



UNIVERSIDADE LUTERANA DO BRASIL
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA



GILBERTO DAVI NUNES FILHO

Desenvolvimento de protótipo para controle da posição de um gerador fotovoltaico e sistema de otimização da geração de energia através de um seguidor de máxima potência.

Canoas, Setembro de 2008



GILBERTO DAVI NUNES FILHO

**Sistema de Seguimento do Movimento Aparente do Sol e
Controle do Ponto de Máxima Potência de um Gerador
Fotovoltaico**

.

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Departamento de
Engenharia Elétrica da ULBRA como um
dos requisitos obrigatórios para a obtenção
do grau de Engenheiro Eletricista

Departamento:

Engenharia Elétrica

Área de Concentração

Acadêmicos de Engenharia Elétrica

Professor Orientador:

Dr. Eng. Eletr. João Carlos Verneti dos Santos – CREA-RS: 45282

Local: Canoas

Ano: 2008



FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome do Autor: Gilberto Davi Nunes Filho

Matrícula: 021000316-8

Título: Sistema de Seguimento do Movimento Aparente do Sol e Controle do Ponto de Máxima Potência de um Gerador Fotovoltaico

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da ULBRA como um dos requisitos obrigatórios para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista

Professor Orientador:

Dr. Eng. Eletr. João Carlos Verneti dos Santos

CREA-RS 045.852-D

Banca Avaliadora:

[MSc .Eng. Eletr. Paulo César Cardoso Godoy

CREA- RS011.6822-D

Conceito Atribuído (A-B-C-D):

MSc. Eng. Eletr. Dalton Vidor

CREA- RS079.005-D

Conceito Atribuído (A-B-C-D):

Assinaturas:

Autor

Gilberto Davi Nunes Filho

Orientador

João Carlos Verneti dos Santos

Avaliador

Paulo César Cardoso Godoy

Avaliador

Dalton Vidor

Relatório Aprovado em:



DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a todos aqueles que não têm condições de cursar uma universidade por não disporem de condições financeiras.

Utilizarei meus conhecimentos para mudar a dura realidade deste país.



AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me proporcionar a maior riqueza: Saúde!

Agradeço a meus pais Gilberto e Dulce que não mediram esforços para que chegasse ao fim...Serei grato para sempre!

Dá mesmo forma a minha irmã Viviane, sempre em busca da compreensão e do entendimento entre os seres, valeu mana por tudo o que rolou até aqui.

Ao meu cunhado “amarelo” por cuidar da minha irmã...

Meus avós Dulcinda e Alfredo (os que resistiram a espera), em especial para minha avó paterna Miracy, obrigado pela aposta. A meu avô Wilson (Dizem que sou parecido contigo. Trago, festa e bom papo – Valeu Vô)

Querido canino Bud que não conseguiu esperar a formatura colaborando com momentos de descontração e alegria

Família pequena no tamanho mas grande nos sentimentos, uma vida me ajudando e me incentivando, o que dizer? AMO vocês!! Obrigado de Coração.

Aos colegas de trabalho, com quem sempre aprendi. Em especial aos colegas e amigos Carlos Claro, Delcio Haupenthal, Eder Müller, Luis Schneider, Luis Henrique Zanin, Rosano Nunes, Gastón Morales, Neocir Albuquerque.

Aos grandes participantes dessa conquista, os colegas de faculdade, hoje amigos. Em especial aos colegas Ernani Ulsenheimer (desculpa pelos domingos e sábados na função do TCC), ao colega Rodrigo Brandt (Gringo da pesada). Valeu rapaziada!

Aos professores com quem sempre aprendi muito em especial aos professores Augusto, Dalton, Godoy, Valner e a meu orientador Vernetti. Só tenho a agradecer, pois fizeram um “cabeça de bagre” tornar-se engenheiro eletricitista.



A galera em geral, do futebol, do surf, da noite, do trago. Informo que retomarei as atividades em breve... “é nós”. Um agradecimento especial aos amigos de sempre Juliano, Negão, Daniel, Lucas, Franja, Vareja, Mauricio demais “comantieiros”.

Por ultimo mas não menos importante – Minha mulher, companheira, amiga, amante Karen Azevedo Ribas.

Nega, tens sido minha motivação, minha inspiração, minha chapação, a luz que vem iluminando meu caminho e espero que daqui para sempre. Grato pela paciência, pela compreensão. TE AMO!!!

Um agradecimento especial aos que nunca acreditaram pois me deram mais força para continuar.



EPÍGRAFE

Veritas vos liberabit...



RESUMO

Nunes, Gilberto Davi, Sistema de Seguimento do Movimento Aparente do Sol e Controle do Ponto de Máxima Potência de um Gerador Fotovoltaico. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Elétrica - Departamento de Engenharia Elétrica. Universidade Luterana do Brasil. Canoas, RS. 2008.

Neste trabalho serão abordados características, projetos, circuitos e resultados referentes à otimização da geração de energia elétrica a partir de módulos fotovoltaicos. Os processos aplicados para realização do proposto são os seguintes: sistema eletromecânico para seguimento do movimento aparente do sol e controle e monitoramento do circuito seguidor ponto de máxima potência de um gerador fotovoltaico.

Palavras chave: Gerador Fotovoltaico. Seguidor de Máxima Potência. Conversor CC-CC *Buck*. MPPT.



ABSTRACT

Nunes, Gilberto Davi, The Movement Tracking System Apparent of the Sun and Control of Maximum Power Point of a Photovoltaic Generator. Completion of work of course in Electrical Engineering - Department of Electrical Engineering. Lutheran University of Brazil. Canoas, Rio Grande do Sul. 2008.

This work will be addressed features, projects, circuits and results for the optimization of the generation of electricity from photovoltaic modules. The procedures applied for completion of proposed are: electromechanical system to follow the apparent movement of the sun and controlling and monitoring the circuit follower point of maximum power of a photovoltaic

Keywords: Photovoltaic Generator. Follower of Max Power Point Tracker. Buck DC-DC converter. MPPT



LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Estrutura em teia de diamante de um cristal de silício [National Renewable Energy Laboratory].	24
Figura 2.2 - Nestas condições, ligando os terminais a um circuito que se fecha exteriormente através de uma carga, circulará corrente elétrica.....	26
Figura 2.3 - Circuito elétrico equivalente de uma célula fotovoltaica alimentando uma carga Z; modelo simplificado.[CASTRO, RUI, M., G., <i>Energias Renováveis e Produção Descentralizada</i> . Universidade Técnica de Lisboa – DEEC/Secção de Energia]	27
Figura 2.4 - Conversor CC e forma de onda da tensão de saída.[Mello, Luiz Fernando P. de, <i>Análise e Projeto de Fontes Chaveada</i> . São Paulo. Érica, 1996]	29
Figura 2.5 - Ganho estático em função de D [www.joinville.udesc.br/portal/professores/cassiano/materiais/EPOII__Capitulo_2__Buck_Boost.pdf]	30
Figura 2.6 - Exemplo de um circuito PWM .[Mello, Luiz Fernando P. de, <i>Análise e Projeto de Fontes Chaveada</i> . São Paulo. Érica, 1996]	31
Figura 2.7 - circuito e formas de ondas de um conversor <i>Buck</i> .[Mello, Luiz Fernando P. de, <i>Análise e Projeto de Fontes Chaveada</i> . São Paulo. Érica, 1996]	32
Figura 2.8 - a) Transistor conduzindo e diodo inversamente polarizado, b) Transistor no corte e diodo conduzindo a corrente i_{L1} . .[Mello, Luiz Fernando P. de, <i>Análise e Projeto de Fontes Chaveada</i> . São Paulo. Érica, 1996]	33
Figura 2.9 - (a) Curva IxV com variação de temperatura. (b) Curva IxV com variação de irradiação. [TRINDADE, Manuel, MARTINS, Júlio S., AFONSO, João L. Sistema para Otimização e Extração de Painéis Solares Fotovoltaicos. In CONFERENCIA SOBRE ENERGIA RENOVÁVEIS E AMBIENTE EM PORTUGAL. Azúrem, 2005/2006].....	36
Figura 2.10 - (a) Curvas de $I_p \times V_p$ – (b) MPPT nas curvas de potência x tensão (a)[GARCIA, Pedro Donoso. Uma Viasão de Energia Fotovoltaica. Apostila Universidade Federal de Minas Gerais] (b) [SANTOS, Jancarle L, dos, ANTUNES, Fernando L. M. Seguidor de Máxima Potência para Sistemas Fotovoltaico. 2002] .	36



Figura 2.11 - Modelo de um Sistema de Geração fotovoltaica com MPPT. [TRINDADE, Manuel, MARTINS, Júlio S., AFONSO, João L. Sistema para Otimização e Extração de Painéis Solares Fotovoltaicos. In CONFERENCIA SOBRE ENERGIA RENOVÁVEIS E AMBIENTE EM PORTUGAL. Azúrem, 2005/2006].....	38
Figura 2.12 - Diagrama Controlador de MPPT [LASNIER, France, ANG, Tony Gan. <i>Photovoltaic engineering handbook</i> .Bangkok: ADAM HILGER, 1990].....	39
Figura 2.13 - Visualização do método da perturbação para obtenção do MPPT. [S. Armstrong; W.G. Hurley. Self-regulating maximum power point tracking for solar energy systems. <i>REVISTA IEEE</i> , Ireland, v.2, p. 6-8, Sept. 2004.].....	41
Figura 2.14 - Análise do Método Computacional. [S. Armstrong; W.G. Hurley. Self- regulating maximum power point tracking for solar energy systems. <i>REVISTA IEEE</i> , Ireland, v.2, p. 6-8, Sept. 2004.].....	42
Figura 2.15 - Tensão corresponde à máxima potência x tensão de célula de circuito aberto. [S. Armstrong; W.G. Hurley. Self-regulating maximum power point tracking for solar energy systems. <i>REVISTA IEEE</i> , Ireland, v.2, p. 6-8, Sept. 2004.].....	43
Figura 2.16 - Método da Derivada Segunda da Potência. [S. Armstrong; W.G. Hurley. Self-regulating maximum power point tracking for solar energy systems. <i>REVISTA IEEE</i> , Ireland, v.2, p. 6-8, Sept. 2004.]	44
Figura 2.17 - Implementação do Método de Aproximação por Harmônica.	45
Figura 3.1 - Dados característicos do Gerador	49
Figura 3.2 - Dados Construtivos do Gerador A-75M [Catálogo de Produto www.atersa.com].....	50
Figura 3.3 - Curvas Características do Gerador Fotovoltaico ATERSA A-75M [Catálogo de Produto www.atersa.com].....	51
Figura 3.4 - Modelo de seguidor com eixo orientação leste-oeste[OLIVEIRA, Maurício, Madeira <i>Análise do Desempenho de um Gerador Fotovoltaico com Seguidor Solar Azimutal</i> , Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica. UFRGS, 2008]	52
Figura 3.5 - Fluxograma de Controle do Seguidor de Máxima Potência.) [SANTOS, Jancarle L, dos, ANTUNES, Fernando L. M. Seguidor de Máxima Potência para Sistemas Fotovoltaico. 2002].....	55
Figura 3.6 - Topologia Regulagem positiva de chaveamento do MOSFET sugerido pela NATIONAL.[DataSheet do Fabricante www.national.com]	56
Figura 3.7 - Diagrama de Funcionamento do Conversor ADC0808.....	57



Figura 3.8 - Ajuste do PWM através do microcontrolador da Família 8051) [SANTOS, Jancarle L, dos, ANTUNES, Fernando L. M. Seguidor de Máxima Potência para Sistemas Fotovoltaico. 2002].....	58
Figura 3.9 - Modelo de interface ADC0808 através com Porta Paralela [http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/v20_293.pdf]	60
Figura 3.10 - Diagrama Funcional Conversor Digital – Analógico.[Datasheet do Fabricante www.national.com]	62
Figura 3.11 - Topologia de circuito operação típica Conversor DAC0808. .[Datasheet do Fabricante www.national.com]	63
Figura 4.1 - Projeto Mecânico Dimensional Estrutura Móvel	65
Figura 4.2 - Estrutura com modulo fotovoltaico sobreposto	65
Figura 4.3 - Detalhes característicos motorreductor Bosch aplicado no projeto. [www.bosch.com.br]	67
Figura 4.4 - Detalhe Motor com engrenagem adaptada a partir da cremalheira existente no motor.	67
Figura 4.5 - Topologia do Circuito implementado para Realizar o Seguidor Solar ..	68
Figura 4.6 - Detalhamento do circuito Implementado	68
Figura 4.7 - Sistema Fotovoltaicos com Cargas Resistivas [UNIOESTE, <i>Desempenho de um Painel Fotovoltaico acoplado a um rastreador Solar.</i> http://paginas.agr.unicamp.br/energia/agre2006/pdf/25.pdf]	70
Figura 4.8 - Sistemas Fotovoltaicos sem carga (a vazio) [UNIOESTE, <i>Desempenho de um Painel Fotovoltaico acoplado a um rastreador Solar.</i> http://paginas.agr.unicamp.br/energia/agre2006/pdf/25.pdf]	71
Figura 4.9 - Curva de Potência Gerador ATERSA A-75 – Teste Prático com Seguidor Solar	72
Figura 4.10 - Topologia Circuito Projetado para Conversor CC-CC tipo Buck.....	75
Figura 4.11 - Conversor Buck Implementação	75
Figura 4.12 - Regulador de Largura de Pulso (PWM)	77
Figura 4.13 - Sinal Modulado Duty Cycle 50%.	77
Figura 4.14 - Ambiente do Software Desenvolvido.....	79
Figura 4.15 - Esquema Completo com Respectivas Topologias Aplicadas	82
Figura 4.16 - Bancada de Teste Projeto Implementado na Prática em Operação....	83
Figura 4.17 - Gráfico Construído a partir de testes Práticos.....	84



LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Teste Comparativo realizado pela Universidade Federal do Oeste do Paraná.....	69
Tabela 2 - Tabela de Dados do Ensaio.....	72
Tabela 3 - Dimensionamento de Componentes Discretos Conversor <i>Buck</i>	74
Tabela 4 - Parâmetros Dimensionais.....	74
Tabela 5 - Referências de Corrente através do amplificador de Instrumentação INA118.....	81



SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	15
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	22
2.1. Sistemas de Geração Fotovoltaicos.	22
2.2. Conversores CC/CC.....	29
2.3. Seguidor de Máxima Potência	35
2.3.1. Desenvolvimento de Sistema Fotovoltaico com MPPT (Maximum Power Point Tracker).....	38
2.3.2. Métodos de Busca do Ponto de Máxima Potência.....	40
2.3.3. Método da Perturbação.....	40
2.3.4. Método Computacional.....	41
2.3.5. Aproximação por Características da Célula Fotovoltaica.....	42
2.3.6. Método da Derivada Segunda da Potência.....	44
2.3.7. Aproximação por Harmônica.....	45
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	47
3.1. Descrição Geral do Sistema	47
3.2. Descrição do Módulo Fotovoltaico.....	48
3.3. Sistema Seguidor do movimento aparente do sol	51
3.4. Conversor CC-CC	53
3.5. Circuito seguidor de máxima potência	54
3.6. Descrição dos Sistemas de Aquisição de Dados.....	56
4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	64
4.1. Sistema Seguidor Solar	64
4.2. Desenvolvimento e Implementação Conversor CC-CC tipo Buck.....	73
4.3. Implementação Controle PWM (Pulse Width Modulation).....	76
4.4. Implementação Seguidor de Máxima Potência.....	77
4.5. Sistemas e Circuitos de Aquisição e Dados	79
5. CONCLUSÕES.....	85
6. REFERÊNCIAS.....	87



1. INTRODUÇÃO

A busca do entendimento e controle das fontes de energia oferecidas pela natureza é constante e permanente. Há mais de 500.000 anos o homem aprendeu a controlar o fogo para aquecê-lo, proteger-se dos predadores e preparo de alimentos. A partir de então o homem despertou interesse no conhecimento e análise das diversas fontes de energia disponíveis na natureza com o objetivo de utilizá-las em benefício próprio (*Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos*, Grupo de Trabalho de Energia Solar-GTES, CEPEL-CRESESB).

As fontes de energia são vitais para a sobrevivência e existência do homem no planeta. Contudo, os esforços e estudos realizados para geração da energia elétrica a partir de fontes de energia naturais tiveram seu custo de implantação: um grande dano ao meio ambiente provocando prejuízos para a flora e fauna: espécies foram extintas, cursos de rios foram desviados, entre outras conseqüências. As fontes de energia disponíveis na natureza foram enfim dominadas pelo homem, mas a que custo? Naturalmente, o crescimento econômico de uma nação depende diretamente da geração de energia elétrica; desta forma, as indústrias tem condições de beneficiar a matéria-prima, as pessoas de maneira geral podem usufruir deste bem comum e se favorecerem dos benefícios associados.

No Brasil a geração de energia elétrica apresenta o seguinte perfil (www.aneel.gov.br):

- 55% da energia gerada no país são realizadas através de fontes renováveis;
- Total de Consumidores: 58,3 milhões;
- Produção de Energia: 425TWh/ano;
- Geração Térmica 21,5%, Geração Hídrica 76,2%, Geração Nuclear 2,1% e Geração Eólica 0,2%.



O crescimento médio anual da produção mundial de geradores fotovoltaicos na última década foi de 20%, com previsão para a primeira década do século XXI de 30%. Os maiores produtores mundiais são o Japão, Estados Unidos e União Européia, sendo o segmento de mercado predominante o dos sistemas interligados à rede. No Brasil, o segmento de mercado predominante é o sistema isolado de eletrificação rural (DINIZ et al., 2002; ANEEL, 2002). O mercado brasileiro de geradores fotovoltaicos possui uma capacidade total de potência de pico instalada de 12MW, sendo 2MW produzido no Brasil e o restante, importado.

Com o crescimento das demandas mundiais, houve a necessidade de desenvolvimento de recursos e estudos para exploração de novas fontes de energia, buscando o menor impacto ambiental possível para minimizar os prejuízos ao meio ambiente.

Entretanto, o fornecimento de energia elétrica a todas possíveis instalações ainda é inviável para as distribuidoras de energia elétrica, pois as distâncias de determinadas regiões dos centros urbanos inviabiliza a construção de linhas e redes de distribuição de energia em função do custo de instalação frente ao consumo destas unidades.

Diante desta realidade, a geração de energia através de tecnologias alternativas não convencionais é uma opção que cresce em importância para o atendimento de novos consumidores, na medida em que possibilita a utilização de fontes de energia locais disponíveis, evitando os custos com a extensão da rede elétrica em regiões de baixa densidade populacional e baixo consumo de energia. Dentre as alternativas disponíveis no mercado, a geração fotovoltaica se torna mais atrativa, gerando energia a partir da incidência solar. Esta tecnologia de geração tem apresentado bom desempenho tendo em vista que o custo de implantação e manutenção começa a competir com aquele requerido para estender a rede elétrica convencional para consumidores situados a mais de 5 km da rede existente.

O sol é a mais importante fonte de energia do planeta, sendo uma fonte inesgotável na escala de tempo humana (contada em número de gerações). Ele fornece $1,5 \times 10^{18} kWh$ de energia anualmente à Terra, energia correspondente a 10.000 vezes o consumo mundial anual. (*Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos*, Grupo de Trabalho de Energia Solar-GTES, CEPTEL-CRESESB)



O efeito Fotovoltaico que transforma a energia luminosa diretamente em energia elétrica concilia a mais importante fonte, o Sol, com a principal forma secundária de energia, ou seja, a energia elétrica. Relatado por Edmond Becquerel, em 1839, o efeito fotovoltaico pode ser explicado sucintamente como o aparecimento de uma diferença de potencial nos extremos de uma estrutura de material semicondutor são denominadas células fotovoltaicas. (FRAIDENRAICCH, N., LYRA, F., Energia Solar. *Fundamentos e Tecnologia de Conversão Heliotérmica e Fotovoltaic*, Editora Universitária da UFPE, 1995.)

A partir do surgimento de uma diferença de potencial entre os terminais do referido gerador, pode-se condicionar esta tensão, armazená-la e utilizá-la quando houver necessidade, muito embora não seja possível afirmar que um sistema terá determinada autonomia, “dada a natureza estocástica da oferta de energia solar, só é possível trabalhar-se com hipóteses” [Verneti, 1996].

O uso de geradores fotovoltaicos, os quais requerem energia solar como fonte de alimentação, apresenta inúmeras vantagens, entre as quais citam-se as seguintes:

- A energia do sol é uma energia limpa, gratuita e não provoca poluição;
- A matéria prima silício é, depois do oxigênio, o material mais abundante da crosta terrestre;
- O gerador pode ser localizado junto ao consumidor;
- A instalação é muito simples e rápida;
- O sistema requer manutenção mínima, pois o desgaste dos módulos é desprezível;
- A vida útil dos módulos é superior a 20 anos e garantida pelo fabricante;
- O gerador não consome combustível;
- A tecnologia fotovoltaica possibilita a auto-suficiência energética;

A principal desvantagem dos sistemas é sua operação intermitente devido ao ciclo noite e dia e à sazonalidade climática. Desta forma, sistemas fotovoltaicos dependem de um dispositivo capaz de armazenar a energia gerada durante o período noturno ou na falta da incidência solar. Assim, geralmente os geradores



fotovoltaicos são conectados a bancos de baterias a fim de estabelecerem um regime de carga, bem como para manter a tensão de flutuação para compensar a auto-descarga das baterias. Alternativamente, estes sistemas podem ser conectados em paralelo com a rede elétrica, sendo que neste caso a rede representa um sistema de armazenamento de capacidade praticamente ilimitada.

