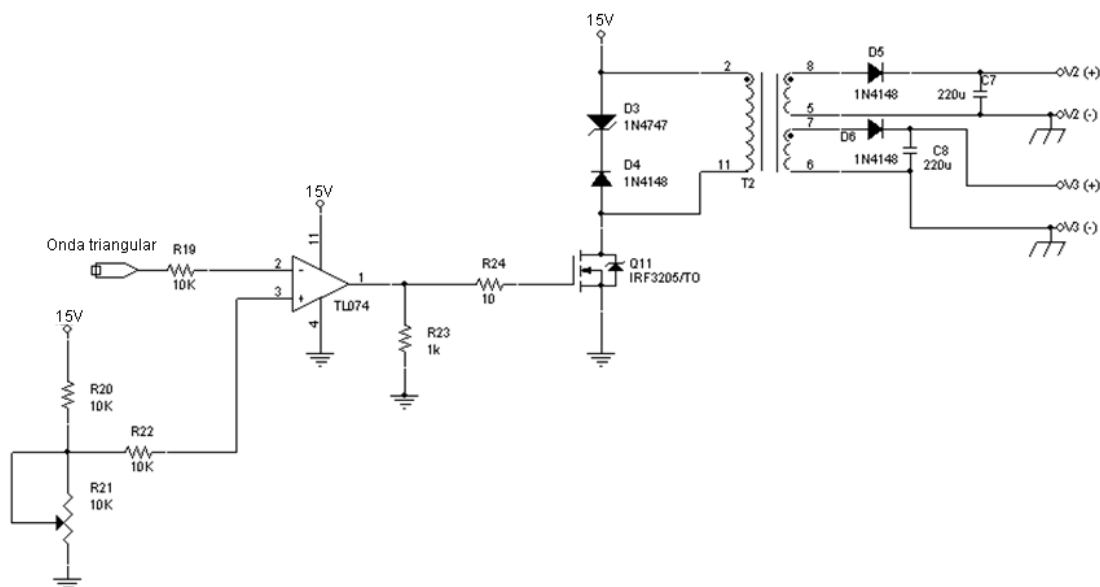


Figura 5.5: Circuito das fontes independentes.

A transferência de potência é realizada pelo transistor IRF3205. O seu ciclo ativo é obtido na comparação entre uma onda triangular com $5 V_{DC}$ e uma tensão DC obtido pelo divisor de tensão R_{20} e R_{21} , variando de 0 V até $V_{CC} = 15$ V.

Em $V_{GS} > 0$ o transistor está em condução e a corrente flui da fonte até o terra por meio do enrolamento primário, devido ao diodo D4 estar reversamente polarizado. A tensão induzida nos enrolamentos secundários polariza diretamente os diodos D5 e D6, suprimindo a carga com corrente e carregando os capacitores C7 e C8, como mostra a figura 5.6.

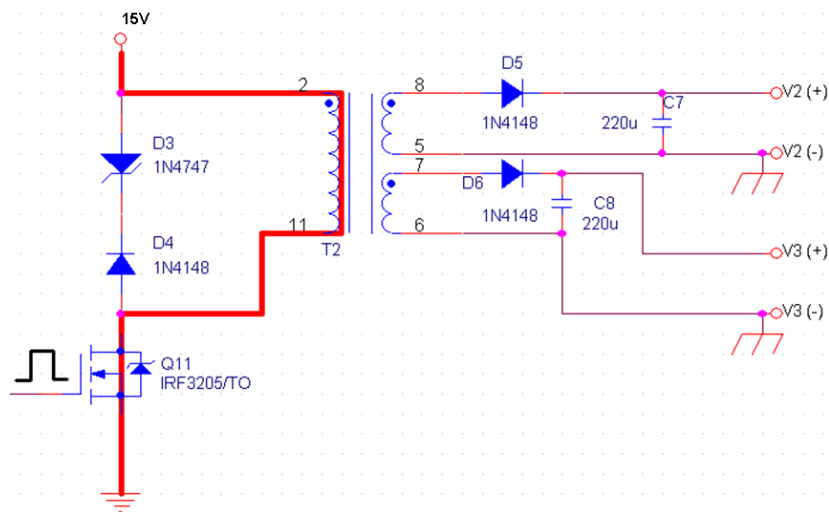


Figura 5.6: Trajeto percorrido pela corrente durante a magnetização do núcleo.

Quando $V_{GS} = 0$ o transistor encontra-se em corte. Nesta situação a tensão sobre o enrolamento primário é invertida graças ao diodo zener e a corrente no primário circula em roda livre pelos diodos, desmagnetizando o núcleo. Nesta situação a tensão na espira primária é dada pela equação 5.4.

$$V_{pri} = 15 - (V_{DZ} + V_{D4} + 15) \quad (5.4)$$

O ciclo ativo máximo está relacionado diretamente à tensão do diodo zener. É necessário que durante um período toda a energia armazenada no núcleo seja descarregada para evitar a saturação do mesmo. Como a energia está ligada à tensão no período de magnetização e desmagnetização e que as tensões são fixas, tem-se que:

$$E_{Mag} = E_{Demag}$$

$$V_{Mag} \cdot D_{Máx} \cdot T = V_{Demag} \cdot (1 - D_{Máx}) \cdot T$$

$$D_{Máx} = \frac{V_{Demag}}{V_{Demag} + V_{mag}} \quad (5.5)$$

O circuito completo das fontes independentes para os pulsos está no Anexo D.

5.3 – Dimensionamento do Conversor *Flyback*

Com o intuito de alimentar o circuito de controle, os circuitos para isolamento dos pulsos (*drives*), os inversores e os motores para posicionamento do módulo fotovoltaico, foi projetado um conversor *flyback* de modo contínuo.

O conversor *flyback* tem seu funcionamento baseado no armazenamento de energia em um indutor. Essa energia é armazenada durante o T_{on} , tempo de duração de condução de um transistor e, durante o T_{off} , tempo de duração do corte do transistor, a energia é transferida para a carga, na saída da fonte [25]. Na figura 5.7 *b* o transistor está saturado e como o diodo está reversamente polarizado, nenhuma corrente flui para a saída, mas flui apenas no indutor e transistor.

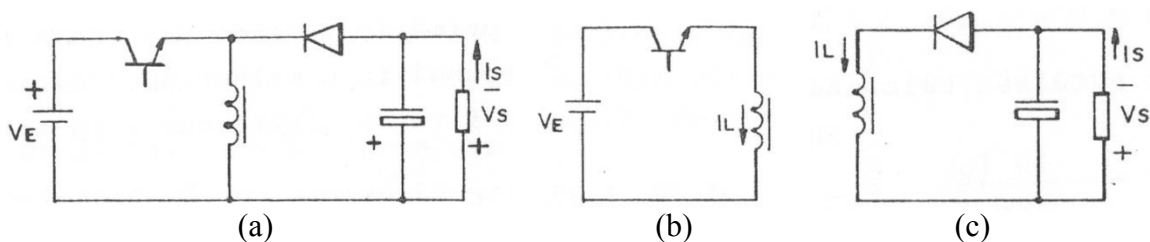


Figura 5.7 – (a) Conversor Flyback, (b) Circuito T_{on} , (c) Circuito T_{off} .

Durante o corte do transistor, figura 5.7 *c*, a corrente que circulava no instante do corte começa a circular pelo diodo e a tensão do indutor inverte de polaridade, de modo a manter a tensão média no indutor igual a zero. A corrente de saída depende da energia que pode ser armazenada no indutor. O capacitor é usado para manter a tensão e corrente de saída constantes, pois a corrente fornecida para carga durante T_{on} do transistor é fornecida por este capacitor.

O conversor *flyback* possui dois modos de funcionamento: contínuo e descontinuo. No modo contínuo a corrente que circula no indutor nunca chega a zero. No modo descontinuo a corrente que circula no indutor chega a zero a cada ciclo de T_{on} - T_{off} , significando que toda a energia armazenada durante o T_{on} do transistor é gasta durante o T_{off} para manter a corrente de saída.

No presente trabalho foi adotado um conversor *flyback* de modo contínuo pelo fato de suas características operacionais serem mais adequadas ao funcionamento do circuito de controle, uma vez que é necessário que este opere ininterruptamente. O circuito do conversor *flyback* implementado está mostrado no Anexo G.