A quantidade de energia solar disponível varia a cada instante de tempo em função da posição aparente do sol em relação ao observador situado em um ponto da superfície terrestre. Para que seja possível obter a máxima quantidade de energia solar incidente sobre a superfície coletora de um gerador fotovoltaico, faz-se necessário o desenvolvimento de dispositivos que permitam o movimento do gerador para que sua superfície coletora permaneça em uma posição normal à direção dos raios solares.

Os painéis solares são instalados com diferentes inclinações de suas superfícies dependendo da localização geográfica, de forma a obter maior aproveitamento da energia solar incidente. Pelo fato destes terem uma posição fixa, o aproveitamento da energia solar não é otimizado. Este problema pode ser contornado através da instalação de dispositivos que permitem o seguimento do movimento aparente do sol pelos painéis. Esta medida, no entanto, anula uma das principais vantagens desta tecnologia, isto é, a ausência de peças móveis. [3]

A fim de otimizar a captação máxima da energia solar proporcionando ao gerador o maior rendimento possível dentro das limitações observadas, é desenvolvido no presente trabalho um circuito de controle de posição do painel solar movimentando o mesmo de forma que a incidência dos raios solares seja normal à superfície do gerador fotovoltaico.

Para que seja possível esta implementação, busca-se um dispositivo capaz de sustentar fisicamente o módulo e possua uma estrutura mecânica capaz de posicionar o painel de acordo com a incidência dos raios solares que serão comandados por um circuito foto-transistorizado capaz de identificar a orientação da maior incidência solar.

Focado em realizar a operação do gerador da forma mais eficiente possível é também desenvolvido no presente trabalho um conversor CC, tipo *Buck*, o qual maximiza a quantidade de energia produzida por um gerador fotovoltaico, fazendo

com que os painéis operem no ponto de máxima potência, também conhecido como circuito seguidor do ponto de máxima potência (*Maximum Power Point Tracker*).

Este circuito implementado a partir da topologia convencional de um conversor CC tipo *Buck* é controlado pela geração de um sinal PWM (*Pulse Width Modulator*) que por sua vez modula o período do sinal de controle (*Duty Cycle*) através das informações coletadas do sistema de geração e enviadas ao microcontrolador da família 8051. Este sistema foi desenvolvido para realizar o carregamento de baterias que por sua vez é responsável pelo fornecimento de energia elétrica a um sistema de iluminação pública em corrente contínua.

Sistemas fotovoltaicos são considerados como sistemas de energia limpa, ou seja, durante a geração não é observada emissão de ruídos nem degradação do meio ambiente. Assim, a utilização de geradores fotovoltaicos possibilita a minimização dos impactos ambientais e total integração da tecnologia com os ecossistemas. Tais sistemas podem ser instalados em regiões rurais, litorâneas, urbanas e cerrados requerendo para isto pouca adaptação ao meio.

Com relação ao custo de instalação destes sistemas, é mais elevado, quando comparado ao custo de sistemas convencionais de geração de energia, em que a possibilidade de fornecimento de energia dá-se através da rede de distribuição de energia cativa da concessionária de cada região.

Segundo estudos de mercado de comercialização de energia elétrica, o custo por unidade de potência de geradores fotovoltaicos varia entre US\$ 5,00 e 6,00/W, significativamente mais elevado que o custo de geração de energia hídrica que é de aproximadamente US\$ 1,00/W (COCIAN, L. F. E.; SANTOS, J. C. V. . *Sistemas Fotovoltaicos - Uma Alternativa para a Geração de Energia Elétrica*. Lumière, São Paulo, v. 27, p. 32 - 38, 02 jul. 2000.)

“O mercado de energia solar é atualmente, restrito a dois tipos de consumidores: consumidores individuais em áreas remotas afastadas das redes de distribuição de energia primária dos agentes de distribuição de energia elétrica e coletivamente para que os consumidores possam pagar pelas vantagens de energia solar, como por exemplo, os mercados alemão e japonês onde o desejo coletivo é satisfeito através de subsídios governamentais ou incentivos através de taxas reduzidas” (ROSA, M. C., CARNEIRO, P.M., *Estudo de Viabilidade Técnica e Econômica da Utilização de Energia Solar em Estações Rádio Base (ERB's)*, 2001).



No Brasil, de acordo com a ANEEL, através da Resolução Normativa 247/2006, incentiva-se os consumidores livres a comprarem energia de empreendimentos com base na geração eólica, solar e biomassa. Estes consumidores serão beneficiados com o desconto de até 100% da TUSD (Tarifa do Usos do Sistema de Distribuição) oferecido pela concessionária local sendo este valor revertido para a concessionária durante as revisões tarifárias homologadas pelo órgão regulador.

Nos próximos capítulos são descritas as etapas do projeto segmentado de acordo com sua aplicação.

1.1. Objetivos Gerais

O presente projeto visa suprir demandas de energia elétrica através de sistemas fotovoltaicos, buscando simultaneamente promover o desenvolvimento tecnológico de modo sustentável através do uso da energia solar e otimizar o uso da energia solar em sistemas fotovoltaicos.

1.2. Objetivos Específicos

Para executar o presente projeto, os seguintes objetivos específicos foram estabelecidos:

- Maximizar o aproveitamento da energia solar controlando o posicionamento do gerador fotovoltaico a fim de que a incidência dos raios solares seja normal à superfície do painel;
- Realizar o máximo aproveitamento da energia gerada a partir do desenvolvimento de um conversor CC para o controle do ponto de máxima potência do gerador;
- Integrar os módulos de seguimento do movimento aparente do sol e de seguimento do ponto de máxima potência do gerador



O protótipo de sistema desenvolvido no presente projeto é implementado em um módulo fotovoltaico (do fabricante Atersa com as seguintes características:

$V_{mp} = 17V$, $I_{mp} = 4,4A$; *Max Power* = 75W), o qual carrega um bateria de 12V, com capacidade de 7Ah. O sistema gerador é desenvolvido para atender uma carga de iluminação pública de modo autônomo.

Para seguir o movimento aparente do sol, o módulo fotovoltaico é fixado a uma estrutura metálica portátil com inclinação fixa de 45° em relação ao solo, provida de haste central móvel com rotação de até 180°, a fim de realizar o movimento da translação solar junto à superfície terrestre. O ângulo de inclinação fixa de 45° foi selecionado a partir de um software de simulação, buscando a maximização da energia solar incidente no período de um ano. Um circuito de controle foto-transistorizado é desenvolvido para posicionar o painel solar em relação ao movimento de translação solar ao redor da terra, para otimizar a captação de energia solar.

Para controlar o ponto de operação do gerador fotovoltaico de modo otimizado, foi executado o projeto e implementação de um conversor CC tipo *Buck* responsável pela transferência da energia gerada a partir do módulo fotovoltaico a fim de carregar a bateria e manter uma carga de flutuação para compensar a auto-descarga da bateria. O conversor CC deverá operar na faixa de 20kHz a fim de proporcionar fornecimento contínuo sem interrupções;

Um circuito de tratamento de dados analógicos captados do circuito primário do módulo foi desenvolvido e implementado. Estes dados são convertidos para sinais digitais com objetivo de implementar o algoritmo de controle do ponto de operação do gerador fotovoltaico através de rotinas utilizando o microcontrolador 89C52. Atrelado a este circuito foi projetado um gerador de sinal *PWM* (Pulse – Width Modulation) responsável pelo controle do MOSFET (Acrônimo de **M**etal **O**xide **S**emiconductor **F**ield **E**ffect **T**ransistor, ou Transistor de Efeito de Campo de Semicondutor de Óxido Metálico) instalado junto ao conversor. O *Duty Cycle* deste sinal é ajustado de acordo com as rotinas realizadas pelo microcontrolador e este envia sinais digitais que serão convertidos para analógicos e enviados ao circuito *PWM*.



2. REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo, é realizada uma revisão de conceitos necessários à compreensão e análise do presente projeto, fundamentando assim a metodologia desenvolvida no capítulo seguinte.

2.1. *Sistemas de Geração Fotovoltaicos.*

As células fotovoltaicas são constituídas de um material semicondutor – o silício – ao qual são adicionadas substâncias, ditas *dopantes*, de modo a criar um meio adequado ao estabelecimento do efeito fotovoltaico, isto é, conversão direta da potência associada à radiação solar em potência elétrica contínua.(CASTRO, RUI, M., G., *Energias Renováveis e Produção Descentralizada*. Universidade Técnica de Lisboa – DEEC/Secção de Energia).

A célula é o menor elemento de um gerador fotovoltaico, produzindo tipicamente potências elétricas da ordem de 1,5 W (correspondentes a uma tensão de 0,5 V e uma corrente de 3 A). Para obter potências maiores, as células são ligadas em série e/ou em paralelo, formando módulos (tipicamente com potências da ordem de 50 a 100W) e painéis fotovoltaicos com potências superiores (estruturas que sustentam diversos módulos interligados). .(CASTRO, RUI, M., G., *Energias Renováveis e Produção Descentralizada*. Universidade Técnica de Lisboa – DEEC/Secção de Energia).



Atualmente, os sistemas fotovoltaicos são usados em uma gama de aplicações, as quais podem ser agrupadas conforme a ordem de potência como segue:

- Aplicações de média potência (dezenas ou centenas de quilowatt)
 - Eletrificação rural: abastecimento de cargas domésticas em locais remotos sem rede, bombeamento de água e irrigação, complemento de abastecimento de locais remotos com ou sem rede
 - Produção descentralizada ligada à rede
- Aplicações de pequena potência (décimas ou unidades de quilowatt)
 - Relógios e calculadoras
 - Acessórios de veículos automóveis¹
 - Sinais rodoviários (móveis e estáticos) e parquímetros
 - Telefones de emergência, transmissores de TV e de telemóvel
 - Refrigeríficos médicos em locais remotos

Como dito acima, o principal componente da célula é o silício. Um átomo de silício é formado por catorze prótons e catorze elétrons. Na camada mais exterior, conhecida como camada de valência, existem quatro elétrons. (CASTRO, RUI, M., G., *Energias Renováveis e Produção Descentralizada*. Universidade Técnica de Lisboa – DEEC/Secção de Energia).

Em um cristal de silício, os átomos alinham-se segundo uma estrutura em teia (chamada teia de diamante), formando quatro ligações covalentes com quatro átomos vizinhos, como se mostra na Figura 1.

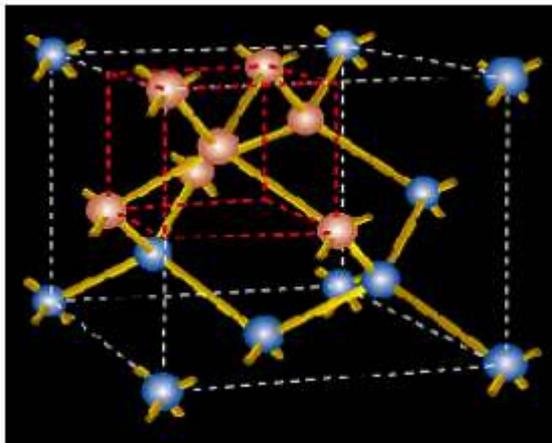


Figura 2.1 - Estrutura em teia de diamante de um cristal de silício [National Renewable Energy Laboratory].

Em cada ligação covalente, um átomo partilha um dos seus elétrons de valência com um dos elétrons de valência do átomo vizinho. Como resultado desta partilha de elétrons, a banda de valência, que pode conter até oito elétrons, fica cheia: os elétrons ficam presos na banda de valência e o átomo está num estado estável.

Para que os elétrons se possam deslocar têm de adquirir energia suficiente para passarem da banda de valência para a banda de condução. Esta energia é designada por hiato e no caso do cristal de silício vale $1,12 \text{ eV}$.

Quando um fóton da radiação solar contendo energia suficiente atinge um elétron da banda de valência, este salta para a banda de condução, deixando uma lacuna no seu lugar, a qual se comporta como uma carga positiva. Neste caso, diz-se que o fóton criou um par de elétron-lacuna.

Uma célula fotovoltaica constituída por cristais de silício puro não produziria energia elétrica. Os elétrons passariam para a banda de condução mas acabariam por se recombinar com as lacunas, não dando origem a qualquer corrente elétrica.



Para haver corrente elétrica é necessário que exista um campo elétrico, isto é, uma diferença de potencial entre duas zonas da célula. Através do processo conhecido como *dopagem* do silício, que consiste na introdução de elementos estranhos com o objetivo de alterar as suas propriedades elétricas, é possível criar duas camadas na célula: a camada tipo *p* e a camada tipo *n*, que possuem, respectivamente, um excesso de cargas positivas e um excesso de cargas negativas, relativamente ao silício puro.

O boro é o dopante normalmente usado para criar a região tipo *p*. Um átomo de boro forma quatro ligações covalentes com quatro átomos vizinhos de silício, mas como só possui três elétrons na banda de valência, existe uma ligação apenas com um elétron, enquanto as restantes três ligações possuem dois elétrons.

A ausência deste elétron é considerada uma lacuna, a qual se comporta como uma carga positiva que viaja através do material, pois de cada vez que um elétron vizinho a preenche, outra lacuna se cria. A razão entre átomos de boro e átomos de silício é normalmente da ordem de 1 para 10 milhões.

O fósforo é o material usado para criar a região *n*. Um átomo de fósforo tem cinco elétrons na sua banda de valência, pelo que cria quatro ligações covalentes com os átomos de silício e deixa um elétron livre, que viaja através do material.

A razão entre átomos de fósforo e de silício é próxima de 1 para 1.000.

Na região onde os dois materiais se encontram, designada *junção p-n*, cria-se, portanto, um campo elétrico que separa os portadores de carga que a atingem: os elétrons, excitados pelos fotóns com energia suficiente para excitar os elétrons da banda de valência para a banda de condução, são acelerados para um terminal negativo, ao passo que as lacunas são enviadas para um terminal positivo. (CASTRO, RUI, M., G., *Energias Renováveis e Produção Descentralizada*. Universidade Técnica de Lisboa – DEEC/Secção de Energia).

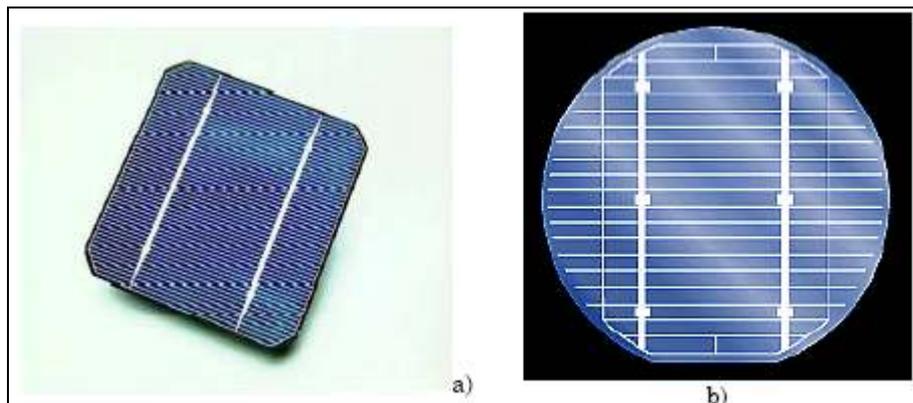


Figura 2.2 - Nestas condições, ligando os terminais a um circuito que se fecha exteriormente através de uma carga, circulará corrente elétrica.

Figura 2 – a) Superfície ativa de uma célula fotovoltaica típica [United States Department of Energy, Center for Renewable Energy and Sustainable. Technology, Aurora educational web site]

b) Detalhe da malha coletora metálica na superfície da célula (US Department of Energy, Photovoltaics. <http://www.eren.doe.gov/pv/>)

A figura 2 mostra uma célula fotovoltaica, cujos elementos são descritos a seguir:

- Malha e contatos frontais (“grid”, “front contacts”): os contatos frontais, em cobre, constituem os terminais negativos.
- Película anti-reflexo (“anti-reflection coating”): esta película, reduz a reflexão da radiação incidente para valores abaixo de 5%; em conjunto com textura especiais usadas em células de alto rendimento a reflexão pode ser reduzida para valores da ordem de 2%; sem este revestimento a célula refletiria cerca de um terço da radiação.
- Camada tipo n (“ n -type silicon”): silício dopado com fósforo, constituindo a região negativa da célula; a espessura desta camada é cerca de 300 nm.
- Camada tipo p (“ p -type silicon”): silício dopado com boro, constituindo a região positiva da célula; a espessura desta camada é cerca de 250.000 nm.
- Contato traseiro (“back contact”): contato metálico localizado na parte posterior da célula, que constitui o terminal positivo.

2.1.1. Modelo Matemático

Basicamente, a operação de uma célula fotovoltaica pode ser modelada através de um circuito elétrico, como representado na figura 3.

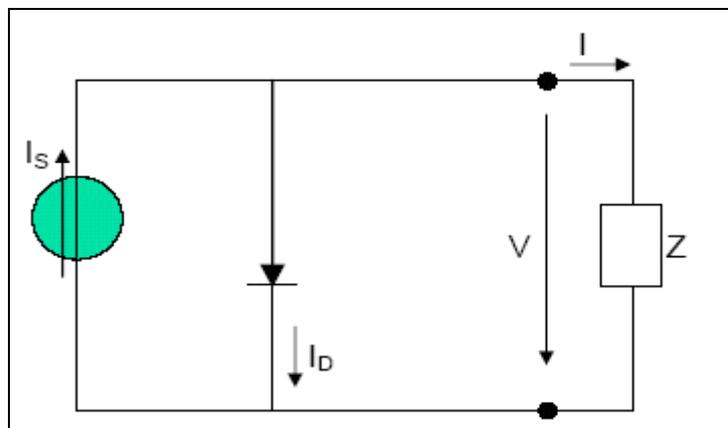


Figura 2.3 - Circuito elétrico equivalente de uma célula fotovoltaica alimentando uma carga Z; modelo simplificado. [CASTRO, RUI, M., G., *Energias Renováveis e Produção Descentralizada*. Universidade Técnica de Lisboa – DEEC/Secção de Energia]

A fonte de corrente I_S representa a corrente elétrica gerada pelo feixe de radiação luminosa, constituído por fotões, ao atingir a superfície ativa da célula (efeito fotovoltaico); esta corrente unidirecional é constante para uma dada radiação incidente. A *junção p-n* funciona como um diódo que é atravessado por uma corrente interna unidirecional I_D , que depende da tensão V nos terminais da célula.

A corrente I_D que circula através do diódo é:

$$I_D = I_0 \cdot \left(e^{\frac{v}{m \cdot v_T}} - 1 \right) \quad \text{Eq.: 1}$$

- I_0 – corrente inversa máxima de saturação do diódo
- V – tensão aos terminais da célula
- m – *factor de idealidade do diódo* (diódo ideal: $m = 1$; diódo real: $m > 1$)
- V_T – designado por *potencial térmico* $V_T = KT/q$
- K : *constante de Boltzmann* ($K = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/}^\circ\text{K}$)
- T : temperatura absoluta da célula em $^\circ\text{K}$ ($0^\circ\text{C} = 273,16 \text{ }^\circ\text{K}$)



- q : carga elétrica do elétron ($q = 1,6 \times 10^{-19}$ C)

A corrente I que circula pela carga é, portanto:

$$I = I_s - I_D = I_s - I_0 \cdot \left(e^{\frac{V}{m \cdot V_T}} - 1 \right) \quad \text{Eq.: 2}$$

Dois pontos de operação da célula merecem atenção particular:

Curto-circuito exterior: Neste caso, como a tensão nos terminais da célula é zero, não circula corrente através do diodo. Portanto, a corrente de curto-circuito é a corrente fotogerada. O seu valor é uma característica da célula, sendo um dado fornecido pelo fabricante para determinadas condições de radiação incidente e temperatura.

- Circuito Aberto: Neste caso, a corrente para a carga é zero e, portanto, a tensão de circuito aberto é dada pela seguinte equação:

$$I = 0$$
$$V_{ca} = m \cdot V_T \cdot \ln \left(1 + \frac{I_s}{I_0} \right) \quad \text{Eq.:3}$$

A tensão de circuito aberto V_{ca} é uma característica da célula, sendo um dado fornecido pelo fabricante para determinadas condições de radiação incidente e temperatura.

Para otimizar o rendimento do módulo gerador, é comum orientar o módulo de modo que sua superfície fique perpendicular à direção da incidência direta dos raios solares. Considerando isto, existem diversos métodos que podem ser implementados para observância da máxima incidência solar sobre a superfície, contudo alguns critérios devem ser observados para que a captação seja adequada e o consumo de energia seja desprezível frente à capacidade de geração e armazenamento. Os seguidores solares seguem o movimento do sol ao longo do dia aumentando assim o débito dos seus módulos solares. A média anual deste aumento está entre os 25% e os 35% e, dependendo da localização, pode ir até aos 55% durante os meses de verão. (ENERGIA SOLAR – FFSOLAR. Sistemas de Energias Alternativas Portugal, Lda. Disponível em: <http://www.ffiolar.com/index_pt.html>).

2.2. Conversores CC/CC

Conversores CC-CC são sistemas formados por semicondutores de potência operando como interruptores, e por elementos passivos, normalmente indutores e capacitores que tem por função controlar o fluxo de potência de uma fonte de entrada para uma fonte de saída.

Na Figura 4 mostra-se o diagrama elétrico e a forma de onda da tensão de saída de um conversor CC-CC básico.

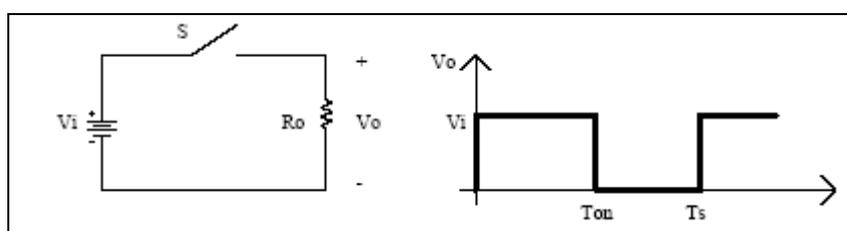


Figura 2.4 - Conversor CC e forma de onda da tensão de saída.[Mello, Luiz Fernando P. de, *Análise e Projeto de Fontes Chaveada*. São Paulo. Érica, 1996]

O intervalo de comutação é definido como:

$$T_s = \frac{1}{F_s} \quad \text{Eq.: 4}$$

F_s é a frequência de comutação. Esta frequência tende a ser a mais alta possível, diminuindo assim o volume dos elementos magnéticos e capacitivos do conversor.

A razão entre o intervalo de comutação (T_s) e o intervalo de condução do interruptor S (T_{on}) é definida como razão cíclica e é dada por:

$$D = \frac{T_{on}}{T_s} \quad \text{Eq.: 5}$$

A tensão média na saída deste conversor é dada por:

Usando $T_{on} = D \cdot T_s$, tem-se:

$$V_o = \frac{1}{T_s} \cdot \int_0^{\infty} V_i \cdot dt = V_i \cdot \frac{T_{on}}{T_s} \quad \text{Eq.: 6}$$

$$V_o = D \cdot V_i \quad \text{Eq.: 7}$$

A relação entre a tensão de saída e a tensão de entrada é definida por ganho estático do conversor e dada então por:

$$D = \frac{V_o}{V_i} \quad \text{Eq.: 8}$$

Pelo gráfico apresentado na figura 5 pode-se notar que a variação da tensão de saída com a razão cíclica é linear.

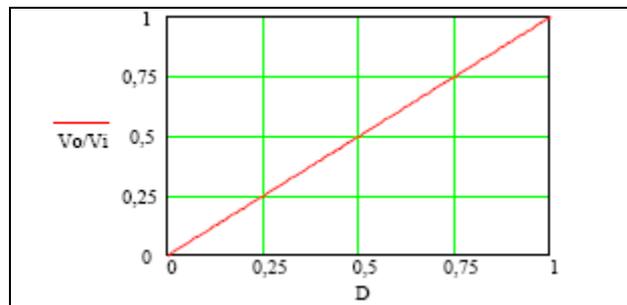


Figura 2.5 - Ganho estático em função de D
[www.joinville.udesc.br/portal/professores/cassiano/materiais/EPOII__Capitulo_2__Buck_Boost.pdf]

Os sinais de comando do interruptor podem ser gerados com frequência de comutação fixa ou variável. Uma forma de gerar os sinais de comando com frequência fixa é através de modulação por largura de pulso (PWM). Na figura 2.6 apresenta-se de forma simplificada de realiza PWM.

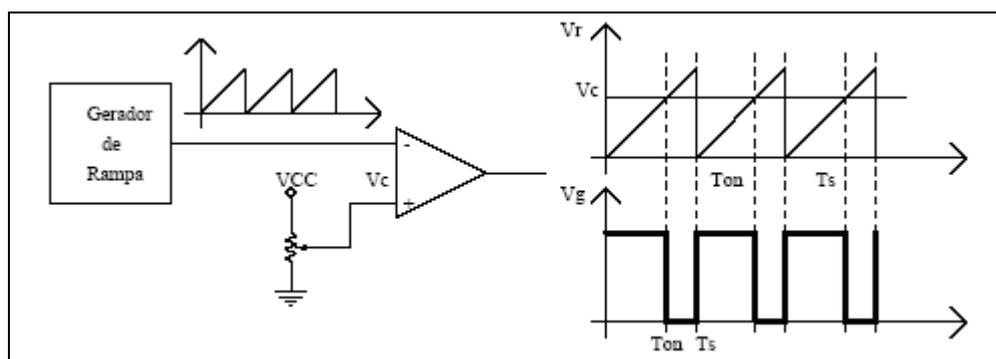


Figura 2.6 - Exemplo de um circuito PWM .[Mello, Luiz Fernando P. de, *Análise e Projeto de Fontes Chaveada*. São Paulo. Érica, 1996]

A análise realizada a seguir dos conversores CC-CC será realizada em regime permanente, ou seja:

- O valor médio da tensão nos indutores é NULO em um período de comutação;
- O valor médio de corrente nos indutores é NULO em um período de comutação.

Os principais tipos de conversores CC-CC utilizados são os seguintes:

- *BUCK* (rebaixador);
- *BOOST* (elevador);
- *BUCK-BOOST* (rebaixador-elevador);
- Conversores em Ponte:
 - Reversível em corrente;
 - Reversível em tensão.

Visando direcionar este referencial aos modelos utilizados para desenvolvimento do protótipo será analisado apenas o conversor tipo *BUCK* por se tratar de um conversor rebaixador de acordo com a necessidade da planta como será analisado no próximo capítulo.

2.2.1. Conversor CC-CC tipo *BUCK*

Este tipo de conversor é utilizado quando se deseja uma redução na tensão de saída em relação a entrada. A tensão de saída possui a mesma polaridade da tensão de entrada. O ruído gerado para a saída é baixo devido à configuração do circuito L1 C1, que forma um filtro passa baixa. A tensão de entrada recebe pulsos do transistor (quando conduzindo), sendo assim o conversor *Buck* gera alto ruído para a tensão de entrada analisar na figura 7 a topologia do circuito e as formas de onda do conversor *Buck*.

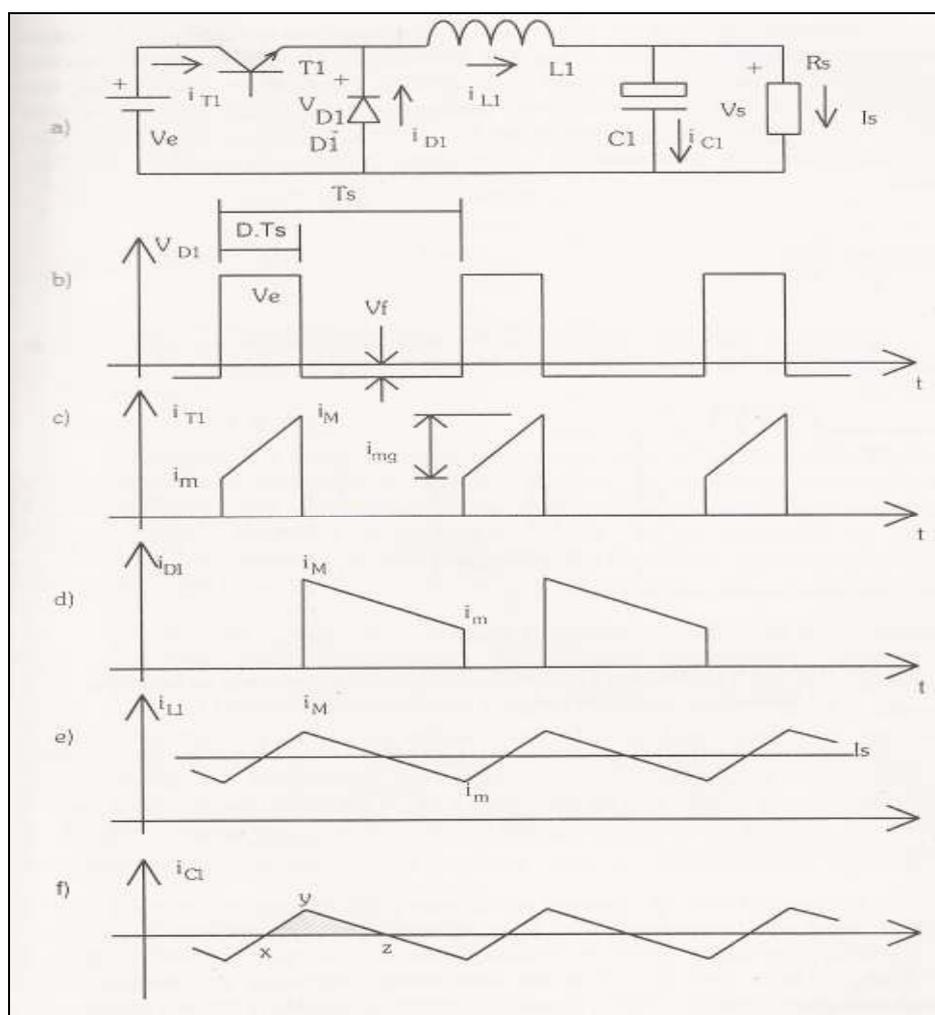


Figura 2.7 - circuito e formas de ondas de um conversor *Buck*. [Mello, Luiz Fernando P. de, *Análise e Projeto de Fontes Chaveada*. São Paulo. Érica, 1996]

O circuito funciona da seguinte forma: quando o transistor $T1$ satura (entra em condução), a tensão de entrada V_e é conectada diretamente ao circuito $L1$, $C1$ e R_s . Durante esse período o diodo está reversamente polarizado, não influenciado no circuito. O transistor permanece conduzindo por um período $D T_s$, sendo T_s a

frequência de repetição ($T_s = \frac{1}{F_s}$), e D define a largura de pulso no regime estático. D

(Duty Cycle), varia entre 0 e 1, definindo o tempo de condução por T_{on} tem-se:

$$D = \frac{T_{on}}{T_s} \quad \text{Eq.: 9}$$

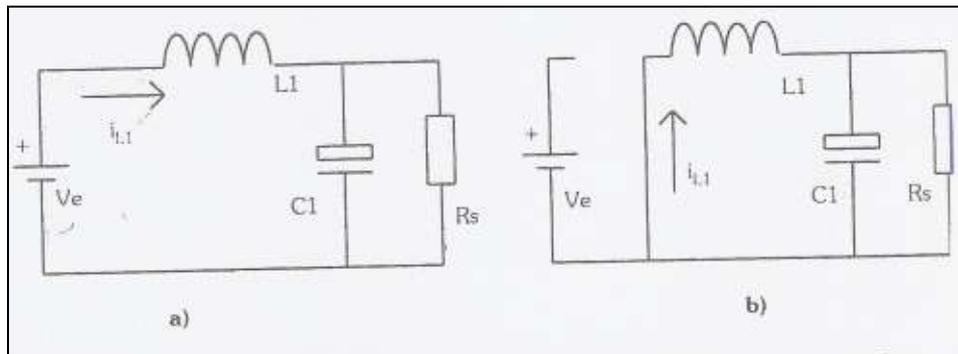


Figura 2.8 - a) Transistor conduzindo e diodo inversamente polarizado, b) Transistor no corte e diodo conduzindo a corrente i_{L1} . [Mello, Luiz Fernando P. de, *Análise e Projeto de Fontes Chaveada*. São Paulo. Érica, 1996]

Na figura 2.8, esta sendo desprezada a tensão V_{ce} de saturação do transistor e a tensão V_f do diodo. Na prática, só pode-se desprezá-las se a tensão V_e for muito maior que a tensão V_{ce} de saturação e se V_f for muito menor que a tensão de saída V_s . Para os cálculos que seguem leva-se em consideração ambas tensões quando necessário.

A forma de onda no indutor L1 é triangular e o valor médio dessa corrente é I_s . Como em um indutor tem-se $V = L1 \, di/dt$, para que a tensão no indutor durante T_{on} seja constante igual a $V_e - V_{cesat} - V_s$, a corrente I deve ser uma rampa (supondo V_s constante). Da mesma maneira, durante T_{off} a tensão no indutor será $-(V_s + V_f)$ e a rampa terá inclinação negativa. Observa-se através das seguinte equações:

$$V_s = D \cdot V_e - V_{cesat} \cdot D - (1 - D) \cdot V_f \quad \text{Eq.: 10}$$

Se pudermos desprezar V_{cesat} e V_f , tem-se:

$$V_s = D \cdot V_e \quad \text{Eq.: 11}$$



A equação 8 descreve o funcionamento básico do conversor *Buck*. O circuito de controle deverá fornecer um valor de D de tal forma que a equação 9 permaneça válida (V_s é supostamente constante). Como esta depende da corrente de saída, podemos pensar que a corrente não influa no valor da largura de pulso D . Na realidade, tanto V_{cesat} quanto V_f variam rapidamente com a corrente de saída I_s .

Supondo que a corrente I_s diminui de valor até que a corrente im seja zero. Neste ponto, I_s é definida como corrente mínima do conversor *Buck* para manter o modo contínuo de corrente. Pode-se dizer que o conversor opera no modo contínuo de corrente, quando a soma das correntes nas chaves é diferente de zero em todo o período de chaveamento T_s , ou seja, a corrente nas duas chaves não pode ser zero simultaneamente. Isto significa que tanto o transistor quanto o diodo não podem deixar de conduzir em um período T_s , pode-se dizer que o conversor funciona no modo descontinuo de corrente.

Observa-se através do modo descontinuo de corrente que o diodo e o transistor estão cortados e a corrente I_1 é zero. A corrente mínima de saída para manter o modo contínuo de corrente pode ser calculada da seguinte equação:

$$I_{s\min} = (1 - D) \cdot \frac{V_s}{2 \cdot L_1 \cdot F_s} \quad \text{Eq.: 12}$$

Como V_s , L_1 e F_s são constantes, o valor da corrente mínima varia com a largura de pulso D . Para mantermos o conversor sempre em modo contínuo, deve-se escolher o pior caso que será obtido quando D for mínimo, ou seja, o valor de D deve ser calculado para tensão V_e máxima.

Para calcular a ondulação de corrente no indutor verifica-se a seguinte equação:

$$\Delta I_L = \frac{V_{in} \cdot (1 - D) \cdot D}{L_f} \quad \text{Eq.:13}$$

Onde se observa para o cálculo do indutor a seguinte equação:



$$L = \frac{V_{in}}{4 \cdot f \cdot \Delta I_{L_{max}}} \quad \text{Eq.14}$$

A variação de tensão no capacitor ΔV_c é igual à variação de tensão da saída ΔV_o . Como o indutor e o capacitor atuam como filtro, pelo capacitor circula alta frequência e pela carga baixa frequência da corrente de saída. Assim pode-se determinar o valor do capacitor através de:

$$C = \frac{V_{in} \cdot (1-D) \cdot D}{8 \cdot L \cdot \Delta \cdot V_o \cdot f^2} \quad \text{Eq.: 15}$$

As principais características de um conversor CC-CC tipo *Buck* são as seguintes:

- Utilização como fonte chaveada;
- O conjunto filtro LC mais carga se comporta como uma carga LE (ou como uma carga RLE com resistência desprezível);
- Para efeito de análise pode-se assumir que a tensão de entrada V_{in} e a tensão de saída V_o são constantes, ou seja, não apresentam nenhuma oscilação;
- Possui dois modos de operação de acordo com a corrente no indutor:
 - Modo de Condução Contínua;
 - Modo de Condução Descontínua.

2.3. Seguidor de Máxima Potência

Os dois fatores que mais interferem negativamente na curva de geração do modulo fotovoltaico são os seguintes: irradiação solar e a temperatura. Desta forma, para análise do ponto de máxima potência é necessário avaliar de ambos fatores.

Podes-se analisar através das curvas apresentada na figura 9, os gráficos que motivam esta análise.

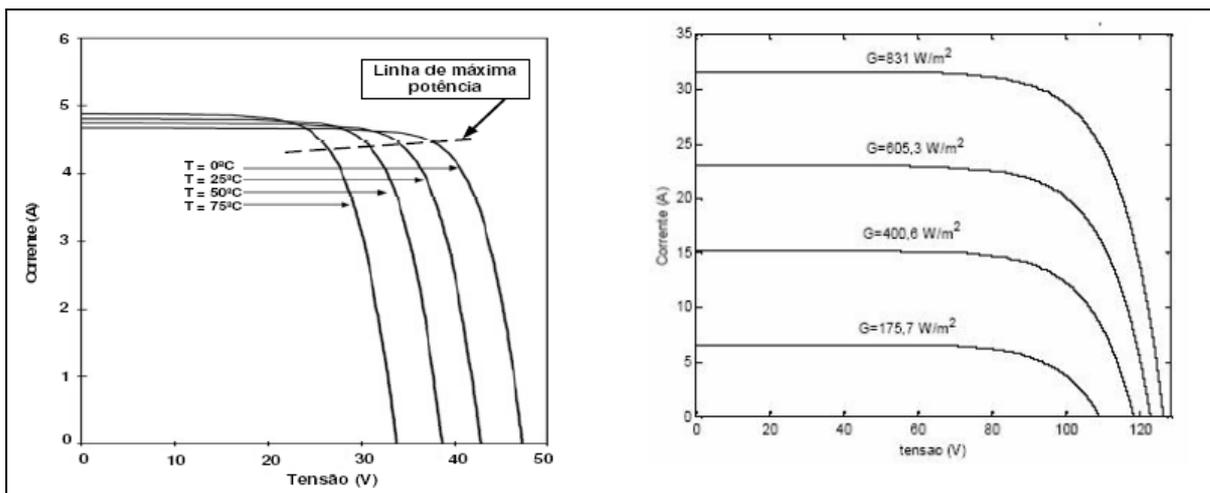


Figura 2.9 - (a) Curva IxV com variação de temperatura. (b) Curva IxV com variação de irradiação. [TRINDADE, Manuel, MARTINS, Júlio S., AFONSO, João L. Sistema para Otimização e Extração de Painéis Solares Fotovoltaicos. In CONFERENCIA SOBRE ENERGIA RENOVÁVEIS E AMBIENTE EM PORTUGAL. Azúrem, 2005/2006]

O ponto de máxima potência é o ponto da curva de tensão *versus* corrente de saída do painel solar em que se obtém a máxima potência de geração. A curva do painel varia constantemente devido principalmente a ação de dois parâmetros: temperatura e irradiação solar. Desta forma o ponto de máxima potencia também é alterado constantemente.

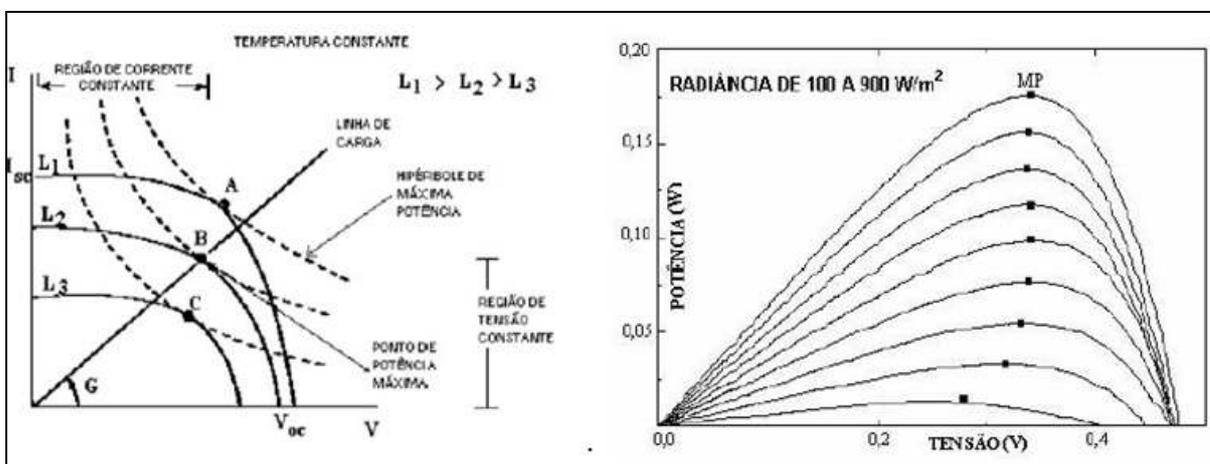


Figura 2.10 - (a) Curvas de $I_p \times V_p$ - (b) MPPT nas curvas de potência x tensão (a)[GARCIA, Pedro Donoso. Uma Viasão de Energia Fotovoltaica. Apostila Universidade Federal de Minas Gerais] (b) [SANTOS, Jancarle L, dos, ANTUNES, Fernando L. M. Seguidor de Máxima Potência para Sistemas Fotovoltaico. 2002]

As principais dificuldades no rastreo do ponto de máxima potência são:

- A busca constante, pois este não permanece estável devido a variação da temperatura e da incidência solar;



- Variação da tensão do módulo para realizar o processo de rastreamento do MPPT ao passo que fornece tensão constante a carga.

Para minimizar estas dificuldades, para fornecimento de energia a carga utiliza-se um conversor CC-CC que opera como interface entre o painel e o banco de baterias ou a própria carga, dependendo da topologia utilizada no projeto.

A necessidade de obter o máximo aproveitamento é quando há incidência reduzida de luminosidade sobre a superfície do módulo, nesta condição toda a energia armazenada no banco de baterias será de fundamental importância para manter o fornecimento de energia a carga consumidora pois não haverá geração suficiente nem para carregamento do banco de baterias bem como para alimentação dos consumidores.