Os parâmetros adotados para o projeto do conversor foram os seguintes:

- tensão de saída: $V_{OUT} = 15 \text{ V}$;
- tensão de entrada: $V_{IN} = 20 \text{ a } 30 \text{ V}$ (pelo fato do painel fotovoltaico apresentar tensão mínima de 24 V e máxima de 30V).
- frequência de operação: $f = 25 \text{ kHz}$;
- razão cíclica máxima: $D_{MAX} = 0,8$;
- corrente de saída mínima: $I_{SMIN} = 800 \text{ mA}$;

Os cálculos para o dimensionamento são os seguintes:

- Relação de espiras do transformador:

$$N = \frac{0.8 \times 20}{(20 + 1.1)(1 - 0.8)} = 3.8$$

- Razão cíclica mínima (D_{MIN}):

$$\frac{15}{30} = \frac{D_{min}}{(1 - D_{min}) \times 3.8}$$

$$D_{min} = 0.66$$

- Núcleo do transformador:

$$L_p \geq \frac{N(1 - D_{min})D_{min}V_{emax}}{2 \times I_{smin} \times f}$$

$$L_p \geq \frac{3.8(1 - 0.66)0.66 \times 30}{2 \times 0.8 \times 25 \times 10^3} \geq 640 \mu\text{H}$$

$$I_m = \frac{I_s}{(1 - D_{max})N} + \frac{D_{máx} \times V_{emin}}{2 \times f \times L_p} = \frac{3.0}{(1 - 0.8) \times 3.8} + \frac{0.8 \times 20}{2 \times 25 \times 10^3 \times L_p}$$

$$I_m = 3.95 + \frac{320 \times 10^{-6}}{L_p}$$

$$E = 3.95 + \frac{320 \times 10^{-6}}{L_p}$$

$$E = \frac{1}{2} L_p I_m^2 = 5.9 \text{ mJ}$$

$$L_p = \frac{11.8 \times 10^{-3}}{I_m^2} = 583 \text{ } \mu\text{H}$$

$$I_m = 3.95 + \frac{16}{50 \times 10^3 \times \frac{11.8 \times 10^{-3}}{I_m^2}}$$

$$I_m = 3.95 + 27.1 \times 10^{-3} \times I_m^2$$

$$27 \times 1 \times 10^{-3} \times I_m^2 - I_m + 3.95 = 0$$

$$I_m^2 - 36.9 \times I_m + 145.75 = 0$$

$$I'_m = 4.5 \text{ A}$$

$$I_m = 3.95 - 0.55 = 3.4 \text{ A}$$

$$6.14 = \left(\frac{2 \times E \times 10^4}{0.3 \times 397 \times 0.2} \right)^{1.136}$$

$$4.94 = \frac{2 \times 10^4 \times E}{23.82}$$

$$E = 5.9 \text{ mJ}$$

$$A_p = 4.16 \text{ cm}^4$$

Deverá ser utilizado o núcleo NEE 42/21/20.

- Número de espiras dos enrolamentos primário e secundário:

$$A_e = 2.40 \text{ cm}^2$$

$$le = 9.7 \text{ cm}$$

$$Al = \frac{(2.4 \times 10^{-4})^2 \times (0.2)^2}{2 \times 4.2 \times 10^{-3}} = \frac{274 \text{ nH}}{\text{esp}^2}$$

$$N_p = \sqrt{\frac{583 \times 10^{-6}}{274 \times 10^{-9}}} \cong 46 \text{ espiras}$$

$$N_s = \frac{46}{3.8} \cong 12 \text{ espiras}$$

- Dimensionamento dos condutores:

$$I_{prms} = \sqrt{\frac{J = 335 \text{ A/cm}^2}{\left[(4.5 \times 3.4) + \frac{(4.5 - 3.4)^2}{3} \right]} \times 0.66}$$

$$I_{prms} = \sqrt{15.7 \times 0.66} = 3.2 \text{ A}$$

- dimensionamento do entreferro:

$$u_e = \frac{Al \times le}{ue \times Ae} = \frac{274 \times 10^{-9} \times 9.7 \times 10^{-2}}{4 \times \pi \times 10^{-7} \times 2.4 \times 10^{-4}} = 88.13$$

$$lg = \frac{le}{ue} = \frac{9.7 \times 10^{-2}}{88.13} = 0.0011 \text{ m} = 1.1 \text{ mm}$$

$$A_{cup} = \frac{3.2}{335} = 0.00955 \text{ cm}^2$$

Foram utilizados 2 condutores de 20 AWG $2 \times 0,005176 = 0,0104 \text{ cm}^2$.

$$A_{cus} = \frac{2.3}{335} = 0,00687 \text{ cm}^2$$

Foram utilizados 2 condutores de 22 AWG $2 \times 0,003255 = 0,00651 \text{ cm}^2$.

A operação do conversor é em malha fechada, pois caso a radiação solar reduza consideravelmente, então a energia gerada também será mínima, inviabilizando a operação do mesmo. Neste caso o circuito de controle, mostrado no Anexo F, limita a operação do conversor e uma bateria auxiliar mantém, quando necessário, a alimentação do circuito de controle, dos *drives*, dos inversores e dos motores para posicionamento do módulo fotovoltaico.

5.4 Considerações Finais

O circuito inversor em ponte implementado, funcionou satisfatoriamente, conforme os parâmetros determinados no dimensionamento.

O conversor *flyback* apresentou durante os testes, saturação do transformador. Para solucionar isto foi necessário implementar um circuito limitador de corrente de saída e um circuito para monitorar a variação de tensão de entrada, pois o painel fotovoltaico apresenta variações significativas de tensão e corrente causadas pela variação da radiação solar incidente. Tais circuitos permitiram que o conversor operasse de forma contínua sem variações rápidas de corrente ou tensão, que ocorriam quando havia leve sombreamento ou céu nublado (decaimento da radiação incidente).

Capítulo 6

Simulações, Coleta de Dados e Resultados

6.1 – Introdução

Neste capítulo são apresentados os procedimentos aplicados para a coleta de dados do sistema fotovoltaico. O objetivo é comparar a eficiência do sistema fotovoltaico gerando energia, inicialmente com o módulo fotovoltaico estático (posicionado em um ângulo fixo) sem auxílio de espelhos concentradores, por um período de tempo, em seguida, gerando energia na mesma condição, porém com auxílio de espelhos e, finalmente, gerando energia com o sistema de controle de rastreamento do Sol. Todas as simulações foram realizadas para geração de energia por um período de 5 dias, no horário das 08:00h às 17:00h, totalizando 45 horas. As simulações realizadas foram as seguintes:

- *Situação A:* o módulo fotovoltaico permaneceu posicionado em um ângulo fixo, sem auxílio dos espelhos concentradores;
- *Situação B:* o módulo permaneceu posicionado em um ângulo fixo com auxílio dos espelhos concentradores;
- *Situação C:* o módulo foi posicionado pelo sistema de controle, ou seja, rastreando a posição do Sol sem o auxílio dos espelhos concentradores;
- *Situação D:* o módulo foi posicionado pelo sistema de controle, ou seja, rastreando a posição do Sol com auxílio dos espelhos concentradores.

6.2 – Configuração do Sistema Fotovoltaico

6.2.1 – Características do Módulo Fotovoltaico

O módulo fotovoltaico utilizado para as simulações possui as seguintes características:

- Fabricante: ISOFOTON S.A. (www.isofoton.com);
- Células: silício monocristalino, texturadas e com capa antirreflexiva;
- Número de células em série: 66;

- Potência máxima (valor de pico) com radiação de 1000 W/m²: 94 Wp ±10%;
- Tensão nominal: 24 V;
- Corrente de máxima potência: 2,94 A;
- Tensão de máxima potência: 32 V;
- Tensão de circuito aberto: 39,6 V;
- Corrente de curto-circuito: 3,27 A;
- Dimensões: 1208 x 640 x 39,5 mm.

6.2.2 – Controlador de Carga

A interface entre carga, módulo fotovoltaico e baterias é um controlador, mostrado na figura 6.1, que gerencia: fornecimento de energia para carga, energia disponível das baterias e desconexão da carga quando as baterias apresentam pouca energia.



Figura 6.1: Controlador de carga Phocos.

O monitoramento constante realizado pelo controlador evita a descarga profunda das baterias, por meio do corte da carga e alarme sonoro. Em condição normal, ou seja, quando a bateria apresenta carga nominal (maior que 80% da capacidade da bateria), o módulo fotovoltaico está em estado de flutuação, ou seja, a bateria fornece energia para a carga e o módulo fotovoltaico opera em circuito aberto (desconectado do sistema). A partir do momento em que a bateria apresentar carga menor que 80%, o módulo fotovoltaico é novamente conectado para iniciar o recarregamento desta. Enquanto houver energia na bateria o controlador monitora o consumo, evitando que a energia disponível reduza a menos de 10% da capacidade da bateria. Quando isto ocorrer, a

carga é desconectada automaticamente, até que haja novamente energia suficiente na bateria para transferir à carga. A configuração do conjunto (módulo fotovoltaico, controlador, baterias e carga) é mostrada na figura 6.2.