Para um sistema isolado, ocorre um melhor aproveitamento, possibilitando um projeto onde se pode atender um número maior de cargas conectadas ao gerador por um intervalo de tempo maior.

2.3.1. Desenvolvimento de Sistema Fotovoltaico com MPPT (Maximum Power Point Tracker)

O aproveitamento da máxima potência do sistema fotovoltaico tem sido foco de diversos estudos. Como forma de explorar o MPP desenvolveu-se um circuito denominado como Seguidor de Máxima Potência ou MPPT (Maximum Power Point Tracker)

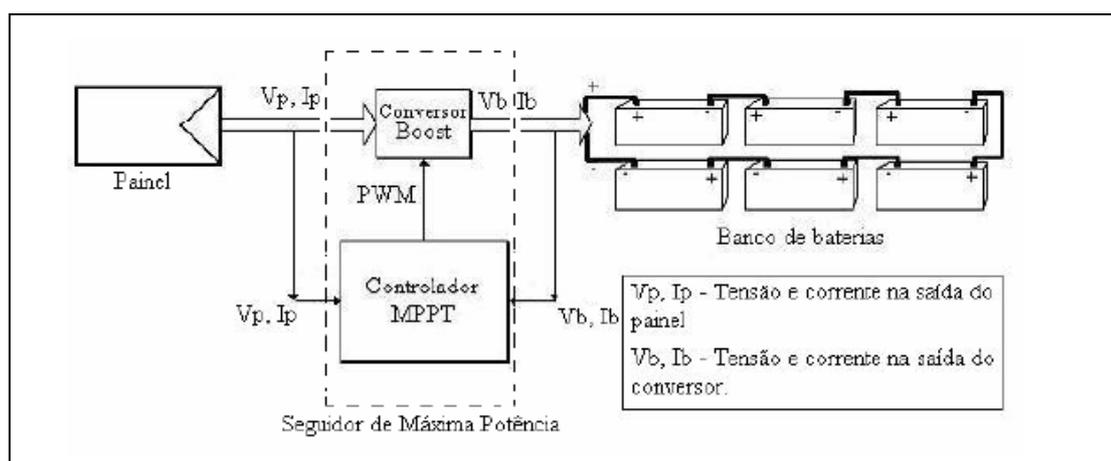


Figura 2.11 - Modelo de um Sistema de Geração fotovoltaica com MPPT. [TRINDADE, Manuel, MARTINS, Júlio S., AFONSO, João L. Sistema para Otimização e Extração de Painéis Solares Fotovoltaicos. In CONFERENCIA SOBRE ENERGIA RENOVÁVEIS E AMBIENTE EM PORTUGAL. Azúrem, 2005/2006]

Um seguidor de máxima potência é um dispositivo que tem como objetivo obter através da curva de potência do modulo fotovoltaico, o ponto em que o painel poderá fornecer a máxima potência.

Este dispositivo de verificação e obtenção do ponto de máxima potência é constituído de uma serie de elementos associados afim de encontrar o ponto de máxima potencia e sobre ele realizar a operação do gerador.

As formas mais usuais de aplicação deste método é através de conversores CC-CC com topologia *Buck*, quando é necessário reduzir a tensão gerada, e tipo *Boost*, quando é necessário elevar a tensão em relação a entrada.

O controle da operação do conversor é dado através da geração de um sinal PWM, que é responsável pelo chaveamento do conversor.

No diagrama de blocos a seguir pode-se analisar a forma de operação no ponto de máxima potência.

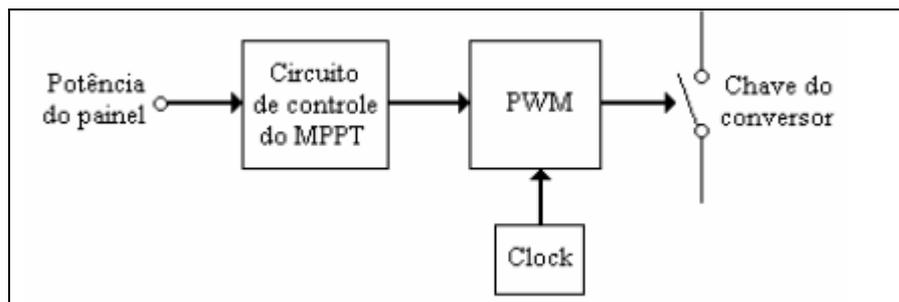


Figura 2.12 - Diagrama Controlador de MPPT [LASNIER, France, ANG, Tony Gan. *Photovoltaic engineering handbook*.Bangkok: ADAM HILGER, 1990]

Por se tratar de um gerador o circuito de MPPT deve apresentar uma resposta rápida, haja vista, que a mudança na curva de geração é constante pois depende da irradiação solar e da temperatura.

O MPPT opera em consonância com o conversor CC-CC monitorando constantemente a tensão e a corrente que o painel está fornecendo a carga. Os valores mensurados são multiplicados a fim de obter-se a curva de potência.

Há várias técnicas para obter-se a melhor resposta e conseqüentemente otimizar a geração de energia as quais serão apresentadas a seguir tendo como base os seguintes requisitos fundamentais para o desenvolvimento:

- Estabilidade;
- Rápida resposta dinâmica;
- Pequeno erro em regime permanente;
- Robustez a distúrbios;
- Eficiência em diferentes níveis de potência.

2.3.2. Métodos de Busca do Ponto de Máxima Potência

Os métodos estudados para identificação e operação do ponto de máxima potencia do modulo fotovoltaico não são facilmente encontrados nas bibliografias convencionais, contudo existem diversos artigos relacionados a este tema que tem como objetivo promover a expansão da geração de formas a aumentar seu rendimento minimizando os custos. (TRINDADE, Manuel, MARTINS, Júlio S., AFONSO, João L. Sistema para Otimização e Extração de Painéis Solares Fotovoltaicos. In CONFERENCIA SOBRE ENERGIA RENOVÁVEIS E AMBIENTE EM PORTUGAL. Azúrem, 2005/2006)

Os métodos abaixo são brevemente descritos:

- Método da Perturbação;
- Método Computacional;
- Aproximação por Característica da Célula Fotovoltaica;
- Método da Derivada Segunda da Potência;
- Aproximação por Harmônica.

2.3.3. Método da Perturbação

Este é o método mais utilizado para obtenção do MPTT é o método da perturbação devido a simplicidade de sua topologia. O método consiste na medição de tensão e corrente do modulo durante o processo de geração, obtendo através destes parâmetros a potência de geração. A potencia (P1) obtida é armazenada através de um sistema de armazenamento de dados implementado a partir de um Hardware, em seguida uma nova medição é feita e novamente é calculada a potência (P2), esta novo dado calculado é comparado com o dado armazenado anteriormente (P1), através desta comparação é possível através da variação do duty cycle gerado pelo PWM variar a tensão do modulo. Se esta perturbação

resultar no aumento de energia gerada, então uma nova perturbação será realizada no mesmo sentido, caso a perturbação resultar na diminuição de energia, uma nova perturbação será realizada no sentido contrário, buscando deste modo continuamente o ponto de máxima potência. A tensão é alterada a cada ciclo de MPPT e quando o ponto de máxima potência é alcançado, a tensão do painel oscila continuamente em torno deste. Uma desvantagem da técnica de perturbação é que as oscilações que existem em torno do ponto máxima potência não permitem um melhor aproveitamento da energia. Na figura 12 pode-se avaliar a curva de potência com o método da perturbação.

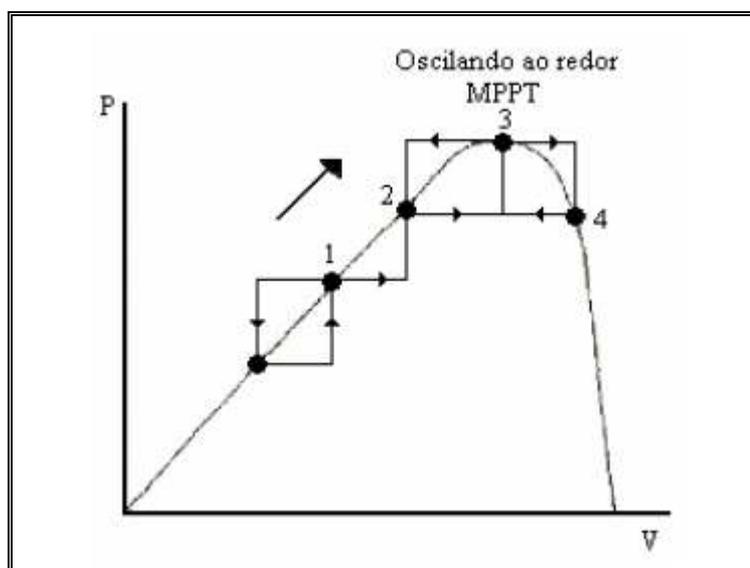


Figura 2.13 - Visualização do método da perturbação para obtenção do MPPT. [S. Armstrong; W.G. Hurley. Self-regulating maximum power point tracking for solar energy systems. *REVISTA IEEE*, Ireland, v.2, p. 6-8, Sept. 2004.]

2.3.4. Método Computacional

Uma melhoria do método de perturbação é a aproximação incremental da condutância, o método computacional também conhecido como método da derivada, minimiza este problema devido a análise da condutância do módulo. A aproximação incremental da condutância é baseada no fato que a derivada da energia de saída com observância a tensão de geração no módulo é igual a zero no ponto de máxima potência. A tensão de saída do módulo é ajustada tendo como referencia a tensão de pico, medindo e comparando a condutância incremental (ΔG , dI/dV) e instantânea da disposição (G , $1/V$). A função do algoritmo é rastrear o ponto de operação da tensão em que a condutância seja igual a condutância

incremental e realizar a opção relativo ao ajuste do ciclo de operação, ou seja, a variação do “duty cycle” de controle do conversor CC-CC. Conseqüentemente, o algoritmo deverá rastrear a circunstancia onde dP/dV for igual a zero ou equivalente, onde $dI/dP = -I/V$. na figura 12 pode-se observar o método computacional

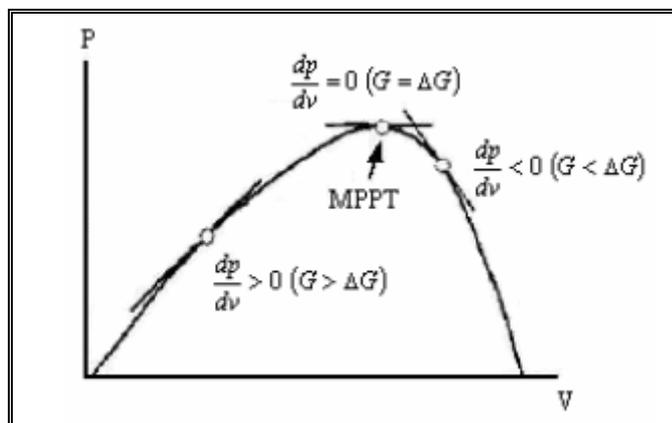


Figura 2.14 - Análise do Método Computacional. [S. Armstrong; W.G. Hurley. Self-regulating maximum power point tracking for solar energy systems. *REVISTA IEEE*, Ireland, v.2, p. 6-8, Sept. 2004.]

2.3.5. Aproximação por Características da Célula Fotovoltaica.

Um outro método de seguir o ponto de máxima potencia é o método de realimentação da tensão. Esta aproximação é utilizada somente nas nas situações onde a irradiação do sol é constante, como no caso de sistemas satélites ou nos sistemas onde as variações mais importantes estão na carga. A tensão terminal do modulo é utilizada como variável de controle deste método. O ponto de máxima potência é obtido regulando a tensão de geração do modulo, em consonância a uma tensão pré-definida fixa. Esta tensão é suposta para ser uma aproximação adequada do ponto de máxima potência. Esta aproximação pode resultar em uma perda de energia do painel sobre circunstâncias de variações atmosféricas, enquanto supõe que todas as variações na temperatura e na irradiação são insignificantes. Os inconvenientes deste método são tratados no método da tensão do circuito aberto. Esta técnica usa as características da célula solar e é baseada na operação próxima ao ponto de máxima potência quando a tensão da célula solar é igual a 76% da tensão do circuito aberto. Este fator da tensão de

proporcionalidade é fixo para um gerador fotovoltaico dado não obstante a temperatura, a insolação e a configuração do módulo (normalmente dentro de 2% deste valor dependendo do nível de produção, da temperatura e da luz do sol. A tensão do circuito aberto de um painel é medida momentânea, interrompendo sua operação normal, fechando o conversor CC-CC para aproximadamente 0,5ms (que rejeita assim 0,05% da energia disponível), 76% da tensão do circuito aberto é medida e mantida em um circuito de armazenamento como a referencia para o laço de controle até o exemplo seguinte da amostragem. A tensão do painel é então realimentada e comparada com este sinal de referencia. O sinal resultante do erro é usado como uma entrada à largura de pulso de modulação e controle do conversor CC-CC. A desvantagem deste método é que devido a utilização de um fator fixo de 76% para estimar a tensão no ponto de máxima potência, poderão ocorrer situações em que o painel não esteja operando no MPP. Na figura 13 observa-se o gráfico da relação da tensão que se tem a máxima potência e da tensão de circuito aberto da célula solar, está é realizada através de uma aproximação linear da função.

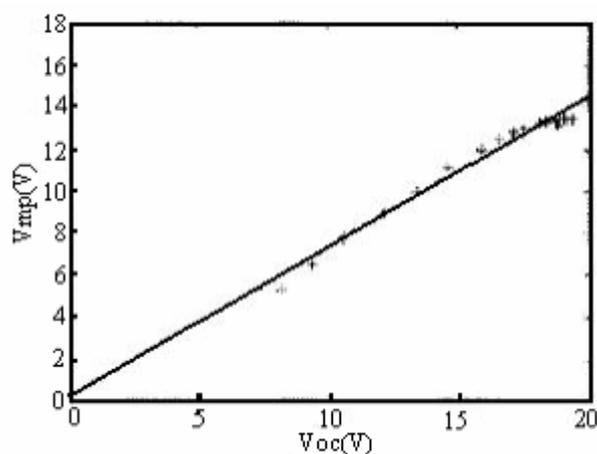


Figura 2.15 - Tensão corresponde à máxima potência x tensão de célula de circuito aberto. [S. Armstrong; W.G. Hurley. Self-regulating maximum power point tracking for solar energy systems. *REVISTA IEEE*, Ireland, v.2, p. 6-8, Sept. 2004.]

2.3.6. Método da Derivada Segunda da Potência

O método da derivada segunda é basicamente a implementação de um algoritmo de detecção da inclinação. O ponto de máxima potência é obtido quando a derivada segunda de dP/dV está em um máximo negativo. Uma maneira de melhorar a eficiência de busca é aumentar a variação de tensão do modulo quando o ponto de máxima potencia estiver afastado, e diminuir quando estiver próximo. Esta aproximação será também vantajosa porque a variável de controle do algoritmo não necessita identificar as características solares da disposição afim de seguir o ponto de pico da potência.

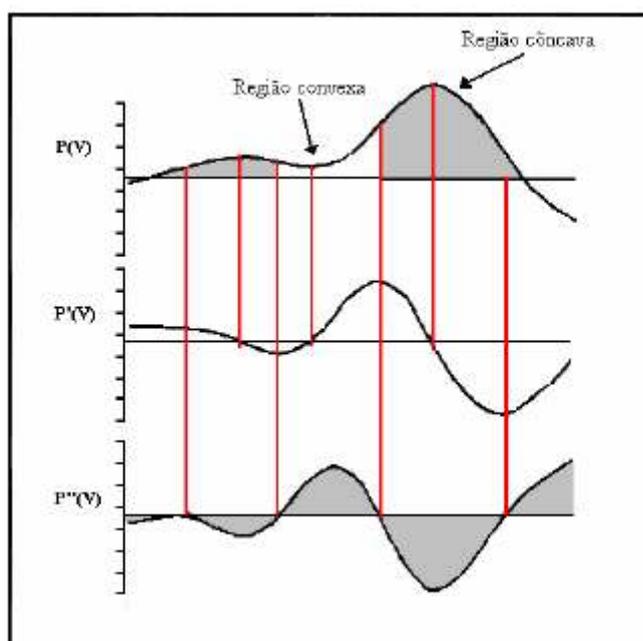


Figura 2.16 - Método da Derivada Segunda da Potência. [S. Armstrong; W.G. Hurley. Self-regulating maximum power point tracking for solar energy systems. *REVISTA IEEE*, Ireland, v.2, p. 6-8, Sept. 2004.]

2.3.7. Aproximação por Harmônica.

Esta aproximação proposta emprega o fato que uma perturbação da tensão CA no sistema resulta em uma perturbação na corrente, como pode ser observada através da figura 15. Dependendo da posição na curva característica I-V onde o sistema é perturbado, o nível dos harmônicos que se obterá na tensão de saída do sistema irá variar. O relacionamento do índice harmônico de tensão senoidal e da curva atual pode ser usado para determinar o ponto de máxima potência.

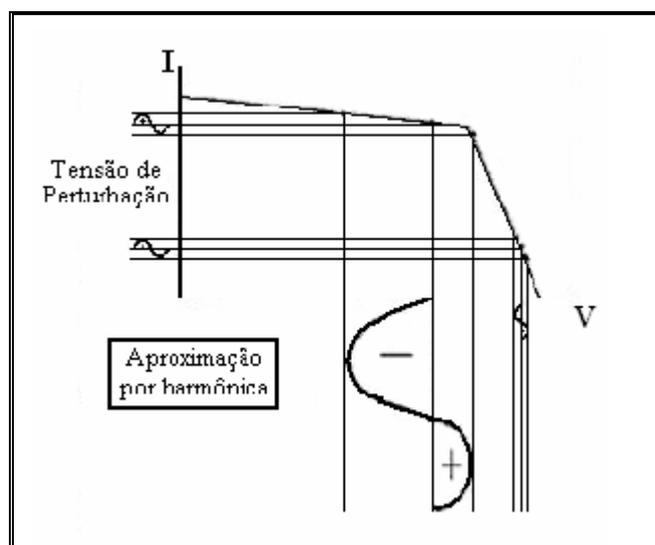


Figura 2.17 - Implementação do Método de Aproximação por Harmônica.

Cada método apresentado possui características próprias, que influem no aproveitamento da energia gerada e na resposta do sistema as variações da condição de temperatura e incidência solar. Por isso, é fundamental conhecer perfeitamente o resultado que se deseja obter com o projeto do seguidor afim de escolher o melhor método.

Analisando os métodos apresentados verifica-se que alguns destes apresentam estabilidade no rastreamento do ponto de máxima potência como é o caso do método computacional e da derivada segunda, em relação ao método da perturbação. Outros já apresentaram resposta dinâmica rápida, como é o caso da característica da célula. Mas a resposta dinâmica de outros métodos pode ser alterada dependendo do escalonamento da tensão, ou seja, alterar a cada passo de busca do intervalo de tensão para maior quanto mais distante estiver o MPPT e diminuir a medida que este se aproxima. Na escolha do método é relevante a análise de sua eficiência para diferentes níveis de incidência solar sobre a superfície



do modulo. Alguns métodos apresentam faixa restrita de atuação, a exemplo do método aproximação através das características do modulo, outro extremo são os métodos da perturbação e da aproximação harmônica que par pequena incidência não apresenta uma eficiência satisfatória. Enquanto os métodos da derivada primeira e computacional possuem boa eficiência para uma faixa de grande variação de incidência.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os métodos e os materiais a serem aplicados para o desenvolvimento do protótipo, bem como o detalhamento do projeto compreendendo sistemas mecânicos, sistemas de energia, hardware e software para desenvolvimento da aplicação.

3.1. Descrição Geral do Sistema

Um protótipo desta natureza visa atender necessidades do fornecimento de energia elétrica a partir de fonte de energia alternativa focado em estratificar o máximo aproveitamento de todos os recursos disponíveis minimizando as perdas.

O sistema será detalhado a seguir de acordo com as etapas de execução pré-definidas durante a implantação e seu detalhamento será realizado ao longo deste capítulo de acordo com cada segmento do projeto.

Para viabilizar o projeto dos sistemas mecânicos do protótipo deverá ser desenvolvida uma estrutura dimensionada para sustentar o gerador fotovoltaico especificado para aplicação, a estrutura móvel pode orientar a superfície do módulo fotovoltaico na direção da emissão direta dos raios solares fazendo com que a captação seja máxima a qualquer momento do dia.

A fim de realizar o controle da orientação do painel em relação a posição solar deve ser implementado um circuito de composição analógica a dois elementos ou mais elementos a fim de controlar a irradiação solar. Isto pode ser realizado através de fototransistor ou LDR's com objetivo de acionar e controlar o motor que movimenta a estrutura orientando o módulo fotovoltaico ao longo do dia.

A partir da irradiação do sol sobre o painel conforme descrito no capítulo 2,, verifica-se a geração de energia realizada pelas células fotovoltaicas. Visando otimizar o rendimento do gerador pode ser utilizada a topologia de um conversor CC-CC com seguidor do ponto de máxima potência do painel aplicando o método da perturbação conforme analisado anteriormente.

O controle e monitoramento do seguidor do ponto de máxima potência podem ser realizados de diversas formas com utilização de microcontroladores ou



através de outras formas de controle e monitoramento utilizando como base sistemas computacionais aplicados a aquisição e tratamento de dados analógicos e digitais, podendo ser utilizado comunicação paralela ou serial.

Com desenvolvimento deste conversor é possível que o gerador opere , durante o processo de geração, sobre o ponto de máxima potência otimizando a eficiência deste.

3.2. Descrição do Módulo Fotovoltaico

O sistema de geração de energia a partir do gerador fotovoltaico pode ser implementado a partir de módulos com capacidade necessária para atendimentos das cargas de acordo com a potencia de geração disponíveis pelos fabricantes.

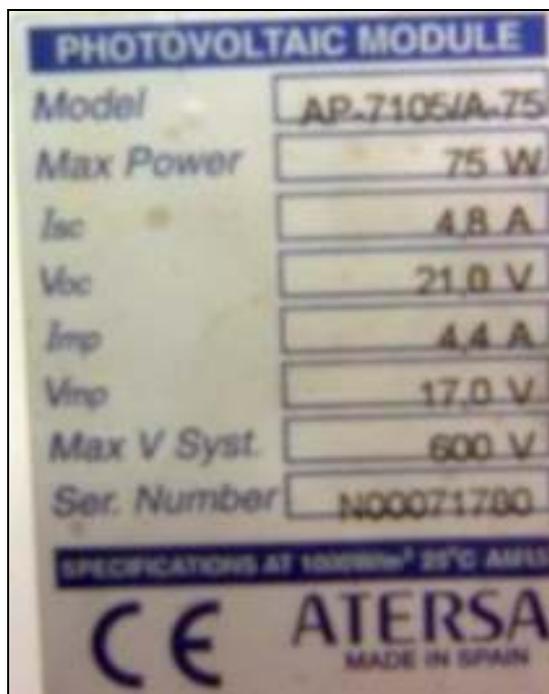
Devem ser observados os demais parâmetros do módulo e tomar como base para dimensionamento e rendimento as curvas características de carga que variam de acordo com a incidência solar na superfície do painel, desta forma o painel pode ser instalado sobre uma superfície móvel que tem como objetivo principal orientar a superfície do em direção a incidência direta do sol fazendo com que os raios emitidos pelo sol tenham incidência direta e normal (\vec{n}) a superfície do modulo.

O gerador utilizado para implementação do projeto foi fornecido pela instituição, desta forma todo o dimensionamento do projeto foi realizado tendo em vista as limitações dinâmicas e estáticas do modulo fotovoltaico.

Para que seja possível otimizar a operação do gerador utilizando toda a energia emitida pelo sol durante o longo do dia, é necessário definir a inclinação que este deve dispor em relação a superfície da terra um sistema mecânico capaz de direcionar a superfície do modulo a 90° em relação a incidência dos raios solares, desta forma ao longo do dia o aproveitamento dos raios solares poderá ter seu rendimento ampliado em até 35% comparado a geradores fixos de acordo com testes realizados com carga fixa.

O sistema mecânico a ser desenvolvido deve ser projetado de acordo com as características mecânicas do gerador. Devem ser contempladas para efeito de cálculo a massa e as dimensões do perfil, afim de que este possa dispor de uma fixação segura e a movimentação em regime contínuo minimizando a vibração durante a frenagem e inicio do movimento.

O módulo de referência apresentado é o mesmo utilizado para aplicação no projeto e possui as algumas características impressas no próprio módulo, como mostra a figura 16.



PHOTOVOLTAIC MODULE	
Model	AP-7105/A-75
Max Power	75 W
Isc	4,8 A
Voc	21,0 V
Imp	4,4 A
Vmp	17,0 V
Max V Syst.	600 V
Ser. Number	N00071700

SPECIFICATIONS AT 1000W/m² 25°C AM1.5

CE ATERSA
MADE IN SPAIN

Figura 3.1 - Dados característicos do Gerador

Os dados nominais do módulo são:

- Fabricante – ATERSA
- Modelo – AP-7105/A-75
- Potência Máxima – 75W
- Isc (Corrente de Curto Circuito) – 4,8A
- Voc (tensão a circuito aberto) – 21V
- Imp (Corrente máxima de operação) – 4,4A
- Vmp (Tensão em Regime Permanente) – 17Vcc
- Max V System – (Nível de isolamento) – 600V

A figura 17 apresenta mais algumas características construtivas extraídas do catálogo do fabricante.



Figura 3.2 - Dados Construtivos do Gerador A-75M [Catálogo de Produto www.atersa.com]

Para que seja possível otimizar a extração da energia do módulo é necessário conhecer as características de geração que variam de acordo com a incidência solar sobre a superfície do módulo. Desta forma, é indispensável a utilização das curvas características do gerador, as quais são mostradas na figura 18. Estas serão utilizadas para desenvolvimento do conversor CC-CC responsável pelo circuito seguidor de máxima potência.

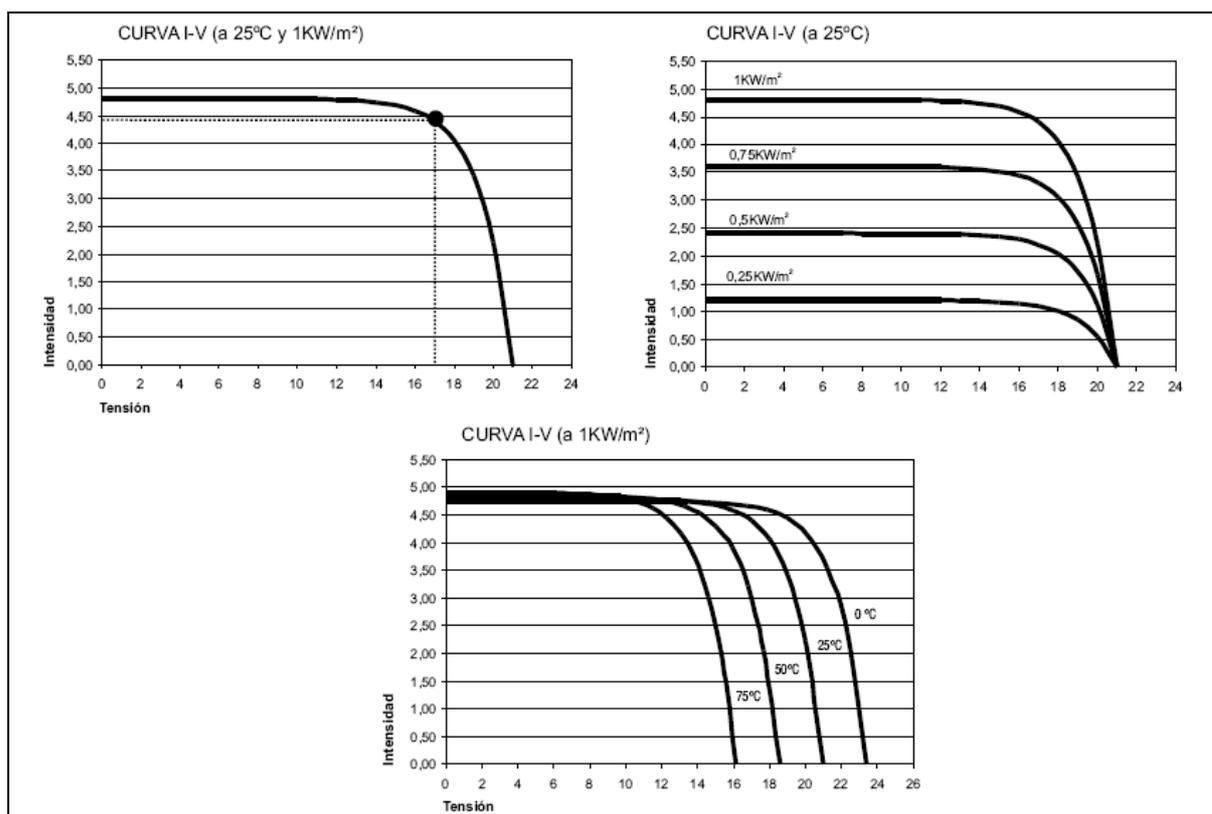


Figura 3.3 - Curvas Características do Gerador Fotovoltaico ATERSA A-75M [Catálogo de Produto www.atersa.com]

3.3. Sistema Seguidor do movimento aparente do sol

Seguidor solar é um dispositivo implementado para orientar módulos fotovoltaicos de forma que estes estejam sempre com sua superfície voltadas para o sol para que haja maior incidência de raios solares perpendiculares a superfície do mesmo. Desta forma o rendimento aumenta com a maior incidência da componente de energia direta.

O seguimento solar pode ser obtido através de cálculos de posicionamento do conjunto de conversão de energia, onde são considerados parâmetros como declividade terrestre, latitude, ângulo horário, dia e ano. Estes são utilizados onde o grau de precisão é importante, contudo na maior parte dos sistemas ativos de seguimento o arranjo de sensores ópticos é suficiente para determinar a posição solar através de sistemas eletrônicos.

Os modelos desenvolvidos podem ser ativos, impulsionados por motores elétricos e conjunto de polias, engrenagens ou correias. São considerados passivos quando o movimento é baseado no deslocamento de um fluido.

O movimento pode dispor de orientação polar, norte-sul ou leste oeste aplicando dois eixos a estrutura mecânica.

Em termos de orientação, os módulos deverão estar dispostos de forma a terem a maior exposição solar possível. A orientação com maior exposição no Brasil é Norte. A inclinação dos módulos depende do fim a que estes se destinam. Em sistemas isolados (sem ligação à rede) a inclinação recomendada é de 15° superior ao da latitude do local de instalação, pois nestes casos o fornecimento de energia no Inverno é fundamental. Em sistemas ligados à rede a inclinação recomendada é 10° abaixo da latitude do local de instalação, pois nestes casos o objetivo principal é a maximização da produção anual de energia. (OLIVEIRA, Maurício, Madeira *Análise do Desempenho de um Gerador Fotovoltaico com Seguidor Solar Azimutal*, Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica. UFRGS, 2008)



Figura 3.4 - Modelo de seguidor com eixo orientação leste-oeste [OLIVEIRA, Maurício, Madeira *Análise do Desempenho de um Gerador Fotovoltaico com Seguidor Solar Azimutal*, Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica. UFRGS, 2008]

Na maioria das aplicações de sistemas de seguimento solar, o posicionamento do conjunto de conversão de energia é baseado em sensores ópticos como fototransistores, fotodiodos, LDR's (resistores dependentes de luz) e células



fotovoltaicas. Os sensores óticos são utilizados em pares e um isolamento maciço com objetivo de bloquear a intensidade luminosa em um dos elementos dos pares. Desta forma, quando ambos estiverem igualmente iluminados pelo sol, haverá igual incidência da radiação solar o que determina que estes estejam voltados para o sol, caso contrário o sistema de controle irá determinar o acionamento do motor responsável pela movimentação para que o módulo se posicione de forma a absorver os raios solares perpendiculares aos módulos fotovoltaicos.

3.4. Conversor CC-CC

Como mencionado anteriormente para utilização de um sistema de geração de energia fotovoltaica é necessário dimensionamento de um conversor CC-CC este tem como objetivo principal regular a tensão de saída, devido à variação do sinal disparo do “*gate*” a partir do gerador PWM.

O conversor CC-CC é uma fonte chaveada e na composição do circuito seguidor de máxima potência é de fundamental importância, pois através deste é realizada o ajuste de tensão fornecida à carga. Para execução deste projeto será abordada a topologia do conversor tipo *Buck*, aplicada quando a tensão de saída é menor que a tensão de entrada.

O circuito de potência do conversor *Buck* dispõe de uma topologia bastante simples, os componentes, se bem dimensionados, operam com eficiência e são observadas poucas perdas, introduzindo pequenas variações ao resultado esperado.

Para que seja possível realizar a implementação, devem ser aplicadas as equações apresentadas no capítulo 2, tendo como objetivo principal ajustar a tensão de saída (V_o) em relação à tensão de entrada (V_{in}), desta forma é possível garantir o fornecimento de energia a carga mesmo com a variação da tensão de entrada, o que atenderá a demanda mesmo com a variação da irradiação do sol incidente no módulo, garantindo a carga processo contínuo de geração de energia.

Naturalmente existem limites passíveis de tensão de geração que não permitem a perfeita operação do conversor, minimizando a corrente de saída

fazendo com que o conversor passe a operar em modo descontinuo, desta forma não é possível garantir o funcionamento adequado do seguidor de máxima potência.

A saída do conversor CC-CC será conectada diretamente aos terminais da bateria responsável pelo fornecimento de energia elétrica para a carga.

3.5. Circuito seguidor de máxima potência

O método utilizado para controle do disparo do conversor CC-CC é realizado através do sinal *PWM* gerado para obter o correto funcionamento do Mosfet. Este sinal modulado ao ser aplicado o terminal *gate* do *Mosfet* faz com que este opere na frequência da modulação proporcionada pelo agente gerador do sinal, este pode ser implementado através de hardware ou software dependendo da disponibilidade dos recursos.

Para controle do sinal PWM mais usual para desenvolvimento do seguidor de máxima potencia é o método da perturbação e observação que consiste em constantemente medir os valores de tensão e corrente que o painel está gerando e comparar com os valores medidos anteriormente para decidir sobre o aumento ou redução do *duty cycle*, ou seja, variar o valor de Ton do sinal PWM a ser injetado n Mosfet. Na figura 20 pode-se observar o digrama funcional lógico de controle usual.

O Duty Cycle dispõe de uma faixa de operação para que se obtenha na saída um valor constante para uma determinada variação na tensão de entrada, ou seja, a tensão de geração. Esta faixa de operação é determinada através da expressão $v_i = v_o \cdot (1 - D)$. Para que esta implementação seja possível, deve se estabelecer o valor de V_o e com a variação de V_i determinam-se os valores máximos e mínimos do Duty Cycle.

Usualmente o as rotinas de programação são implementadas apartir de microcontroladores. Segundo Jancarle L. dos Santos um dos microcontrolaores propostos para esta aplicação são os pertencentes à família dos 8051 da ATMEL. O circuito de monitoramento e controle consiste na aplicação de um conversor analógico-digital A/D. Este é habilitado a partir de uma lógica desenvolvida pelo microcontrolador realizando uma leitura analógica do circuito de potência tomando como base os valores de tensão gerada pelo modulo e corrente de circulação. Estas grandezas analógicas são digitalizadas transmitidas para a unidade de

processamento do microcontrolador, a unidade de processamento realiza o cálculo da potência instantânea de operação do painel realizando o produto entre as grandezas medidas obtendo a potência atual. Com a posse deste dado a unidade de processamento compara a potência atual obtida a partir de I_p e V_p com a potência medida anteriormente para modificar Duty Cycle, aumentando ou diminuindo o mesmo.

Após calculado e comparado o sinal digital de saída é enviado a um conversor digital-analógico D/A onde o valor digital binário torna-se analógico novamente, variando fazendo com que o hardware modulador de PWM modulando a tensão de saída de acordo com necessidade da carga, mesmo quando da variação da corrente.

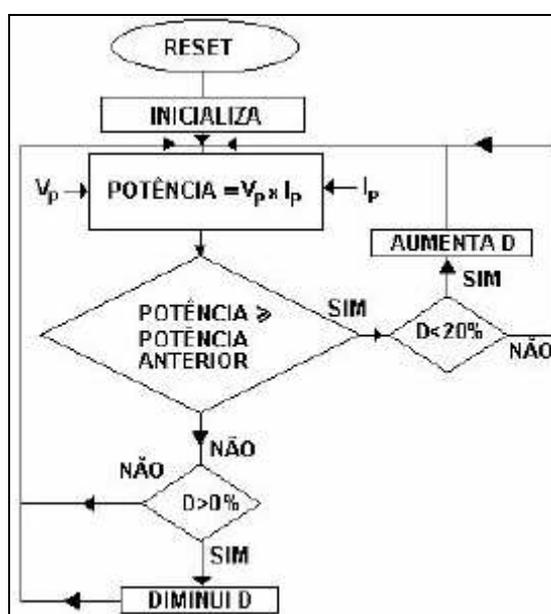


Figura 3.5 - Fluxograma de Controle do Seguidor de Máxima Potência.) [SANTOS, Jancarle L, dos, ANTUNES, Fernando L. M. Seguidor de Máxima Potência para Sistemas Fotovoltaico. 2002]

O sinal PWM necessário para controle do chaveamento do MOSFET pode ser implementado de diversas formas. Desta forma de acordo com a topologia dos projetos o PWM pode ser desenvolvido via software, ou via hardware como realizado neste projeto utilizando LM3524 fabricado pela NATIONAL.

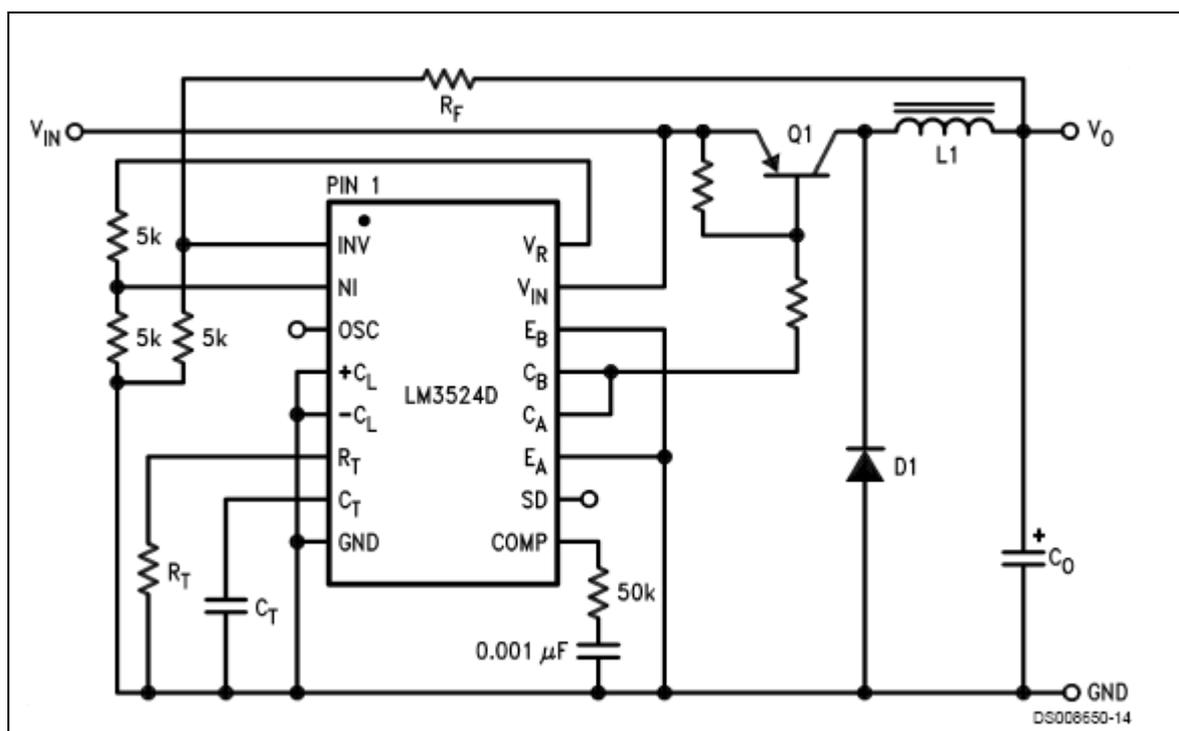


Figura 3.6 - Topologia Regulagem positiva de chaveamento do MOSFET sugerido pela NATIONAL.[DataSheet do Fabricante www.national.com]

O ajuste do PWM define a tensão na saída do conversor conforme descrito no capítulo 2. Este dispositivo tem como função regular a tensão de saída do conversor haja vista, que o Duty Cycle do sinal PWM será ajustado através de rotinas desenvolvidas por software que definirá o ajuste de acordo com variação do ponto de máxima potência do gerador fazendo com que este opere plenamente no ponto em questão otimizando sua operação. Este sinal de tensão contínua regula largura do ciclo gerado chaveando o MOSFET a cada ciclo.

A frequência de operação aplicada a este tipo de sistema de ser a partir de 20kHz afim de garantir a correta operação do MOSFET.

3.6. Descrição dos Sistemas de Aquisição de Dados

Para realização do seguidor de máxima potência é fundamental o monitoramento constante dos parâmetros elétricos aplicados no circuito de potencia em particular tensão do gerador V_{in} e corrente de carga I_o que será a mesma corrente do gerador.

Estes parâmetros analógicos deverão ser mensurados de forma analógica e digitalizados a fim de que possam ser realizadas aplicações necessárias para a obtenção do ponto de máxima potência sobre a curva de carga do gerador.

Com o objetivo de realizar a conversão dos dados analógicos para digital, existem diversos recursos e hardwares disponíveis no mercado para realizar esta implementação, contudo é necessária a análise de alguns parâmetros condicionantes a o que de fato se deseja medir, avaliando as grandezas e os tempos de leitura e conversão.

Nesta aplicação como se deve obter os parâmetros de duas ou mais grandezas do circuito, o ideal é que seja implementado um hardware capaz de converter várias grandezas de uma única vez e simultaneamente. Para tanto o hardware adequado a esta condição disponível no mercado é o ADC0808, este apresenta as características técnicas necessárias para realizar a conversão dos dados a serem tratados visando o cálculo da potência através de um sistema microprocessado.

O conversor analógico Digital ADC0808, de 8 bits e tempos de $100\mu\text{s}$ produzido pela *TEXAS Instruments*, que incorpora um multiplexador de oito canais analógicos e toda a lógica de controle.