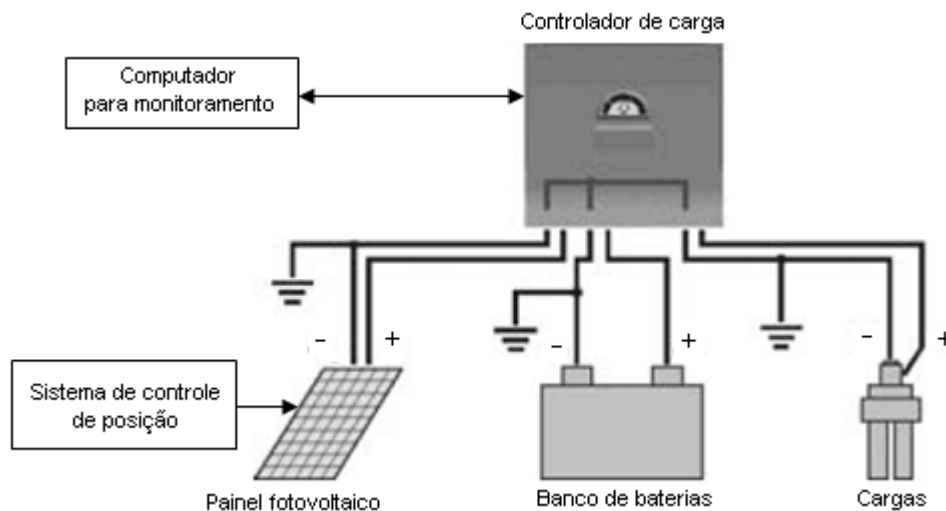


Figura 6.2: Configuração do sistema fotovoltaico.

Além de gerenciar a operação, o controlador possui um registrador de dados que acumula durante 1 ano as informações sobre o desempenho do sistema fotovoltaico, quais sejam:

- Máxima e mínima tensão da bateria;
- Estado da carga da bateria;
- Máxima energia de carregamento, entre outras.

6.2.3 – Interface de Comunicação

A aquisição por computador dos valores medidos foi feita por meio da utilização de uma interface de comunicação conectada ao controlador de carga. Esta interface é o *software* CXOM – Phocos, produzido pela empresa Phocos AG e comercializado pela empresa SS Solar, especializada em sistemas de energia solar fotovoltaica. Os valores foram armazenados em relatórios elaborados pelo programa, que demonstraram a eficiência do sistema em cada situação proposta.

6.3 – Operação do Sistema

Durante o período ensolarado o módulo fotovoltaico gera energia conectado no controlador de carga, que por sua vez monitora o estado das baterias (energia disponível) em função da carga aplicada. Nos ensaios em laboratório, utilizou-se como carga um reostato de $1 \text{ kW} - 5 \Omega$, com corrente de $2,0 \text{ A}$ durante todo o período de simulações.

Neste trabalho, o banco de baterias foi composto por duas baterias de 12 V , conectadas em série para resultar em 24 V (tensão nominal do módulo fotovoltaico). É possível conectar maior número de baterias. Neste caso, o sistema gera energia para manter a carga das baterias e, por meio de um conversor CC-CA, pode-se conectar cargas às mesmas.

A potência do painel fotovoltaico é de 94 Wp , ou seja, valor de pico. Portanto, se o painel apresentasse este valor constantemente, então a potência máxima que o sistema poderia gerar é de 752 Wh . O consumo medido de energia do sistema (circuito de controle, *drives*, pontes H e conversor *flyback*) durante um período ensolarado de 8 horas foi de 108 Wh , o que representa aproximadamente 14% da potência de pico (P_{pico}) que o sistema forneceria no mesmo período.

6.4 – Resultados Obtidos

Os resultados obtidos nas situações propostas são mostrados na tabela 6.1.

Tabela 6.1: Resultados obtidos nas coletas de dados realizadas.

Horário	Potência Gerada (W) em Cada Situação			
	A	B	C	D
08:00h	60.79	62.55	63.50	64.77
09:00h	63.64	66.94	68.10	69.60
10:00h	64.95	69.73	71.25	72.81
11:00h	68.22	71.14	72.66	74.46
12:00h	70.26	71.96	74.07	76.77
13:00h	68.60	71.44	75.04	79.75

14:00h	67.80	70.14	72.14	78.57
15:00h	65.88	69.44	71.06	72.81
16:00h	57.91	64.49	70.41	71.55
17:00h	54.61	61.42	66.33	69.43
Pot. Média (W)	64.27	68.03	70.46	73.05
Porcentagem de Ppico	68,37 %	72,37 %	74,96 %	77,71 %

Os valores obtidos foram medidos em condições climáticas de elevada insolação, porém, em alguns períodos havia céu parcialmente nublado, o que reduziu sensivelmente a energia gerada pelo módulo fotovoltaico.

Mesmo na situação D, na qual o sistema apresentou maior eficiência, houve períodos de céu nublado, o que resultou em uma pequena redução da energia produzida pelo sistema. Vale ressaltar que na região Sul do Brasil ocorrem variações climáticas com alta frequência, que causam pequenas variações da radiação solar incidente, conseqüentemente, alterando o valor da energia gerada pelo sistema.

Deve-se considerar que na região Sul a radiação solar incidente altera-se consideravelmente. A estação em que ocorre maior incidência de radiação é o verão; no inverno ocorre considerável redução, uma vez que acontece mudança do ângulo de inclinação da Terra e também mudanças climáticas frequentes (céu nublado e baixa temperatura).

6.5 – Considerações Finais

O sistema de controle implementado apresentou resultados que corresponderam às expectativas deste trabalho, isto é, verificou-se que um sistema rastreador solar é uma opção melhor que um sistema fixo. Por meio dos resultados obtidos nas simulações observou-se maior aproveitamento da radiação incidente, resultando em maior potência gerada.

Verificou-se que o controlador de carga utilizado gerencia de forma satisfatória a carga das baterias, por meio de indicação sonora quando as baterias estiverem com

carga baixa ou mínima, além de possibilitar o monitoramento do sistema por meio do uso do *software* de interface, que armazena informações para elaboração de relatórios.

Para painéis solares com maior potência, pode-se conseguir maior eficiência energética, ou seja, obter maior potência gerada com o mesmo sistema de controle.

Capítulo 7

Conclusão e Trabalhos Futuros

Verificou-se que é evidente que um sistema de geração com painel solar com controle automático de posição apresenta maior aproveitamento da energia solar no período de maior incidência de luz.

Observou-se que em períodos de máxima insolação o sistema gera potência próxima ao valor de pico que o módulo fotovoltaico é capaz. Em períodos de céu parcial ou totalmente nublado a capacidade do sistema apresenta redução significativa em função da baixa radiação solar incidente. Isto mostra que sistemas fotovoltaicos para geração de energia elétrica são aplicáveis somente em locais com muita insolação durante o ano, pois se houver longos períodos sem insolação, o uso destes torna-se inviável.

Durante o período ensolarado, verificou-se que os LDR's apresentaram mudanças na taxa de variação da resistência, devido à influência da temperatura, porém isto não afetou o rastreamento do Sol pelo circuito de controle.

O consumo medido de energia do sistema (circuito de controle, *drives*, pontes H e conversor *flyback*) durante um período ensolarado de 8 horas foi de 108Wh, o que representa aproximadamente 14% da potência de pico (752 Wh) que o sistema forneceria no mesmo período.

O custo do sistema eletrônico utilizado para controle de posição do painel é relativamente baixo, quando comparado a sistemas microcontrolados, além do fato de terem sido utilizados componentes e dispositivos de fácil manutenção e instalação, sendo que é possível associar outros painéis solares em série ou em paralelo, aumentando a eficiência energética do sistema.

Pode-se afirmar que o sistema desenvolvido neste trabalho apresenta melhores resultados se for utilizado com mais de um painel solar, pois assim a energia gerada é bem maior que a energia consumida pelo circuito de controle, aumentando a eficiência do sistema.

Sugere-se como trabalho futuro a comparação deste sistema (analógico) com um sistema microprocessado, especificamente utilizando microcontroladores. A tecnologia

dos microcontroladores pode ser uma opção que apresente maior rapidez no posicionamento do módulo fotovoltaico, uma vez que nestes sistemas pode-se programar a posição adequada do painel solar em cada horário, entre outras considerações úteis para a otimização da operação do sistema.

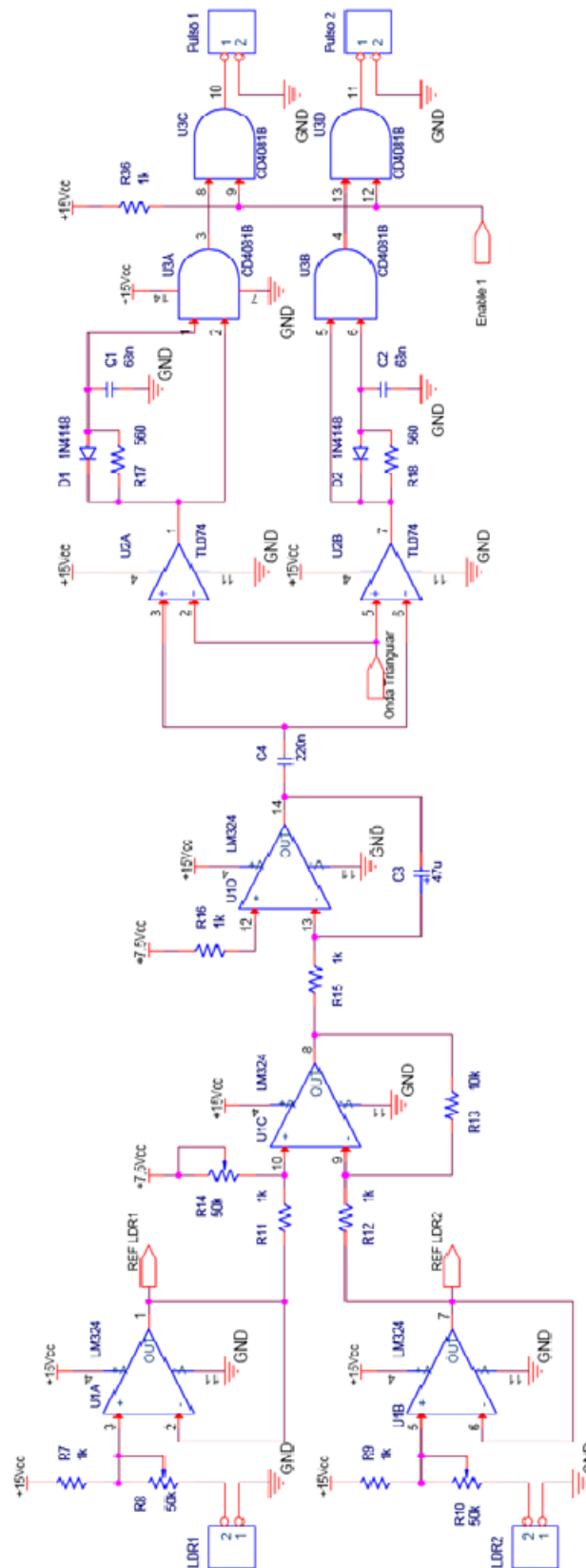
Referências

- [1] Goldemberg J.; Villanueva, L. D. **Energia, meio ambiente e desenvolvimento**. São Paulo: EDUSP, 225p., 2003.
- [2] Agência Nacional de Energia Elétrica, Ministério de Minas e Energia. **Balço Energético Anual – BEN 2004**, 2004. [on line] <http://www.mme.gov.br/>, 2005.
- [3] Stivari, S. M. S.; Oliveira, A. P.; Soares, J. **On the climate impact of the global circulation on the Itaipu lake area**. *Climatic Change*, 72 (1-2): 103-121, 2005.
- [4] Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro**. CEPTEL/ELETOBRAS/Ministério de Minas e Energia. 45p., 2001.
- [5] Tiba, C. **Atlas Solarimétrico do Brasil – banco de dados terrestres**. Recife: Editora Universitária da EFPE, 2000.
- [6] Colle, S.; Pereira, E. B. **Atlas de Irradiação Solar do Brasil – 1ª versão para irradiação global derivada de satélite e validada na superfície**. Brasília: Instituto Nacional de Meteorologia, 1998.
- [7] Pereira, E. B.; Colle, S. **A energia que vem do Sol**. *Ciência Hoje*. 22(130): 24-35. 1997.
- [8] Salamoni, I. T.; Rüter R.. **O potencial brasileiro da geração solar fotovoltaica conectada à rede elétrica: análise de paridade de rede**. IX Encontro Nacional e V Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído – ENCAC. 2007.
- [9] Pereira, E.; Martins F.; Abreu S.; Rüter R. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. INPE, São José dos Campos, 2006.
- [10] Secretaria do Meio Ambiente do Ceará. **RIMA – Relatório de Impacto Ambiental – Central Geradora Solar Fotovoltaica Tauá**. [on line] <http://www.semace.ce.gov.br/2012/05/central-geradora-solar-fotovoltaica-taua/>

- [11] Grupo de Trabalho de Energia Solar Fotovoltaica (CRESESB/CEPEL), **Energia Solar. Princípios e Aplicações**. [on line] <http://www.cresesb.cepel.br>. Acesso em 10 de ago. 2011.
- [12] Burger, A. K. **Next Generation Dye Sensitive & Organic PV, Part 1**. Renewable Energy World, Cadiz, Spain, 24 de jul. de 2008. [on line] <http://www.renewableenergyworld.com/rea/news/story?id=53133>. Acesso em 16 ago. 2011.
- [13] Prime, L. **Luz do Sol Pode Acender Lâmpada**. O Estado de São Paulo, São Paulo, 16 de março de 2008. Construção, C.6, pág.06.
- [14] Reis, A. **Energia solar no Brasil Pode ser Vantajosa até 2013**. [on line] <http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=energia-solar-no-brasil-pode-ser-vantajosa-a-partir-de-2013&id=> . Acesso em 18 de agosto de 2011.
- [15] Hammond, C.R., **The Elements, Handbook of Chemistry and Physics**, Ed. D.R. Lide, CRC Press, Ann Arbor, USA, 1992, p. 4-1
- [16] Shah, A.; Meyer, J.; Tscharnner, R. & Wyrsh, N. **Photovoltaic Power Generation**, Plasma Physics & Controlled Fusion, vol. 37, 1992, p.1837.
- [17] Camacho, J.R.; Guimarães, S. C.; Ferreira, R. S.; Carrijo, D. R. **Uma proposta de técnica de rastreamento do ponto de máxima potência de um painel fotovoltaico**. XVIII Congresso Brasileiro de Automática, 2010, Bonito-MS.
- [18] Montenegro, A.A., **Fontes Não-Convencionais de Energias: Tecnologias Solar, Eólica e de Biomassa**, 3^a ed., Florianópolis, 2000, p. 11-30.
- [19] King, David L.; Boyson, William E.; Kratochivil, Jay A. **Analisis of Factors Influencing The Annual Energy Production Of Photovoltaic Systems**. Albuquerque, NM: Sandia National Laboratories, 1996.

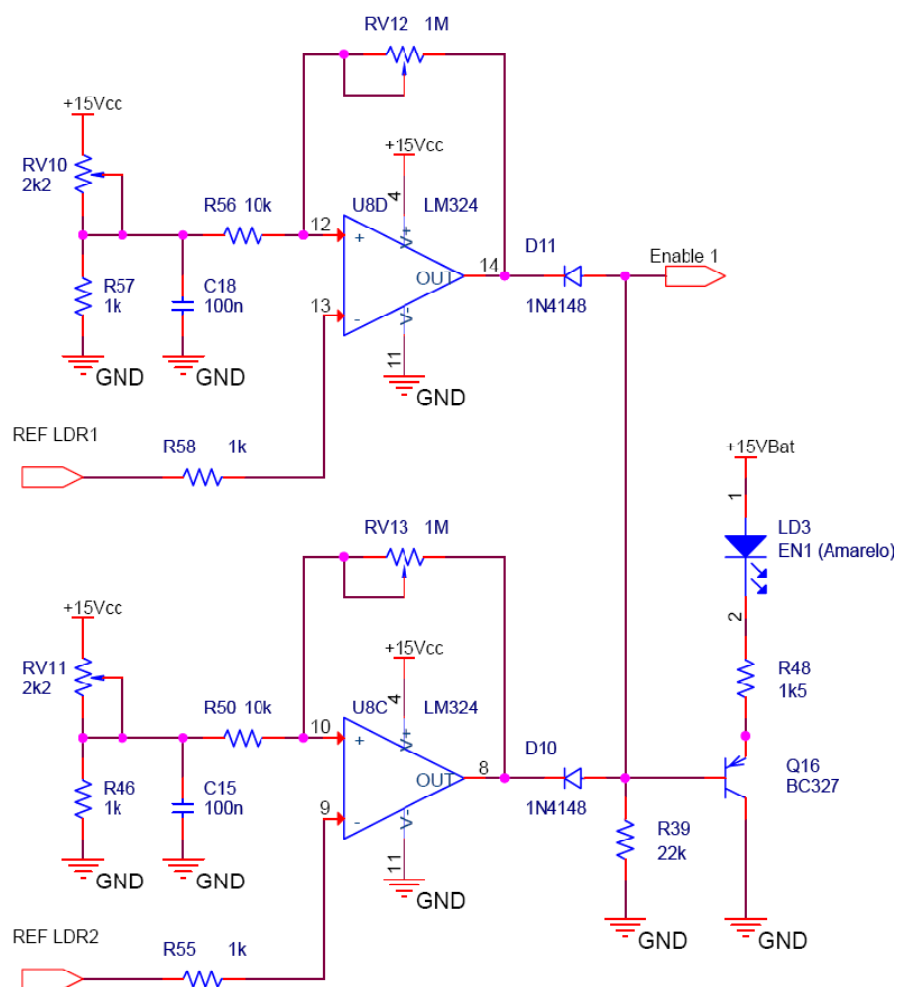
- [20] Tessaro, A. R., **Desempenho de um Painel Fotovoltaico Acoplado a um Rastreador Solar**. Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2006.
- [21] CRESESB, **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**, Rio de Janeiro, 1999. [on line] [http:// www.cresesb.cepel.br](http://www.cresesb.cepel.br).
- [22] Barbi, I.; Martins, D. C. **Eletrônica de Potência – Introdução ao Estudo dos Conversores CC-CA**. Florianópolis: Edição dos Autores, 2008.
- [23] Ahmed, A. **Eletrônica de Potência**. Prentice Hall, São Paulo, 2001.
- [24] Rashid, M. H. **Eletrônica de Potência: Circuitos, Dispositivos e Aplicações**. São Paulo: Makron Books, 1999.
- [25] Mello, L. F. P. **Projetos de Fontes Chaveadas**. São Paulo, Érica, 1987.
- [26] Pertence, Jr., A. **Amplificadores Operacionais e Filtros Ativos**. 3ª Ed. São Paulo: Mc Graw Hill, 1988.
- [27] Marinoski, D. L.; Salamoni, I. T.; Rüter, R.; **Pré-dimensionamento de sistema solar fotovoltaico: estudo de caso do edifício sede do CREA-SC**. I Conferência Latino-Americana de Construção Sustentável e X Encontro de Tecnologia do Ambiente Construído, 18 – 21 de julho 2004, São Paulo. ISBN 85-89478-08-4.
- [28] Borges, E.; Klaus, W.; Monteiro, C.; Schwab T.; **Sistemas Fotovoltaicos Domiciliares – Teste em Campo de um Modelo Sustentável de Eletrificação Rural**. II CBEE – Congresso Brasileiro de Eficiência Energética, 2009, Vitória, ES. Paper N°: 070730.