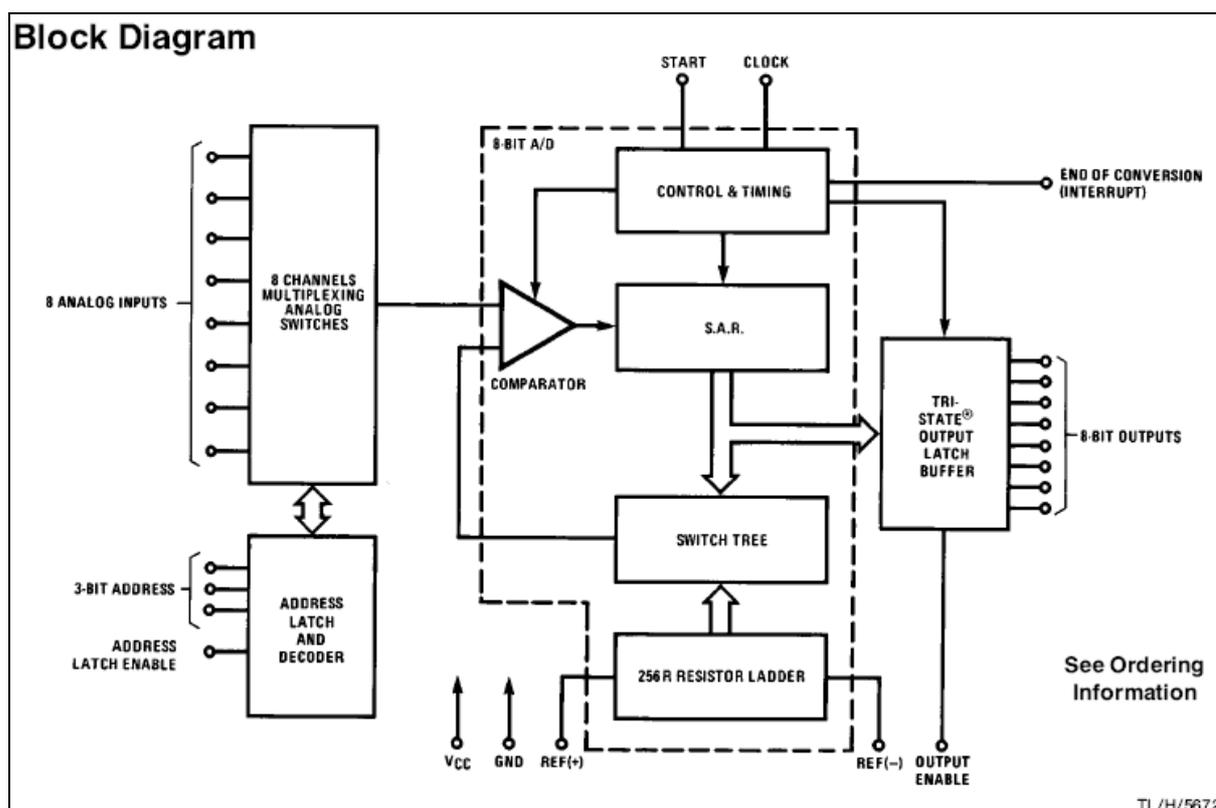


Figura 3.7 - Diagrama de Funcionamento do Conversor ADC0808

Para que possível realizar o tratamento de dados é necessário enviar os dados digitalizados em 8 bits para o PC. A transmissão dos dados pode ser realizada

de forma paralela ou serial dependendo da aplicação que será utilizada para realizar o tratamento.

Usualmente a transmissão dos dados é realizada de forma serial utilizando um microcontrolador para que sejam realizadas as operações aritméticas para realização do ajuste do *PWM*.

O digrama funcional da figura 24 exemplifica a operação do sistema de seguidor de máxima potência através do microcontrolador da família 8051

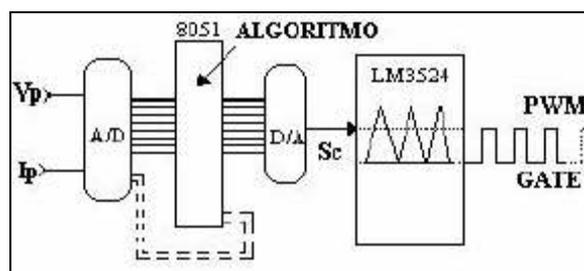


Figura 3.8 - Ajuste do PWM através do microcontrolador da Família 8051) [SANTOS, Jancarle L, dos, ANTUNES, Fernando L. M. Seguidor de Máxima Potência para Sistemas Fotovoltaico. 2002]

Outra forma mais simples de realizar a implantação e controle do seguidor de máxima é através da transmissão paralela dos dados convertidos transmitidos através da porta paralela.

A transmissão através da porta paralela, tal como o nome indica, é feita através de 8 condutores distintos em paralelo capazes de transmitir 8 bits de dados.

O cabo tem uma grande espessura contendo 25 condutores e a transferência dos dados é controlada através do standard Centronics (Interface standard ou elo de ligação).

Com o aparecimento da porta paralela bidireccional (EPP/ECP), ela tem tido muito sucesso pois tem uma elevada taxa de transferência, chegando a atingir 1Mb por segundo, desta forma muitos periféricos utilizam esta porta.

A porta paralela pode ser facilmente controlada. Basta perceber de programação que rapidamente se consegue um programa de modo a que ela controle um aparelho conectado a ela. Podemos também fazer um programa de transferência de Dados.



Na transmissão unidireccional a porta paralela SPP (Standard Parallel Port) pode chegar a uma taxa de transmissão de dados a 150KB/s. Comunica-se com o computador utilizando um Bus de dados de 8 bits.

Para a transmissão de dados entre periféricos são usados 4 bits por vez.

Na transmissão bidireccional a porta avançada EPP (Enhanced Parallel Port) chega a atingir uma taxa de transferência de 2 MB/s. No entanto, para atingir essa velocidade, será necessário um cabo especial. Comunica-se com o computador utilizando um Bus de dados de 32 bits. Para a transmissão de dados entre periféricos são usados 8 bits por vez.

A porta avançada ECP (Enhanced Capabilities Port) tem as mesmas características que a EPP, porém, utiliza DMA (acesso directo à memória), sem a necessidade do uso do processador para a transferência de dados. Utiliza também um buffer de 16 bytes.

Este tipo de ligação tem uma desvantagem que é o facto de a tensão provocada em todas as linhas gerarem uma linha cruzada que enfraquece o sinal à medida que o cabo vai aumentando.

Mas, como é óbvio, existe uma grande vantagem da tecnologia da porta paralela. Essa vantagem é que não requer nenhum software para se dar a transferência de dados pois o trabalho que o software poderia fazer é substituído pelo trabalho do hardware. Para isso, o hardware utiliza rotinas para reduzir a maioria dos comandos do software.

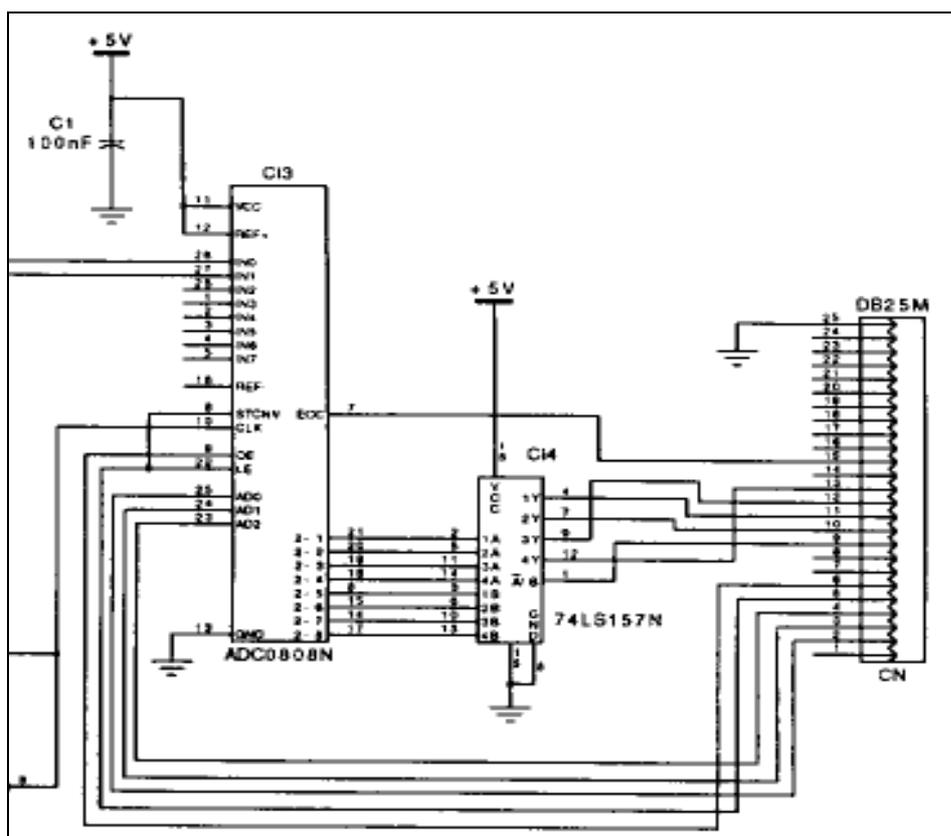


Figura 3.9 - Modelo de interface ADC0808 através com Porta Paralela
[http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/v20_293.pdf]

Para realizar o tratamento dos dados é necessário dispor de um compilador capaz de prover a programação e executar a operação desejada visando obter o seguidor de máxima potencia.

Para este tipo de aplicação utiliza-se o compilador do *Borland C++ Builder*. Esta ferramenta permite editar, compilar, ligar, executar e depurara programas dentro de um único ambiente. Como sua denominação indica, este é um compilador de C++. No entanto, se for utilizado apropriadamente também é capaz de compilar a linguagem C.

Os estados de desenvolvimento de um programa em C são os seguintes:

- Criação do programa fonte (texto);
- Compilação deste programa (tradução para código executável);
- Execução do código produzido

Em caso de detecção de qualquer erro em qualquer dos estados, todos eeles deverão ser repetidos desde o inicio.



Após a realização do programa responsável pelo controle *Duty Cycle* este retorna o dado tratado e ajustado, de acordo com as rotinas implementadas para o circuito analógico, sendo necessária uma nova conversão dos dados digitais em analógicos. Para prover esta conversão é usual a utilização do hardware comercial DAC0808, trata-se de um conversor Digital-Analógico de 8 bits responsável pelo sinal a ser introduzido no controle do PWM provido através do hardware gerado de PWM o LM3524.

Depois de realizada a rotina aplicada conforme o método da perturbação, mencionada no capítulo 2, o novo ajuste deve ser emitido para o sistema, assim este deve ser convertido novamente um sinal analógico com capacidade de prover a alteração do de tensão de ajuste do PWM.

Nesta conversão digital-analógica um sinal de 8 bits deve ser convertido em um único sinal de tensão que irá variar de acordo com nível lógico emitido pela porta paralela. O hardware comercial dedicado a este tipo de operação é o DAC0808 fabricado pela NATIONAL.

O Conversor Digital-Analógico , DAC0808 fabricado pela NATIONAL é uma conversor de 8 bits monolíticos digital para analógico. Apresenta escala com resolução completa e tempos de operação até $150\eta s$ com consumo de 33mW e tensão de alimentação de até 5Vcc.

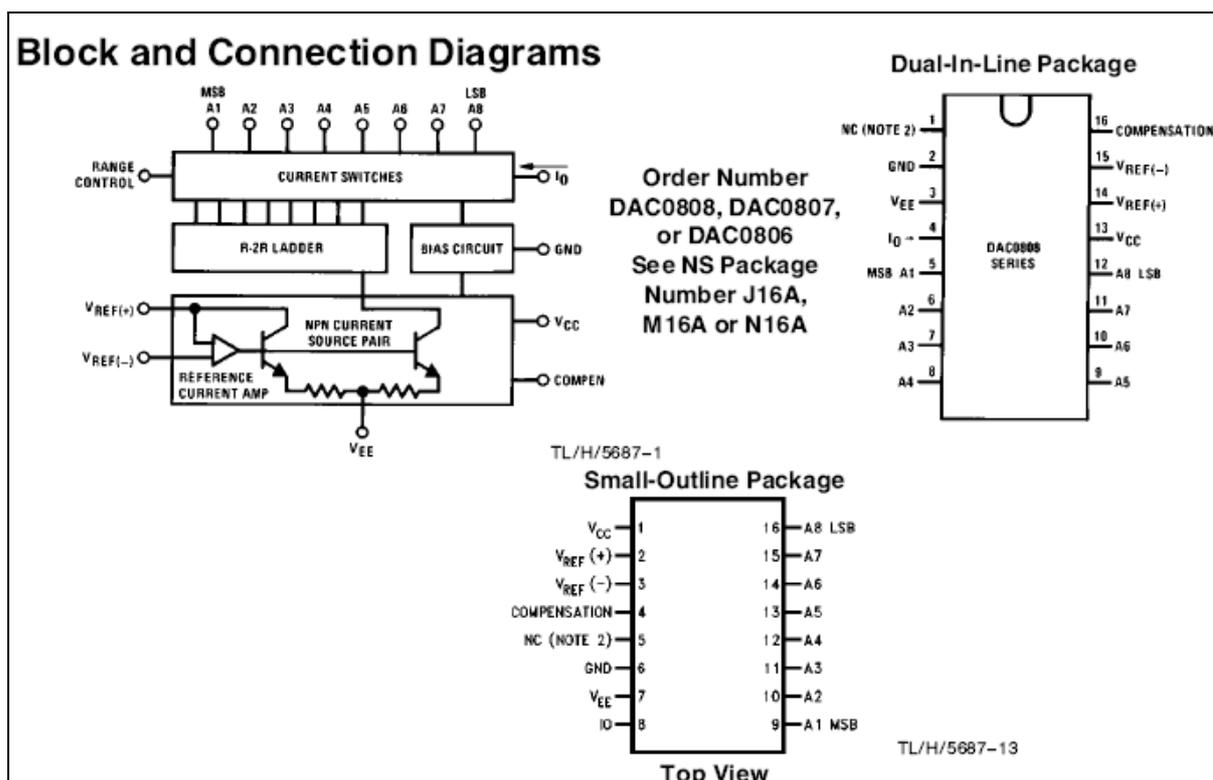


Figura 3.10 - Diagrama Funcional Conversor Digital – Analógico. [Datasheet do Fabricante www.national.com]

A aplicação do conversor é simples e funcional. Contudo faz-se necessária utilização de um *latch* na aquisição dos dados a serem convertidos a fim de estabilizar a saída de tensão do conversor.

O circuito apresentado no *datasheet* do conversor apresenta o modo de operação *free running*, ou seja, a conversão é instantânea não dependendo de sinais ou *external clock*.

A função de transferência da tensão de saída é dada por

$$V_o = 10V \cdot \left(\frac{A_1}{2} + \frac{A_2}{4} + \dots + \frac{A_8}{256} \right). \quad \text{Eq.: 16}$$

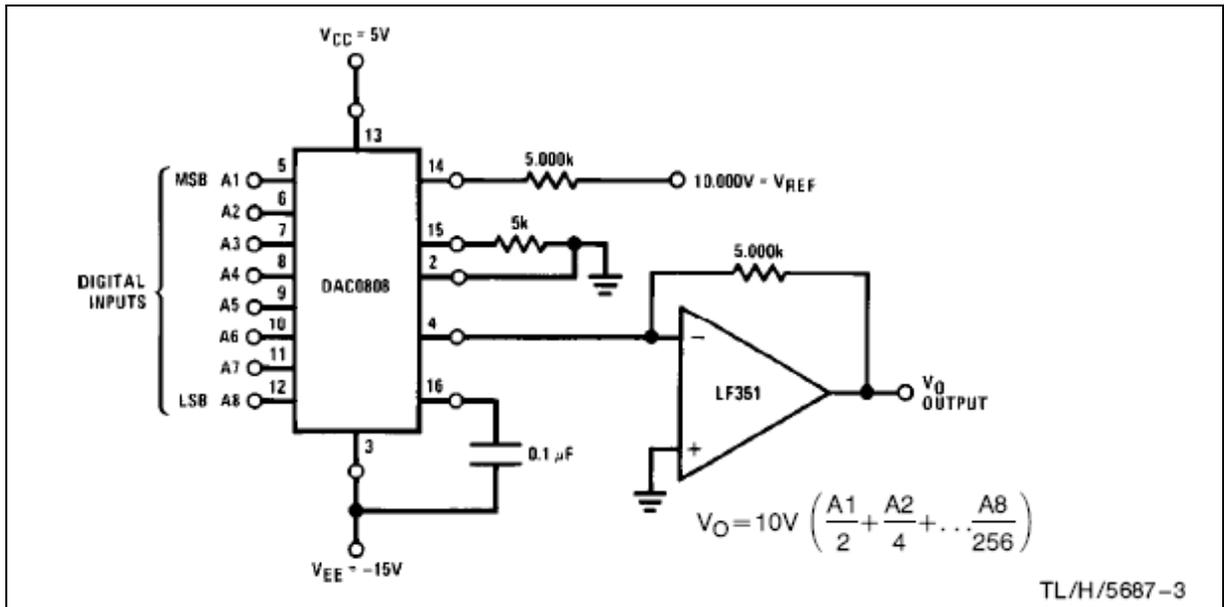


Figura 3.11 - Topologia de circuito operação típica Conversor DAC0808. .[Datasheet do Fabricante www.national.com]



4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentadas as implementações práticas realizadas de forma objetiva, bem como os dados obtidos durante a realização de teste de funcionabilidade do sistemas construídos de acordo com a proposta deste trabalho.

4.1. Sistema Seguidor Solar

Afim de prover a estrutura capaz de sustentar o modulo fotovoltaico aplicado para execução deste projeto desenvolveu-se uma estrutura que forma um ângulo de 45º em relação à terra com sua superfície voltada para o norte, esta inclinação é fixa. Desta forma o modulo estará fixado sobre a estrutura que realizará a translação leste – oeste transcrevendo o movimento do sol em torno da Terra.

De acordo com as dimensões do modulo foi necessário desenvolvimento de uma estrutura metálica capaz de dispor de resistência mecânica e física contra intempéries

Para realizar a rotação do modulo foi desenvolvida uma engrenagem acoplada ao motor CC responsável pela geração do torque da rotação. Este sistema foi adaptado a partir de uma engrenagem existente que realiza o movimento de um sistema mecânico para operação de máquinas de vidros automotivos. Para que esta engrenagem fosse empregada para esta aplicação foi necessário forja sua foram retilínea de forma que esta apresentasse uma nova forma geométrica cilíndrica a fim de atender o movimento transcrito proposto.

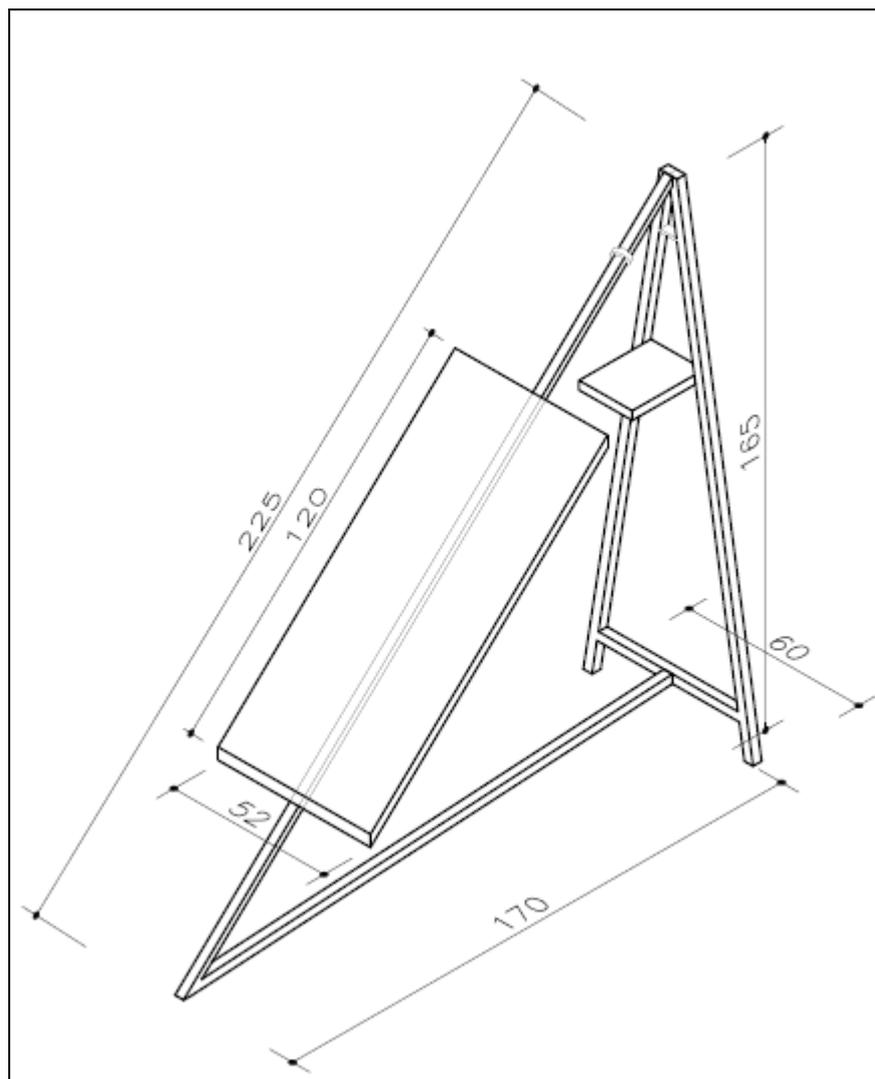


Figura 4.1 - Projeto Mecânico Dimensional Estrutura Móvel

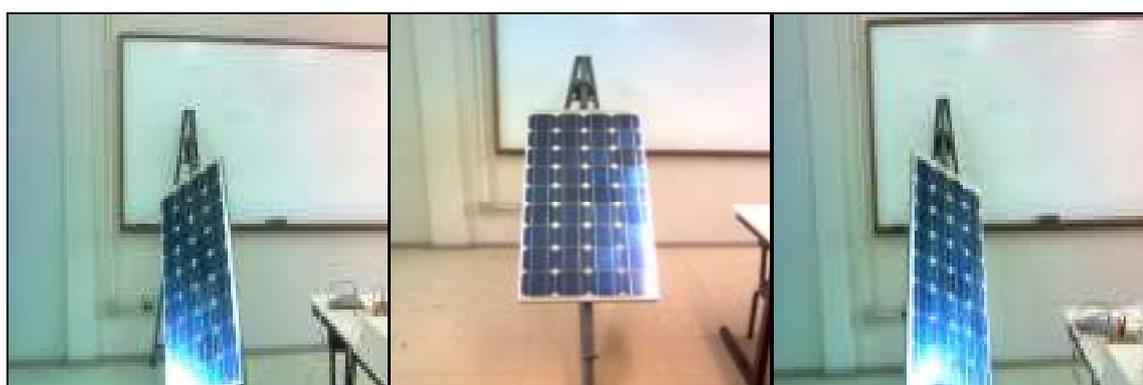


Figura 4.2 - Estrutura com modulo fotovoltaico sobreposto

Para prover o movimento do dispositivo mecânico responsável pelo posicionamento do gerador em relação à orientação solar foi desenvolvido um sistema através de dois foto-transistores, ou seja, elementos passivos sensíveis a luz, onde se pode obter o sinal para controle da posição do painel solar. Os



dispositivos foto-resistivo são elementos com resistência interna dependente da intensidade luminosa. Sua resistência diminui quando a intensidade luminosa é muito elevada, quando a intensidade luminosa é pequena a resistência aumenta impedindo a passagem da corrente através do canal de condução.