Anexo A – Circuito de controle de posição.



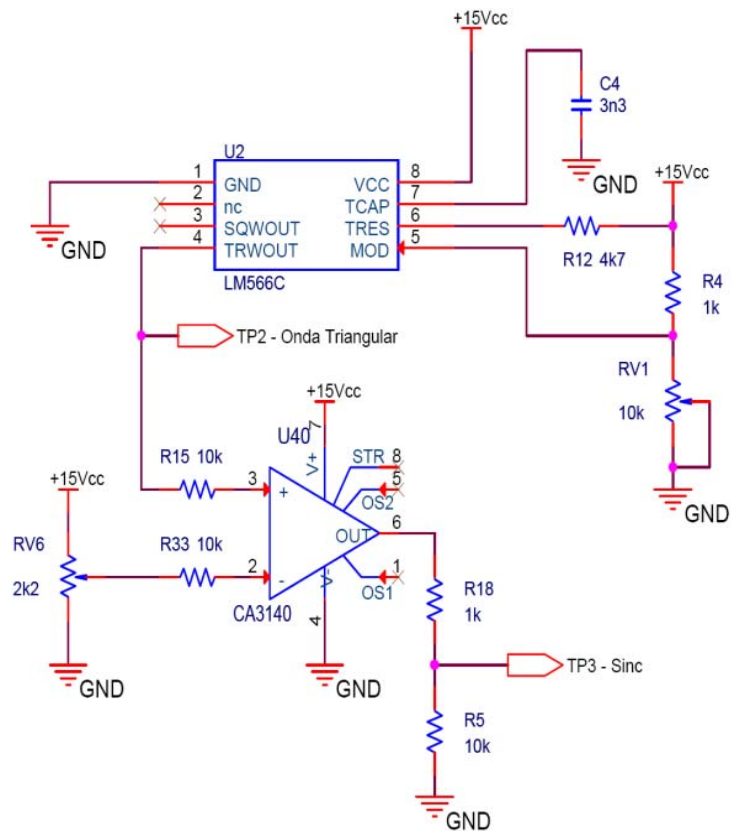
Circuito de controle do giro do sistema fotovoltaico.

Anexo B – Circuito limitador de luminosidade

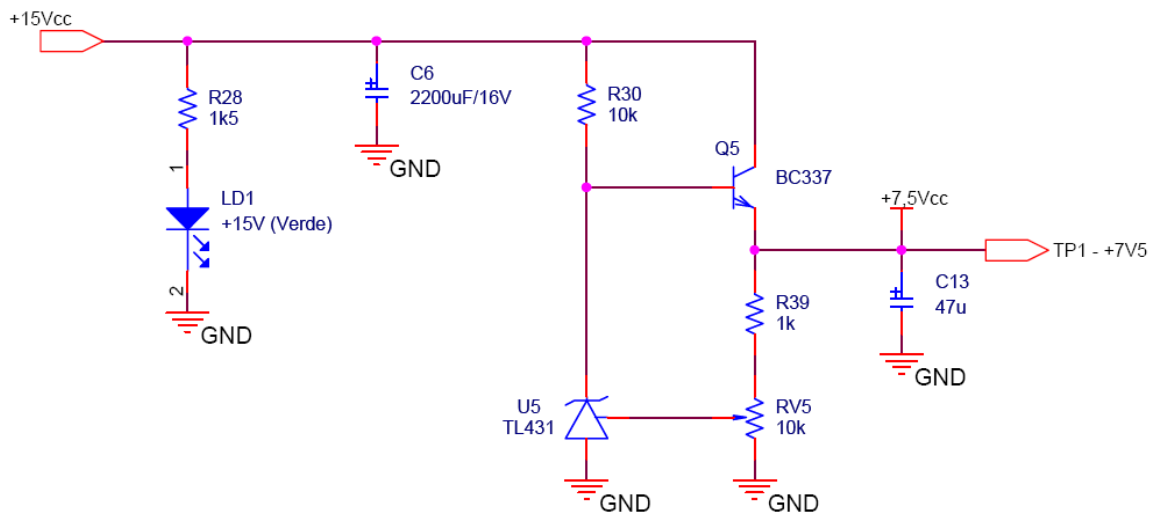


Circuito limitador de luminosidade *Enable 1*.

Anexo C – Circuitos auxiliares.

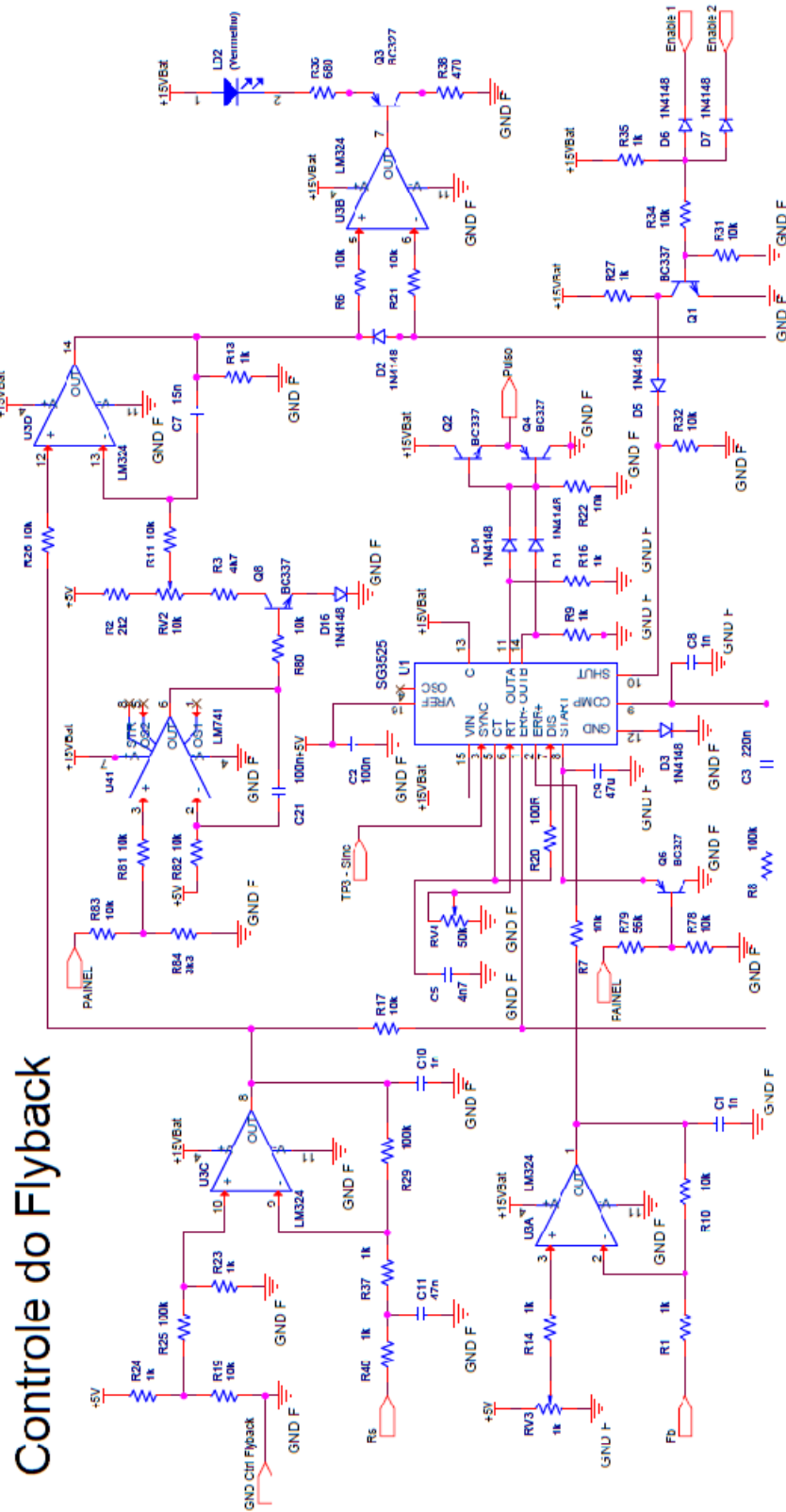


Circuito para geração de onda triangular.