O circuito de comparação foi desenvolvido com o objetivo de realizar o comando do acionamento do motor de corrente contínua que apresenta os seguintes parâmetros elétricos, 0,5A, 12Vcc. O motor possui torque capaz de prover a rotação da estrutura juntamente com o módulo sem aumentar a corrente. O acionamento é realizado através do desequilíbrio da ponte onde estão dispostos os foto-transistores fazendo com que a partir deste desequilíbrio um dos relés, leste ou oeste, sejam acionados realizando a partida do motor. O motor será desligado quando a ponte equilibrar-se novamente e o módulo estiver orientado na posição correta em relação ao sol.

O corte da luz que incide sobre o fototransistor faz com que o relé feche seus contatos. O circuito de acionamento do relé não dispõe de intertravamento elétrico, desta forma o relé permanece fechado apenas durante o período o qual a luz não incide sobre o sensor. O ajuste da sensibilidade é realizada sobre o potenciômetro de $4,7M\Omega$. Ambos os elementos devem dispor da mesmo ajuste afim de que estes disponha da mesma sensibilidade. A corrente das bobinas dos relés não deve ser superior a $50mA$, característica convencional de relés comerciais, fabricante METALTEX.

Para que adiretividade seja plena fez-se necessário montar o fototransistor sobre um tubo opaco minimizando a incidência solar. Ainda sim para que não haja reflexão acionando o fototransistor indevidamente a placa onde o circuito de controle foi montado teve sua superfície sobreposta por fita preta eliminando a reflexão da incidência solar sobre o fototransistor.

Visando o acionamento dos relés os foram utilizados transistores tipo NPN referência BC 548, amplificando o sinal de resposta do fototransistor e proporcionando, em um segundo estágio, acréscimo do limite de corrente operacionalizando a atuação do relé sem comprometer a operação do sistema.

O motor a ser acionado pelos relés será conectado diretamente no barramento de corrente contínua construída no protótipo, este barramento tem capacidade de corrente suficiente para prover a operação do motor no tanto no

estado transitório como em regime permanente sem comprometer as características técnicas do motor.

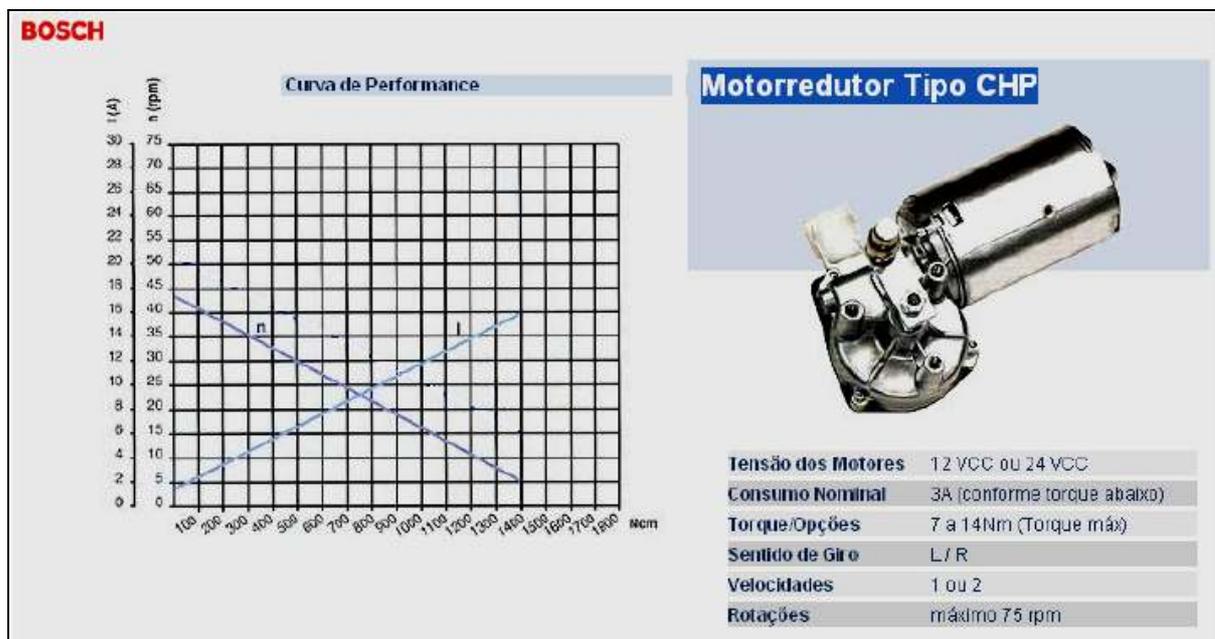


Figura 4.3 - Detalhes característicos motorreductor Bosch aplicado no projeto.
[www.bosch.com.br]



Figura 4.4 - Detalhe Motor com engrenagem adaptada a partir da cremalheira existente no motor.

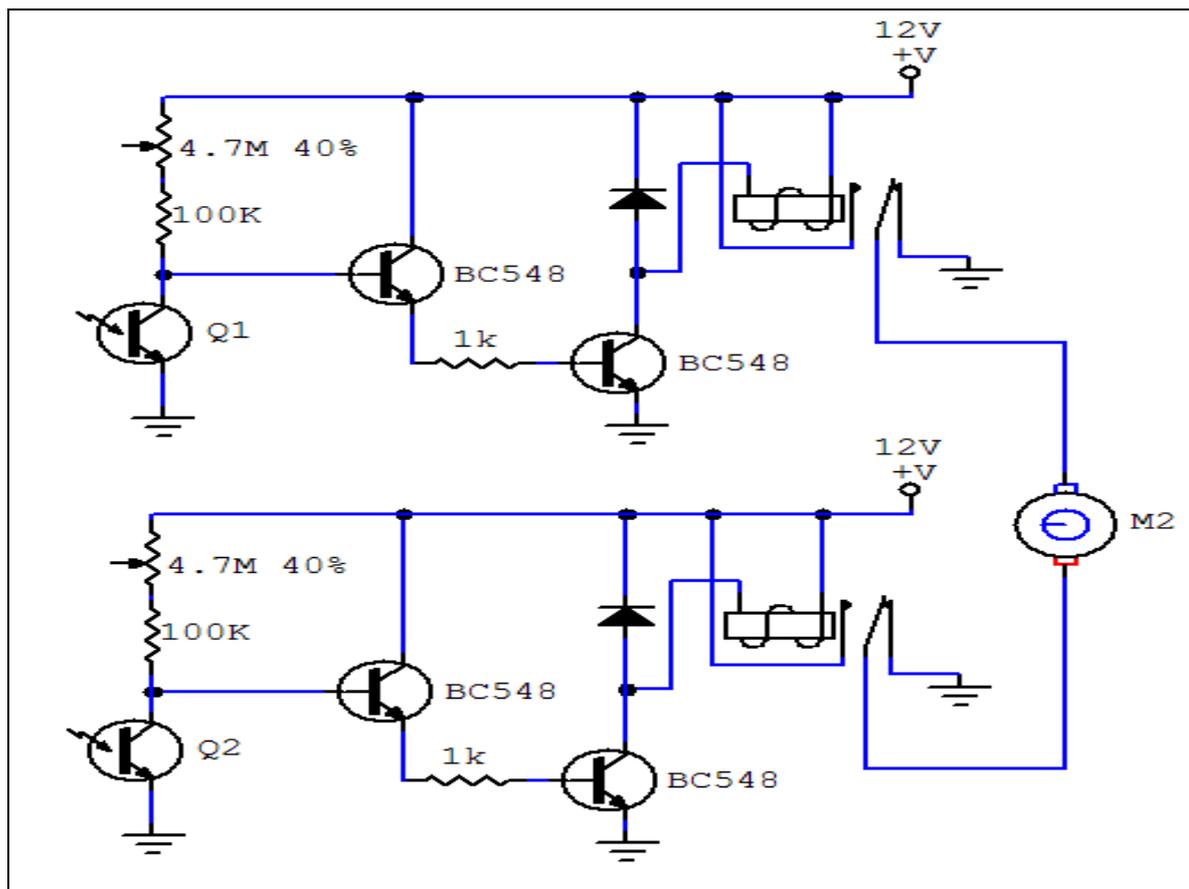


Figura 4.5 - Topologia do Circuito implementado para Realizar o Seguidor Solar

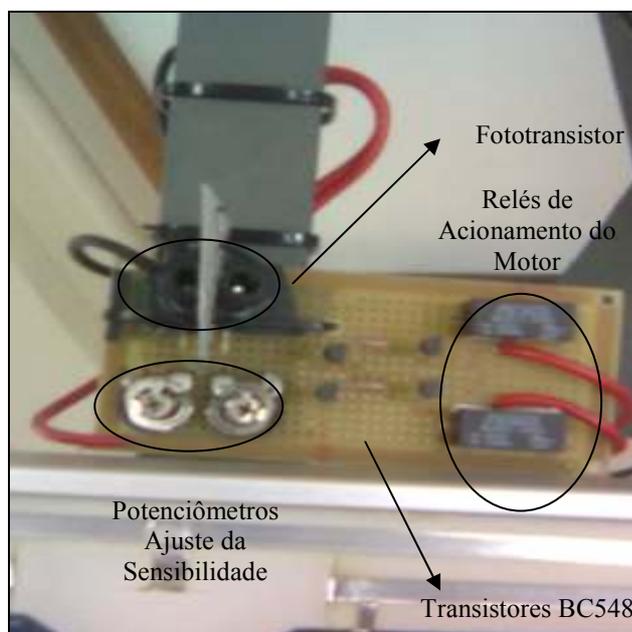


Figura 4.6 - Detalhamento do circuito Implementado

Segundo testes realizados pela Universidade Federal do Oeste do Paraná em 2006 foram constatadas as seguintes parâmetros comparando módulos estacionários com módulos providos de seguidores solar. [UNIOESTE, *Desempenho de um Painel Fotovoltaico acoplado a um rastreador Solar*. <http://paginas.agr.unicamp.br/energia/agre2006/pdf/25.pdf>]

Os testes foram realizados no estado do Paraná no município de Cascavel. O gerador utilizado apresenta características idênticas ao utilizado neste projeto (ARTESA, modelo A-75).

Segundo TREBLE o rendimento do gerador pode ser obtida através da seguinte equação:

$$\eta = \left(\frac{I_{mp} \cdot V_{mp}}{I_c \cdot A} \right) \cdot 100 \quad \text{Eq.}$$

Onde:

IC = Irradiância sola (W/m^2)

A = Área Útil do Modulo (m^2)

I_{mp} = Corrente Máxima de Pico (A)

V_{mp} = Tensão Máxima de Pico (V)

Após realização do ensaio as potências calculadas a partir das amostras coletadas foram às seguintes:

	Modulo fotovoltaico Estacionário (Convencional)	Modulo fotovoltaico com Seguidor Solar
Com Carga	28,59W	36,03W
Sem Carga	54,71W	70,19W

Tabela 1- Teste Comparativo realizado pela Universidade Federal do Oeste do Paraná

Para realização deste teste os dados foram obtidos com circuito através de medições realizadas em lâmpadas incandescentes 24V/85W conectada diretamente aos terminais dos módulos que foram medidos simultaneamente.

Os dados foram amostrados a cada intervalo de quarenta minutos as leituras realizadas foram às seguintes:

- Tensão na carga;
- Tensão a vazio, leitura direta nos terminais do modulo;
- Corrente na carga;
- Corrente sem carga, corrente medida nos terminais do modulo em curto circuito.

O modulo possui foi instalado sobre estruturas com inclinação fixa de 37°. As estruturas móveis dispõem de 120° de rotação.

Durante os testes ainda foram estratificados gráficos amostrais comparativos comparando sistemas com carga e a vazio conforme demonstram os gráficos a seguir:

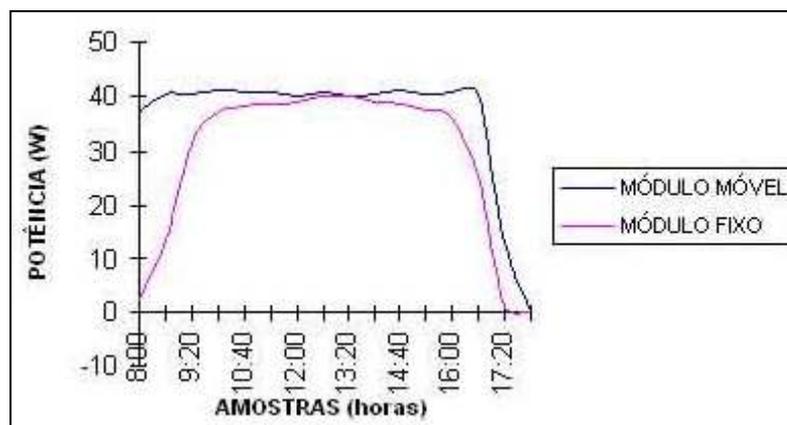


Figura 4.7 - Sistema Fotovoltaicos com Cargas Resistivas [UNIOESTE, *Desempenho de um Painel Fotovoltaico acoplado a um rastreador Solar*. <http://paginas.agr.unicamp.br/energia/agre2006/pdf/25.pdf>]

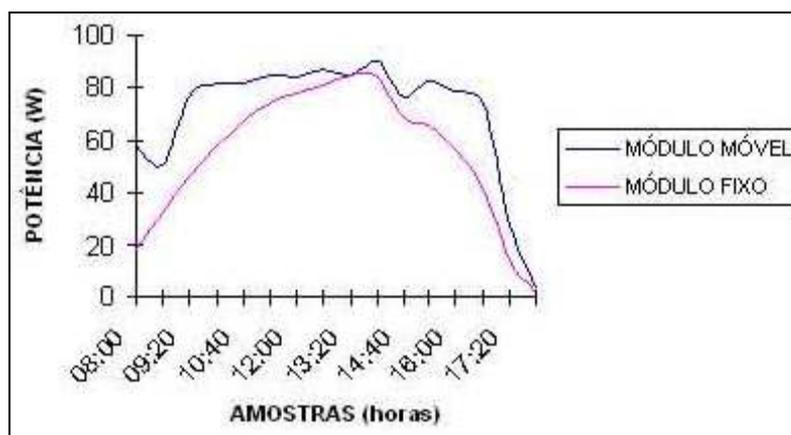


Figura 4.8 - Sistemas Fotovoltaicos sem carga (a vazio) [UNIOESTE, *Desempenho de um Painel Fotovoltaico acoplado a um rastreador Solar*. <http://paginas.agr.unicamp.br/energia/agre2006/pdf/25.pdf>]

O resultado obtido demonstrou que o sistema com rastreador apresenta um rendimento hipotético em torno de 2,052% e ainda que este sistema obteve um ganho de 20,47% comparado ao sistema convencional (módulo estacionário)

Tomando como base os testes realizados foram elaborados métodos de ensaios comparativos buscando validar os resultados obtidos. Após a implementação do seguidor solar realizou-se ensaios em um intervalo de tempo menor não comparando os valores obtidos com geradores estacionários, haja vista que somente dispomos de um gerador e a radiação solar deve ser igual para que o ensaio seja válido. Contudo os ensaios serão realizados com carga e a vazio.

Para realização deste ensaio inicialmente foi verificada a irradiação solar que pode ser obtida através da corrente de curto circuito. Medida entre os terminais do gerador.

Dados do Ensaio:

$$I_{cc} = 3,42A$$

$$Irradiação = \frac{1000W / m^2 \cdot 3,62A}{4,4A} \cong 823W / m^2$$

Utilizando como carga uma lâmpada de 24V/100W conectada diretamente aos terminais da bateria durante o intervalo de uma hora (11:00 as 12:00) obteve-se a seguinte curva.

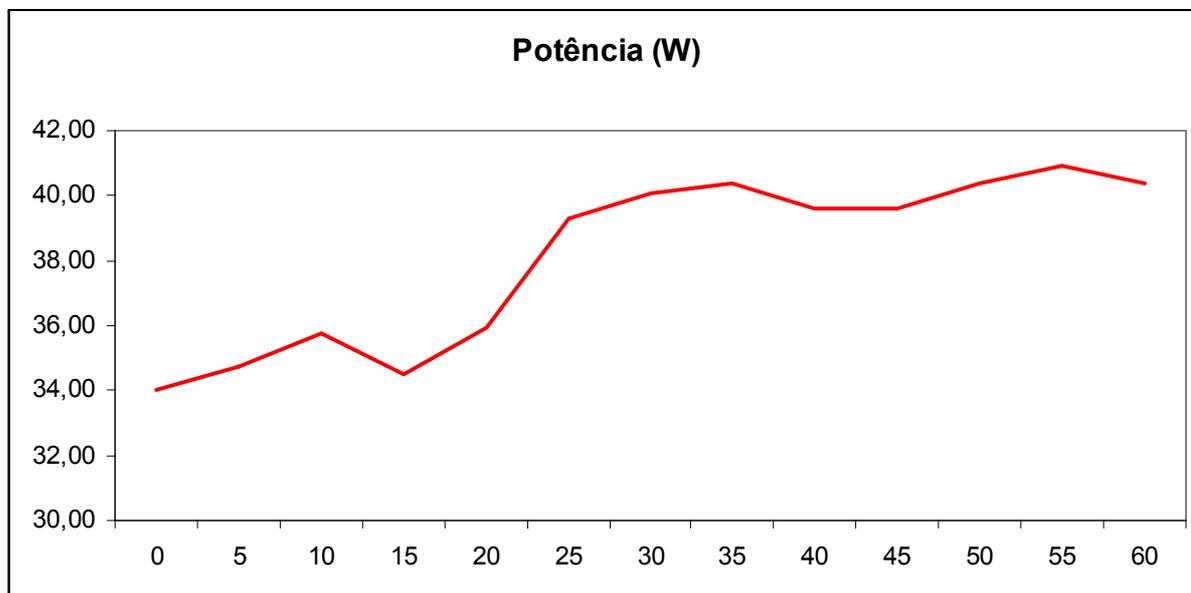


Figura 4.9 - Curva de Potência Gerador ATERSA A-75 – Teste Prático com Seguidor Solar

Tempo	Potência (W)	Tensão (V)	Corrente (A)
0	34,02	14,00	2,43
5	34,76	14,30	2,43
10	35,75	14,40	2,48
15	34,50	13,80	2,50
20	35,94	15,00	2,40
25	39,32	15,10	2,60
30	40,11	15,30	2,62
35	40,38	15,20	2,66
40	39,58	15,00	2,64
45	39,58	15,20	2,60
50	40,38	15,30	2,64
55	40,91	15,40	2,66
60	40,37	15,10	2,67

Tabela 2 - Tabela de Dados do Ensaio

Durante o ensaio houve pequena movimentação do módulo corrigindo o posicionamento da superfície perpendicular a projeção dos raios solares.

Como se trata de um protótipo não foi desenvolvido controles para retorno automático do modulo e reposicionamento na falta da energia solar.



Para que seja realizado este controle pode-se realizar uma supervisão microprocessada dos eventos decorrentes durante o processo de geração avaliando temperatura e luminosidade e assim posicionando o módulo com a superfície voltada para direção de interesse.