Circuito para geração da tensão de *offset*.

Anexo F – Circuito de controle do conversor *flyback*.



**Anexo H – Artigo relacionado ao trabalho publicado em
congresso**

MÓDULO DE BAIXO CUSTO PARA POSICIONAMENTO DE PAINÉIS SOLARES

Carlos Henrique Gonçalves Treviso, Cristiano Rossi, Julio Cesar Guimarães, Regis Trojan.

*UEL – Universidade Estadual de Londrina
DEEL – Departamento de Engenharia Elétrica
Rodovia Celso Garcia Cid – PR445, Km 380, CEP86051-980, Londrina – PR.*

Abstract: This work presents a project of an analog electronic system with low cost, developed with a PWM circuit control to a H-bridge inverter operating two motors, which will drive a sun-tracking device to position solar photovoltaic panel, to keep the solar panel oriented directly to the sun. In order to increase its efficiency generating electrical energy. *Copyright © 2011 CBEE/ABEE*

Keywords: efficiency energy, control system, photovoltaic energy.

Resumo: Este trabalho mostra o projeto de um sistema eletrônico analógico de baixo custo e baixo consumo de energia, composto por uma lógica de controle PWM para inversor em ponte H, acoplado a dois motores que serão utilizados para posicionamento de um painel solar em dois eixos, permitindo que o mesmo permaneça posicionado perpendicularmente ao Sol durante todo o ano, aumentando o aproveitamento da energia solar.

Palavras Chaves: energia fotovoltaica, eficiência energética, controle de posição.

1 INTRODUÇÃO

Segundo o *U.S. Department of Energy*, por meio do relatório *International Outlook, 2006 (IEO)*, da *Energy Information Administration (EIA)*, o consumo global de energia crescerá a uma média de 2% ao ano entre 2003 e 2030. Tratando-se especificamente de energia elétrica, o crescimento se dará a uma média de 2,7% ao ano, passando de 14,781 bilhões de kWh em 2003 para 21,699 bilhões de kWh em 2015 e 30,116 bilhões de kWh em 2030 [1].

O contínuo crescimento da demanda por energia associado ao rigor das normas de proteção ao meio-ambiente têm contribuído consideravelmente para o aumento do interesse e desenvolvimento de fontes renováveis de energia, como a tecnologia de geração por painéis solares [2].

Anualmente o Sol irradia o equivalente a dez mil vezes a energia consumida pela população mundial neste mesmo período. A evolução tecnológica da produção de células fotovoltaicas tem reduzido o custo das mesmas, tornando um tipo de alternativa cada vez mais utilizada para geração de energia.

A produção de energia de um painel solar é relacionada diretamente à incidência de radiação solar

sobre a placa. Atualmente, os painéis solares apresentam rendimento entre 10% e 20%. Em novas tecnologias como a superposição de semicondutores de diferentes materiais, o rendimento chega a 40,8% [3], mas o custo de produção ainda é elevado, tornando inviável a comercialização. Uma técnica utilizada em painéis estáticos é posicioná-los com inclinação igual ao ângulo da latitude da localidade, o que aumenta em até 15% a produção de energia em relação à posição horizontal [4]. Já a utilização de módulos móveis pode aumentar em até 23% a produção anual de energia para um eixo de movimentação e até 33% para dois eixos [4], dependendo da precisão do sistema e do local (países com as quatro estações bem definidas apresentam maiores ganhos [5]).

Do exposto acima, este trabalho apresenta o projeto de um sistema para controle de posição de um painel solar em dois eixos, de baixo custo e baixo consumo de energia, composto por um circuito de controle analógico, formado por um circuito de controle PWM (*pulse width modulation*), modulação por largura de pulso, acoplado a um inversor em ponte H, cuja carga é constituída por dois motores que movimentarão o módulo de posicionamento do painel solar, para que o mesmo permaneça posicionado perpendicularmente ao Sol, melhorando a eficiência da geração de energia.

Os resultados foram obtidos por meio da implementação do sistema e medição da potência gerada pelo painel solar parado em um ângulo fixo e, em outra condição, acompanhando o Sol perpendicularmente.

2 CIRCUITO DE CONTROLE

O controle de posição do painel é constituído por um circuito que localiza a posição do sol através de sensores sensíveis à luz, fornece aos transistores do inversor tipo *full-bridge* (ponte-completa) os pulsos de excitação e, por sua vez, aciona os motores que posicionam o painel solar perpendicularmente ao Sol. O diagrama da figura 1 ilustra as etapas de controle do circuito para que se obtenha o correto posicionamento do painel solar e os circuitos para obtenção dos pulsos para o circuito de controle estão ilustrados no Anexo I, figuras 8 e 9(a e b).

De posse das tensões sobre os sensores, um amplificador diferencial (subtrator) compara os valores e obtém-se na saída uma tensão igual à diferença entre os sinais aplicados, multiplicada por um ganho, situação suficiente para saber o quão diferente está a incidência de sol nos sensores: quanto mais perto da tensão de referência (5V), mais direcionado perpendicularmente à fonte de luz está o painel, pois os níveis de iluminação nos dois sensores são bem próximos.

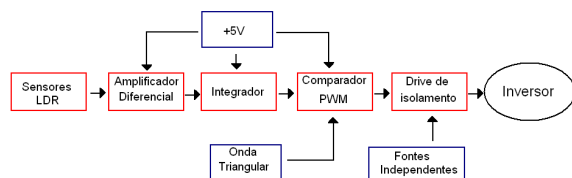


Figura 1: Diagrama de blocos do circuito de controle.

Como o circuito opera em malha fechada somente através da ação de controle integral, com o objetivo de permitir a implementação por meio de um circuito eletrônico de baixo custo, sendo que haverá sempre o monitoramento da posição do painel ao longo do dia. A demanda do circuito de controle é de aproximadamente 6W, valor baixo se comparado com o rendimento do sistema, tornando viável comercialmente o sistema.

2.1 Sensor LDR

Como o intuito do projeto é posicionar o módulo solar perpendicularmente ao Sol, os pulsos do inversor devem ser obtidos baseados na distribuição da incidência de luz no painel solar. A obtenção da informação sobre a irradiação de luz no ambiente é feita por meio de sensores LDR, posicionados próximos à superfície da placa solar. O LDR é um componente cuja resistência varia entre poucos ohms até, aproximadamente, 60 kΩ. Utilizando o sensor em um divisor de tensão, são obtidos valores de tensão

relacionados linearmente à potência do estímulo luminoso. Com dois sensores LDR, pode-se obter a iluminação em dois pontos diferentes, informação suficiente para saber se a fonte de luz está posicionada a direita ou a esquerda da placa. A configuração dos sensores é mostrada na Figura 2a e 2b.

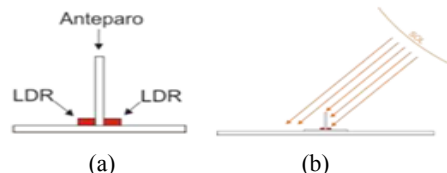


Figura 2: Sensores LDR's.

Havendo uma diferença de incidência de luz nos LDR's, os mesmos apresentarão valores de resistências diferentes, gerando níveis de tensão distintos em seus terminais. O controle receberá a diferença de tensão dos dois sensores, gerando sinais PWM para comando do inversor e assim, posicionar o módulo perpendicularmente ao Sol.

2.2 Sinal PWM (pulse width modulation)

A geração do sinal PWM é feita através da comparação do sinal de saída do integrador com uma onda triangular de 20 kHz (frequência não audível ao ser humano) quando o sinal do integrador possui valor maior que a onda triangular, neste caso o circuito de controle ativa as chaves ímpares (M1 e M3) do inversor (figura 4) e, se o sinal possui valor menor que a onda triangular, ativa as chaves pares (M2 e M4). A frequência de corte utilizada foi de 25kHz pelo fato de não ser audível pelo ser humano, não gerando ruídos indesejáveis. As formas de onda obtidas neste tipo controle são mostradas na figura 3.

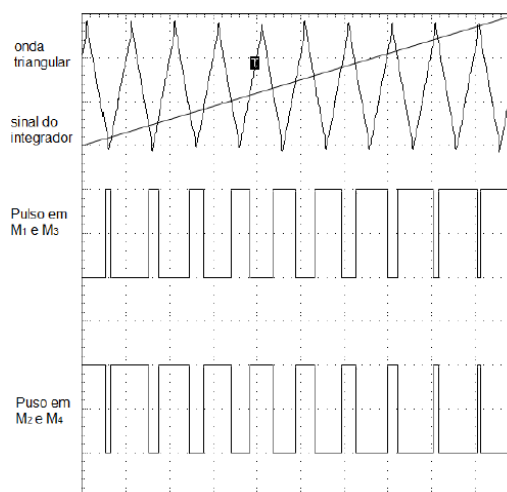


Figura 3: Comparação do sinal PWM com onda triangular e formas de onda dos sinais nas chaves de controle do inversor.

2.3 Inversor

Para controlar o sentido de rotação dos motores foi utilizado um inversor (conversor CC-CA, conforme figura 4), cuja função básica é transformar, a partir de uma fonte contínua, um sinal de saída alternado de valor médio nulo, simétrico em amplitude e frequência constante. O modelo de inversor empregado neste projeto é o inversor de fonte de tensão em ponte-completa, monofásico, conforme figura 10 do anexo A, que a partir de um banco de bateria ($12 V_{DC}$) fornecerá na saída uma tensão de 0 a 12V (forma de onda quadrada), cuja frequência varia conforme a modulação PWM de 0 a 20kHz.

Com a utilização de quatro transistores MOSFET's (*metal oxide semiconductor field effect transistor*) o funcionamento consiste em disparos cruzados dos transistores, ou seja, M1 conduz simultaneamente com M3 e M2 conduz simultaneamente com M4.

Caso os dois transistores do mesmo braço conduzissem simultaneamente, M1 com M4 ou M2 com M3, resultaria em um curto-circuito. Para que isso não aconteça, os transistores são cortados por um curto período de tempo, por meio de um circuito isolador dos pulsos, mostrado na figura 9 (a e b) do Anexo I, não havendo tensão na saída.

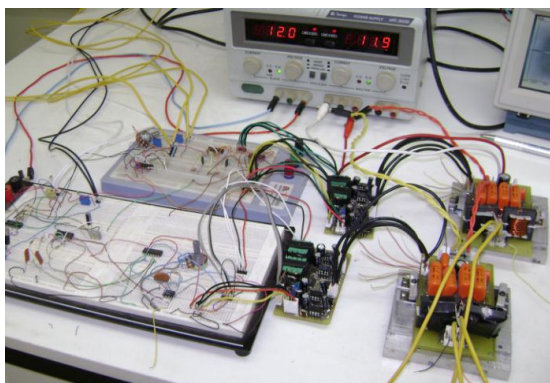


Figura 4: Inversor implementado com o circuito de controle.

Para que não houvesse variações bruscas em frequências acima da frequência de corte, foi implementado um filtro passa-baixa com frequência de corte de aproximadamente 120 Hz. Nesta frequência de corte a atenuação é de 3dB e a partir deste ponto a atenuação é de 40dB/dec e com isso, para altas frequências ocorrem pequenas variações da tensão da carga.

2.4 Estrutura Mecânica

Inicialmente, foi implementado um protótipo a base de madeira, com um eixo fixo para sustentar o suporte do painel solar. O suporte foi confeccionado de madeira devido à facilidade de encontrar este material e a sua fácil manipulação, conforme mostrado na figura 5.

O protótipo foi montado para analisar a viabilidade da movimentação do painel solar em um eixo móvel,

movimentado por um motor conectado através de duas cremalheiras, conforme a figura 6.

O motor utilizado tem potência nominal de 12W e, conforme medições, consome aproximadamente 9W para operar o sistema. Foi instalado o mais próximo possível do suporte a fim de reduzir o tamanho do conjunto, facilitar o encaixe e reduzir as perdas na transmissão do torque.



Figura 5: Protótipo utilizado inicialmente – vista lateral.

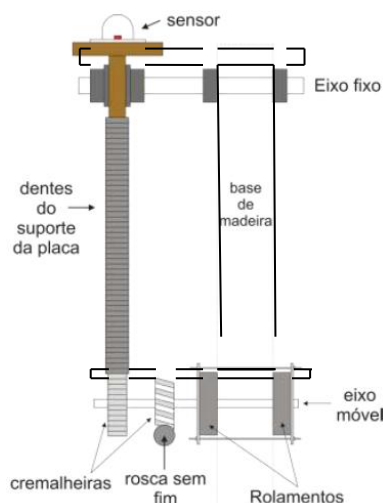


Figura 6: Sistema mecânico de transmissão.

Após testes realizados em bancada de laboratório e ajustes no circuito de controle, foi elaborado o sistema para movimentação em dois eixos com estrutura para apoio do painel solar, formada por uma base que permite o posicionamento adequado do painel.

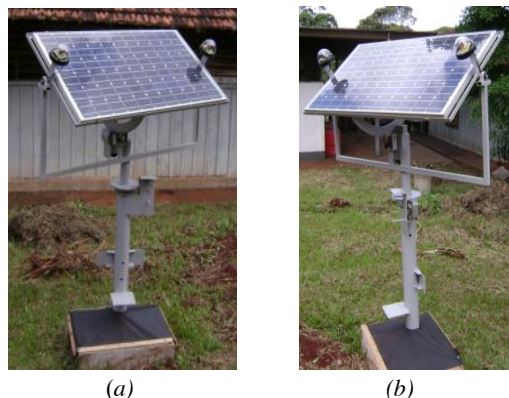


Figura 7: Estrutura mecânica com painel solar.

O sistema possui dois motores: o primeiro gira a base e o segundo muda o ângulo de inclinação do painel solar, conforme o circuito de controle detecta através dos sensores a posição do Sol. A figura 7(a e b) mostra a estrutura montada.

A potência máxima do painel é de 97W e tensão nominal de 24V_{DC}. Os sensores estão posicionados sobre o painel para detectar com maior precisão a posição do Sol, facilitando o controle de posição do mesmo.

3 RESULTADOS PRELIMINARES

O objetivo é comparar a eficiência do módulo solar gerando energia, inicialmente com o painel solar posicionado em um ângulo fixo por período de tempo e, em seguida, gerando energia durante o mesmo período de tempo, porém com o painel acompanhando o deslocamento do Sol. As situações realizadas foram as seguintes:

- *Situação 1:* geração de energia por um período de 5 dias, no horário das 08:00h às 17:00h, totalizando 45 horas, sendo que o painel permaneceu posicionado em um ângulo fixo, ou seja, sem movimentação para acompanhar o deslocamento do Sol.
- *Situação 2:* geração de energia por um período de 5 dias, no horário das 08:00h às 17:00h, totalizando 45 horas com o painel posicionando-se conforme o deslocamento do Sol, ou seja, perpendicularmente ao Sol durante todo o período da simulação.

A potência do painel utilizado é de 97W, 24V_{DC} com um banco de bateria.

Os resultados são mostrados nas tabelas 1 e 2.

Tabela 1: Potência gerada com o painel solar posicionado nas situações propostas

Horário	Potência Gerada (W)	
	Situação 1	Situação 2
08:00h	53,7	86,7
09:00h	66,6	93,4
10:00h	82	96,4
11:00h	93	96,5
12:00h	96,7	96,8
13:00h	96,8	96,8
14:00h	96,6	96,8
15:00h	91,4	96,6
16:00h	82	96,5

17:00h	64	96,0
Pot. Média (W)	82,28	95,25

4 CONCLUSÃO

Verificou-se que é evidente que um sistema de geração com painel solar com controle automático de posição apresenta maior aproveitamento da energia solar no período de maior incidência de luz.

A potência média gerada com o painel em uma posição fixa foi de 82,85W, enquanto que o mesmo sistema, porém com o módulo solar acompanhando o deslocamento do Sol, gerou uma potência média de 95,04W, valor mais próximo da máxima potência de geração do painel utilizado.

O custo do sistema eletrônico utilizado para controle de posição do painel é relativamente baixo, pelo fato de terem sido utilizados componentes e dispositivos de fabricação nacional de fácil manutenção e instalação, além do fato de que é possível associar outros painéis solares em série ou em paralelo, aumentando a eficiência energética do sistema.

5 REFERÊNCIAS

- [1] *International Energy Outlook 2006. Energy Information Administration*, Washington, jun. 2006. Disponível em: <http://www.eia.doe.gov/oiaf/aeo/index.html>. Acesso em 11 de abril de 2011.
- [2] Huang-Jen Chiu, Yu-Kang Lo, Chun-Jen Yao, Ting-Peng Lee, Jian-Min Wang, and Jian-Xing Lee. *A Modular Self-Controlled Photovoltaic Charger With InterIntegrated Circuit (I²C) Interface*. IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 26, N^o. 1, March 2011.
- [3] Johnson, George. *Plugging Into The Sun*. National Geographic. 2009, setembro: pag. 28 a 53.
- [4] King, David L.; Boyson, William E.; Kratochvil, Jay A. *Analisis of Factors Influencing The Annual Energy Production of Photovoltaic Systems*. Albuquerque, NM: Sandia National Laboratories, 1996.
- [5] Amin, Nowshad; Yung, Wong Chin; Sopian, Kamaruzzaman. *Low Cost Single Axis Automated Sunlight Tracker Design for Higher PV Power Yield*. Malaysia: Dept. of Electrical Electronic and System Engineering, 2008.

ANEXO I

Circuitos para Um Eixo de Movimento do Painel

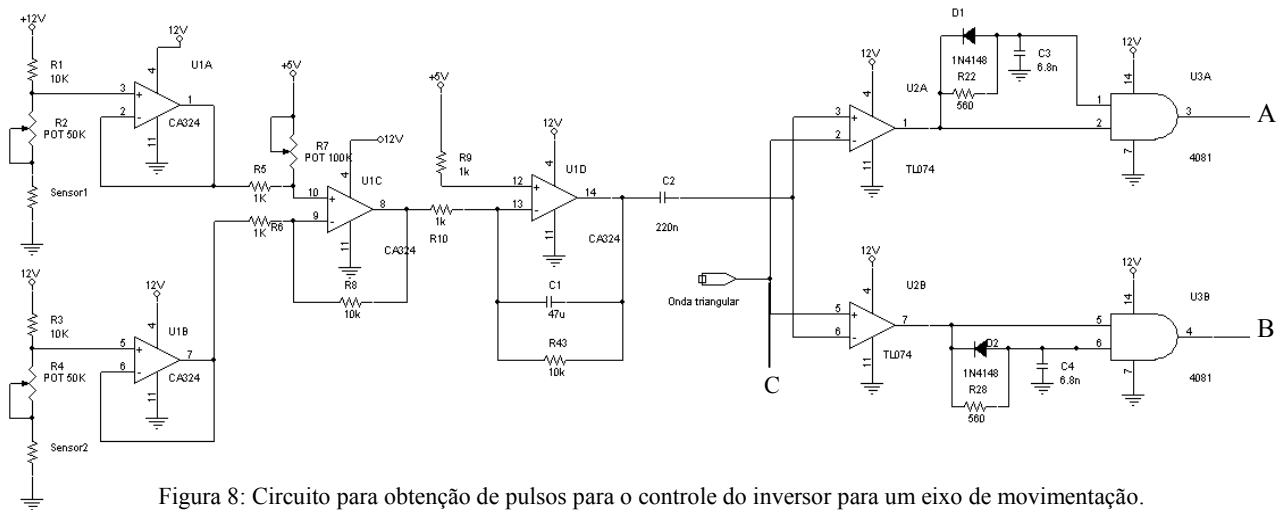


Figura 8: Circuito para obtenção de pulsos para o controle do inversor para um eixo de movimentação.

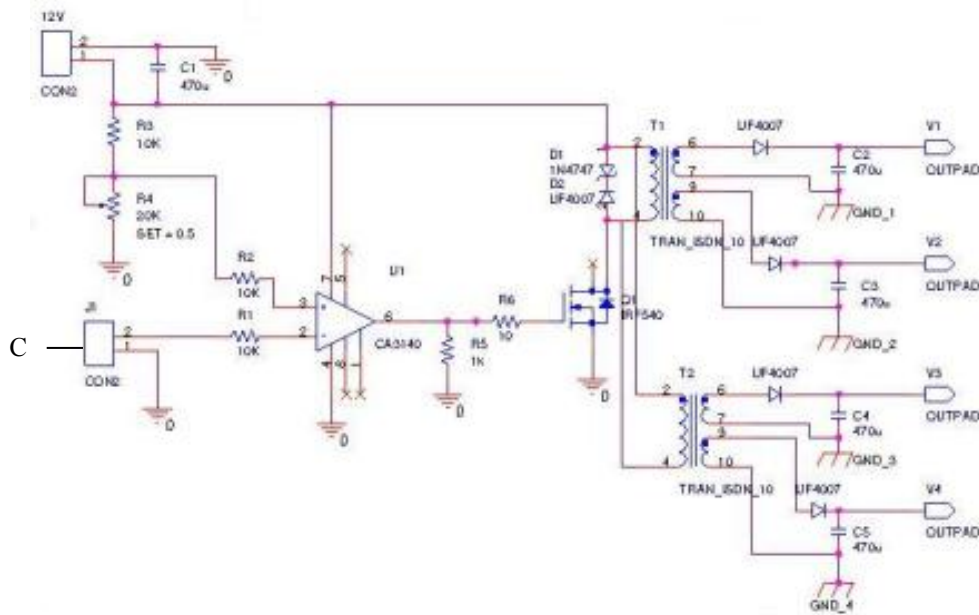


Figura 9a: Circuitos para isolação dos pulsos para o controle dos MOSFET's do inversor.

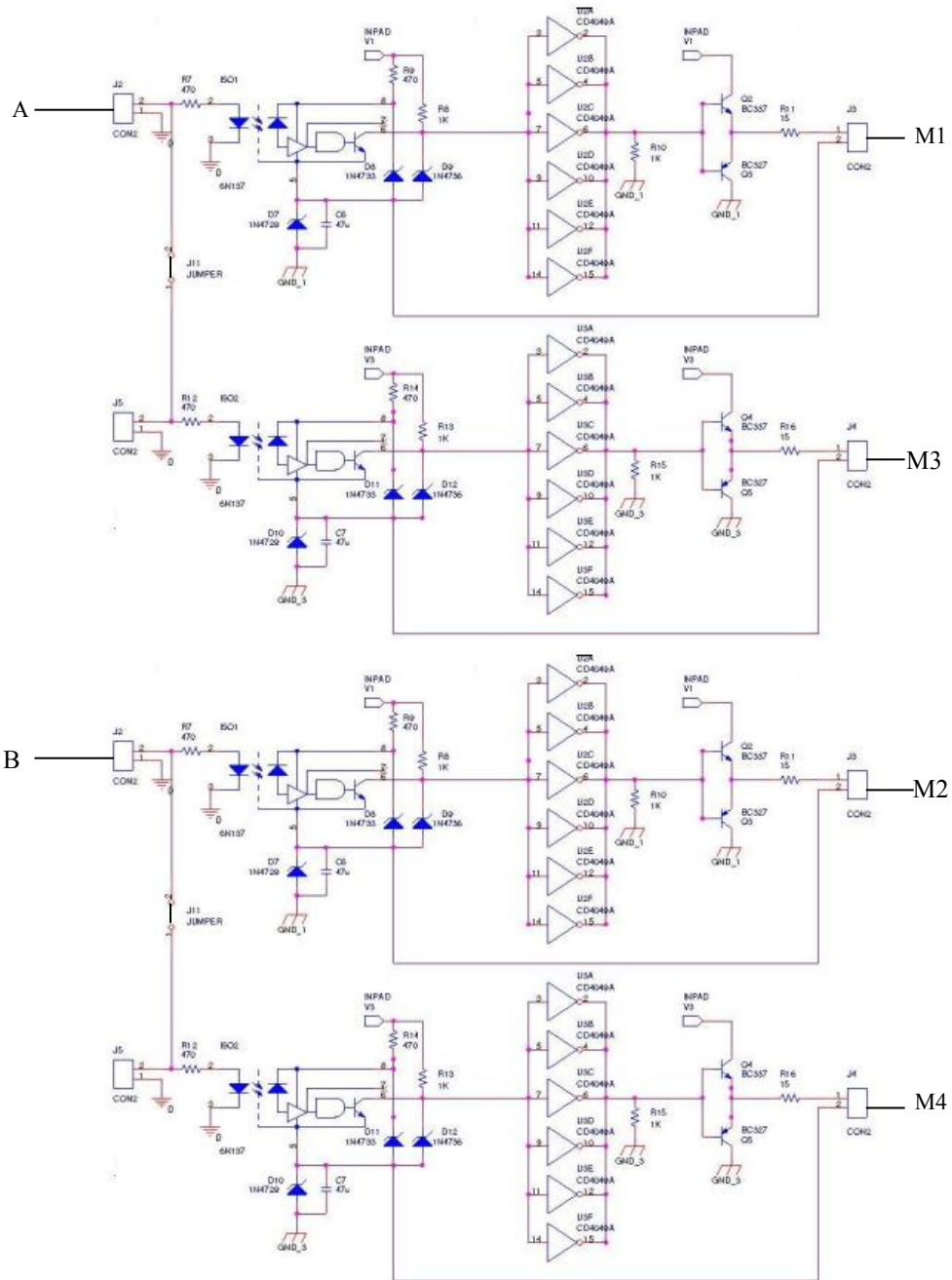


Figura 9b: Circuitos para isolamento dos pulsos para o controle dos *MOSFET*'s do inversor.

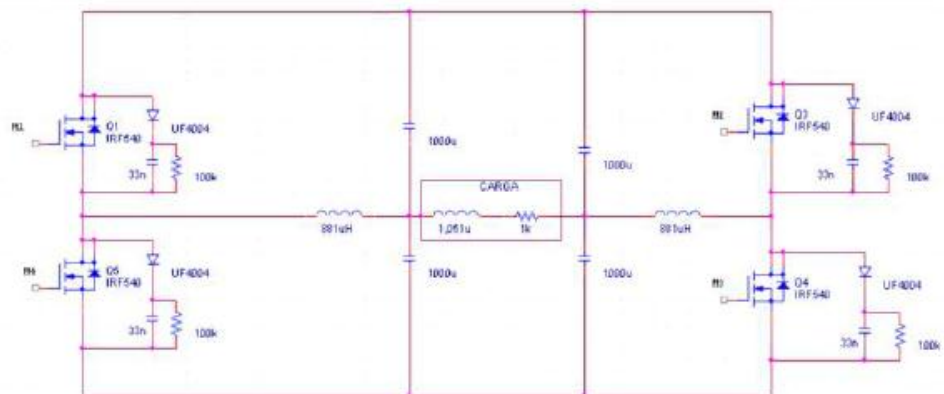


Figura 10: Circuito do inversor do motor.