4.2. Desenvolvimento e Implementação Conversor CC-CC tipo Buck

Visando prover o fornecimento de energia a carga com limitações além das dispostas pelo gerador, foi dimensionado um conversor CC-CC com topologia *Buck*. Esta topologia foi adotada pois o conversor será dedicado ao carregamento de uma bateria de 12V/7Ah. Conforme descrito no capítulo dois o conversor CC-CC tipo *Buck* é utilizando quando se deseja na saída uma tensão contínua com módulo menor que a tensão de entrada.

Para que a tensão na saída seja regulada, o sinal de chaveamento do MOSFET aplicado no terminal *gate* com tensão igual ou imediatamente superior a tensão de entrada do conversor.

O circuito foi implementado em placa de circuito impresso, sendo que esta foi confeccionada de acordo com a topologia, a ser desenvolvida com trilhas capazes de suportar correntes de até 5A em regime permanente.

Como existe a variação constante do Duty Cycle para ajuste da tensão o dimensionamento dos componentes foi realizado com o valor médio, ou seja $D = 50\%$. Os componentes dimensionados podem ser verificados através da tabela 2 a seguir.



Componente	Equação	Parâmetro Calculado	Valor Comercial Aplicado
Indutor Buck	$L = \frac{V_{in}}{4 \cdot f \cdot \Delta I_{L_{max}}}$	132,81 μ H	130 μ H
Capacitor de Filtragem	$C = \frac{V_{in} \cdot (1-D) \cdot D}{8 \cdot L \cdot \Delta V_o \cdot f^2}$	71,43 μ F	150 μ F
Resistor de Carga	$R = \left(\frac{V_o^2}{P_o} \right)$	2,61 Ω /40W	Não aplicável

Tabela 3 - Dimensionamento de Componentes Discretos Conversor *Buck*

Parâmetros de Cálculo	Grandeza
Tensão de CC de Entrada (V_{in})	17V _{cc}
Tensão CC de Saída (V_o)	14V _{cc}
Potência de Saída (P_o)	75W
Frequência de Chaveamento	20kHz
Ondulação no Indutor Buck (ΔI_L)	40% de I_o
<i>Ripple</i> max tensão de saída ($\Delta V_{o_{max}}$)	$\pm 1\%$ de V_o

Tabela 4 - Parâmetros Dimensionais

A operação do conversor CC-CC com topologia Buck é bastante simples apresentado características operacionais de acordo com o previsto através dos cálculos.

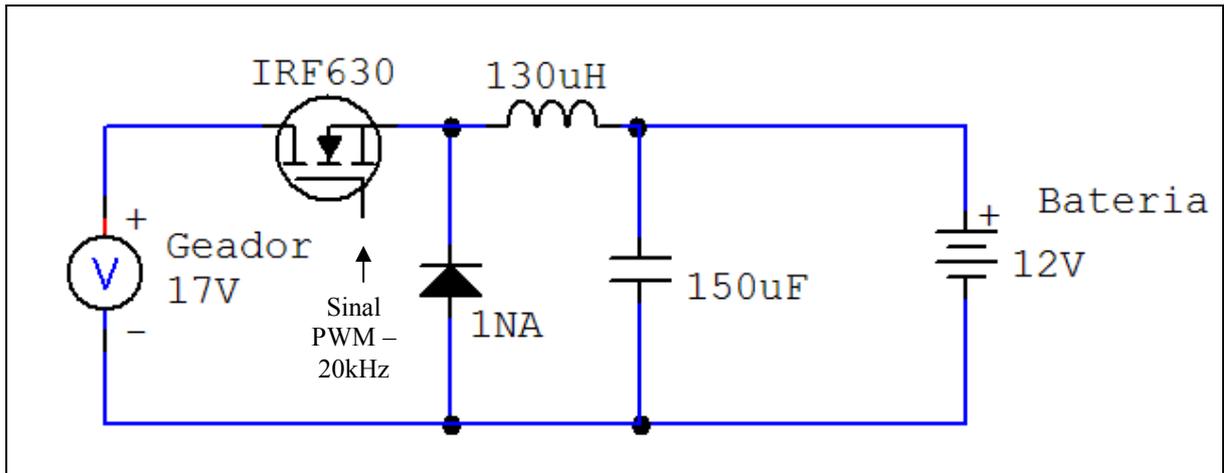


Figura 4.10 - Topologia Circuito Projetado para Conversor CC-CC tipo Buck

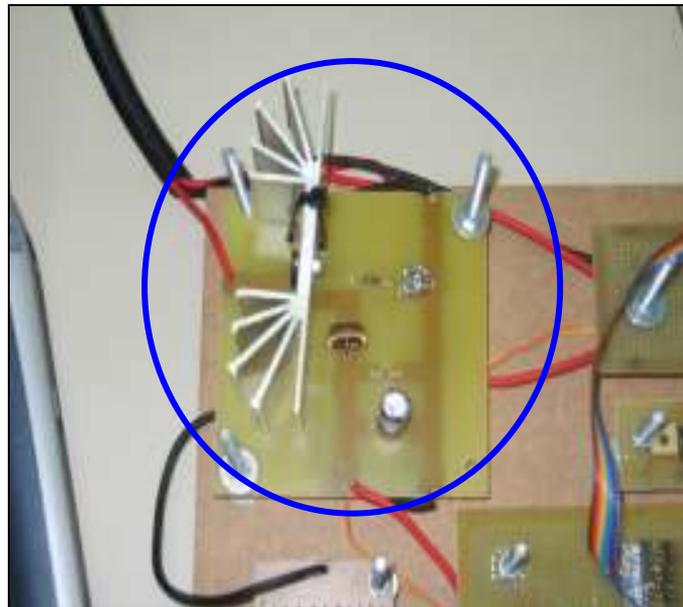


Figura 4.11 - Conversor Buck Implementação

4.3. Implementação Controle PWM (Pulse Width Modulation)

Para realização da implementação do sinal de controle optou-se pela utilização de um hardware comercial pré disposto para esta aplicação. Este atende todas as características do projeto. Para o correto operação do conversor é necessário que o sinal transmitido ao *gate* esteja modulado de forma adequada minimizando ruídos e demais distorções provenientes de outras fontes O conversor CC-CC para aplicação esperada deve operar com chaveamento na faixa dos 20kHz, com amplitude de $17V_{\text{pico}}$ ou maior, desta forma existe limitação quanto a modulação realizada através de software, pois existe a necessidade de implementação amplificadores que poderão gerar ruídos e distorções desnecessárias além de aumentar a quantidade de dispositivos eletrônicos discretos a serem dimensionados e implementados.

Desta forma optou-se pela utilização do dispositivo LM3524D (Regulation Pulse Width Modulator). Este semiconductor é fabricado pela NATIONAL e apresenta características ideais para esta aplicação. Sua topologia é bastante simples sendo necessário um resistor e um capacitor para definir a frequência de operação do hardware. O Duty Cycle é ajustado através do terminal de compensação, que ao receber um sinal de tensão continua que pode variar de zero a 5V excursionando a modulação do ciclo de trabalho de zero a 100%. Quando a tensão e compensação for máxima ($\geq 5V$) o ciclo de trabalho é de 100%, quando a tensão for mínima (zero) o ciclo é de 0%, conseqüentemente quando a tensão de compensação for 2,5V tens-se o ciclo de trabalho igual a 50%, o que demonstra a linearidade desta relação.

Para obtenção da frequência requerida foram utilizados os seguintes componentes discretos conectados aos terminais RT e CT do semi condutor. Resistor $6,5k\Omega / \frac{1}{8} W$ e Capacitor 10pF.

A tensão o pino de compensação será fornecida a partir do monitoramento do ponto de máxima potência do gerador, que por sua vez será implementada via software conforme análise a seguir.

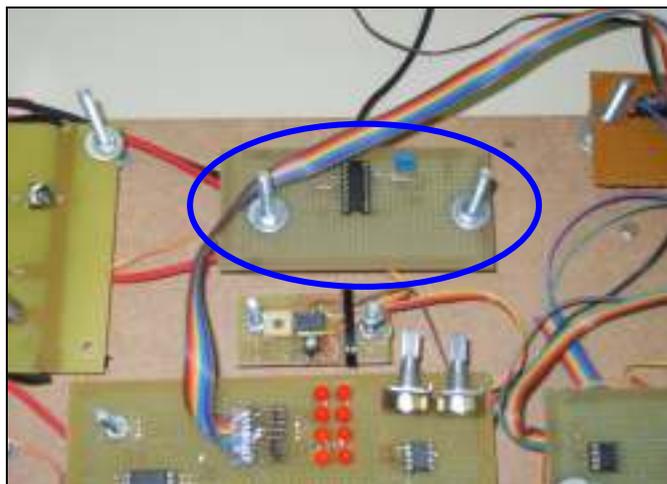


Figura 4.12 - Regulador de Largura de Pulso (PWM)

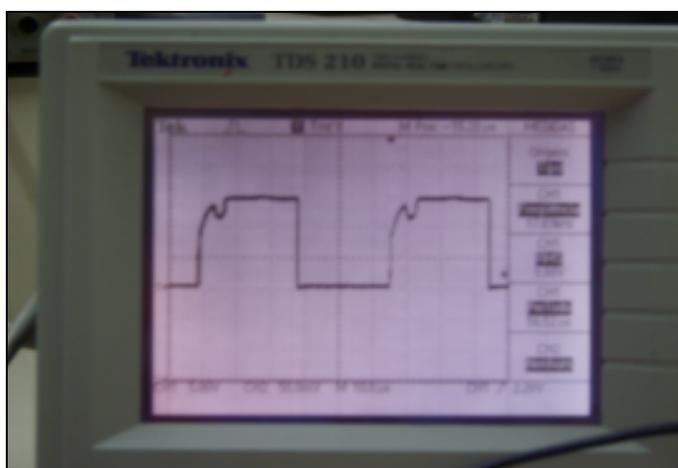


Figura 4.13 - Sinal Modulado Duty Cycle 50%.

4.4. Implementação Seguidor de Máxima Potência

O circuito seguidor de máxima potência utilizando o método da perturbação pode ser implementados através de sistemas microprocessados ou dispositivos lógicos capazes de realizarem operações matemáticas e comparações de resultados. Com o objetivo de obter a maximização da extração de energia gerada a partir do modulo fotovoltaico foi desenvolvido o sistema de monitoramento do ponto de máxima potência.

A funcionalidade do projeto depende diretamente e invariavelmente dos parâmetros mensurados do circuito durante sua operação para que a rotina



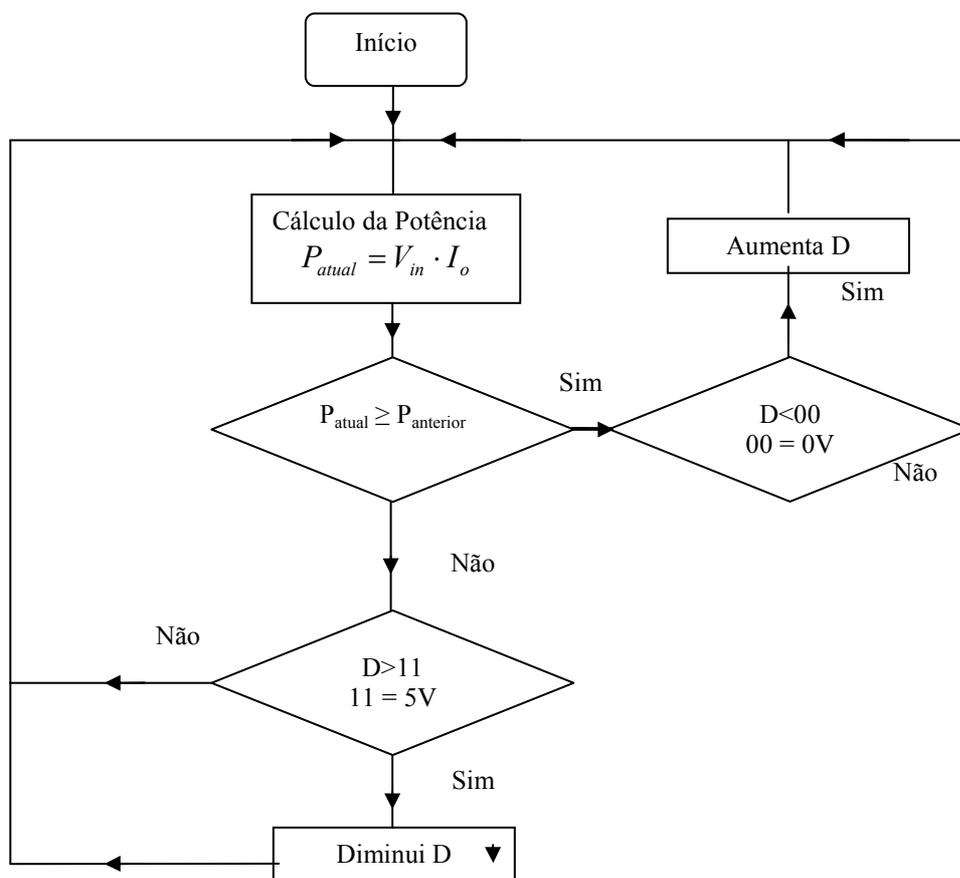
desenvolvida para operação sobre o ponto de máxima potência esteja correte e seja eficiente.

A forma de obtenção dos dados analógicos obtidos do circuito de potência será descrito a seguir.

A rotina implementada através do compilador *Borland Builer C++* realiza o rastreamento do ponto de máxima potência do gerador fazendo com que este opere sobre este ponto mesmo quando existe a variação da corrente do gerador devido a redução ou aumento da incidência solar sobre a superfície do modulo.

A rotina faz com que haja comparação entre a potência medida atual em relação a potência registrada no ciclo anterior verificando se houve acréscimo ou redução desta, desta forma este ajusta o sinal do Duty Cycle que é enviado ao conversor CC-CC ajustando o nível de tensão na carga aumentando ou diminuindo a potência, desta forma pode-se garantir que o gerador opera sobre o ponto de máxima potência.

A rotina foi desenvolvida de acordo com o apresentado no fluxograma.



O software além de realizar as rotinas para obtenção e operação do ponto de máxima potência apresenta parâmetros das grandezas apresentadas na tela, como modulo da tensão de entrada e a corrente de carga. Depois de realizado o cálculo da potência este apresenta uma curva de carga apresentando a potência instantânea do gerador em cada intervalo d tempo ajustado.



Figura 4.14 - Ambiente do Software Desenvolvido

4.5. **Sistemas e Circuitos de Aquisição e Dados**

É necessário e imprescindível o monitoramento de dois parâmetros. São eles: Tensão de Entrada ou tensão de Geração V_{in} . Corrente de carga I_o . Ambos parâmetros deverão ser medidos indiretamente através dos recursos implementados como forma de aquisição e tratamento dos dados que serão enviadas para um microcomputador através da transmissão paralela dos dados (porta paralela). Esta por sua vez está configurada em transmissão bi-direcional, fazendo com que os a porta controle indique a ação, ler ou escrever através da porta de dados. As informações ou dados deverão dispor de 8 bits, ou seja uma palavra de 256d. Para realização desta afim de realizar a medição foram implementados dois hardwares comerciais próprios para este aplicação, são eles ADC0808 e DAC0808. O conversor analógico digital está operando em modo *free running*, ou seja, faz leitura constante. Este procedimento foi realizado com o objetivo de utilizar a menor quantidade de bits e portas da transmissão paralela para o comando de hardware, otimizando e qualificando a leitura com todos os bits possíveis. O Conversor analógico digital irá realizar duas leituras de dados que são enviados nas entradas in_0 e in_2 . Estes dados



estes dados analógicos serão digitalizados e enviados ao PC através da porta dados. Os sinais analógicos a serem convertidos foram estratificados do circuito de potência da seguinte forma:

➤ Tensão V_{in}

Realizado divisor resistivo junto à entrada do conversor CC-CC para aquisição da tensão. A tensão de operação do ADC0808 é de 5V, desta forma foram associados em série realizando divisor resistivo entre os resistores de $R1 = 50k\Omega$ e $R2 = 22k\Omega$ tomando como referência a tensão sobre o resistor $R2$.

➤ Corrente I_o

Para medição da corrente o método utilizado foi verificar a queda de tensão em um resistor ligado em série ao circuito potência do conversor CC-CC, tendo como preocupação principal que este não interferisse na corrente dissipando potência desnecessária. Desta forma foram associados 10 (dez) resistores de $0,22\Omega / \frac{1}{2}W$, obtendo uma resistência total em série de $0,022/5W$. Entre os terminais deste resistor observa-se uma pequena queda de tensão que depende da corrente de carga do circuito obedecendo o que estabelece a Lei de Ohm $R = V / I$. A queda de tensão entre os terminais do resistor serão aplicadas na entrada do amplificador de instrumentação INA118 que através que proverá 50 de ganho realizado à seguinte excursão:

Corrente Carga (I_o)	Equações Fornecidas <i>Datasheet</i> <i>Instrumentation Amplifier - INA118.- BURR-</i> BROWN		
	$G = 1 + \left(\frac{50k\Omega}{RG} \right)$ $RG = 1000\Omega$		Tensão de Saída $V_o = G \cdot (V_{in}^+ - V_{in}^-)$
	V_{in}^+	V_{in}	
0A	17V	17V	0V
1A	17V	16,978V	1,1V
2A	17V	16,958V	2,1V
3A	17V	16,939V	3,05V
4A	17V	16,92	4,0A
5A	17V	16,898	5,1A

Tabela 5 - Referências de Corrente através do amplificador de Instrumentação INA118

Ambos os sinais de tensão e corrente variam linearmente de zero a 5V correspondentes aos máximos e mínimos do circuito. Após o tratamento realizado as grandezas já podem ser digitalizadas através do Conversor ADC0808.

O ADC0808 opera como mencionado anteriormente em modo *free running*, ou seja realiza conversão direta dos dados.

O sinal de *clock* necessário para operação do ADC0808 deve dispor de uma modulação PWM na faixa de 100kHz. Em atendimento a esta necessidade foi adotado um hardware comercia LM555, que operara como timer, próprio para esta aplicação.

Logo após o tratamento dos dados de acordo com a rotina implementada que o novo parâmetro de ajuste do da modulação do ciclo de trabalho deve ser enviado ao LM3524 que irá ajustar a tensão de saída do conversor CC-CC. Contudo o novo sinal será transmitido através da porta controle com natureza digital. Este

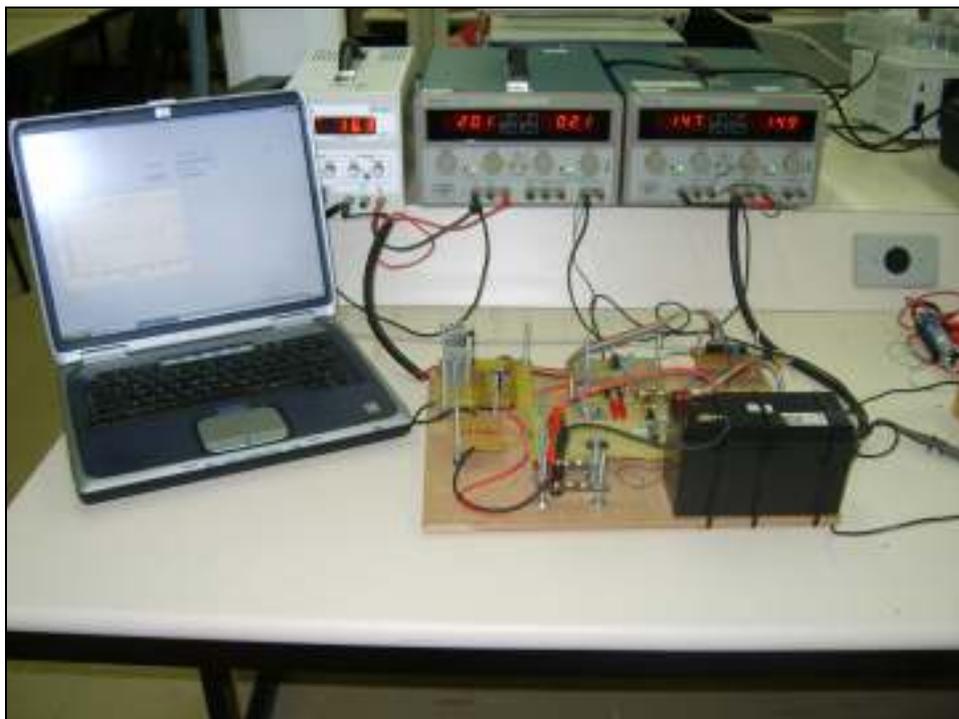


Figura 4.16 - Bancada de Teste Projeto Implementado na Prática em Operação

Os ensaios realizados para verificação do ponto de máxima potência do gerador aplicando o conversor CC-CC tipo Buck com a operação plena do seguidor de máxima potência.

Foram realizados ensaios no dia nove de dezembro do corrente ano, no município de Canoas, situada a uma latitude de $29^{\circ} 55' 07''$ sudeste, e longitude de $51^{\circ} 11' 04''$ oeste, a uma altitude de 8m.

A radiação calculada na data foi de aproximadamente $800\text{W}/\text{m}^2$ projetada sobre o painel próximo das 12:00. Os dados foram coletados com Alicete amperímetro digita da marca Minipa, modelo ET-3200, para aquisição da corrente de carga da bateria e multímetro digital marca Minipa, utilizado para medição da tensão.

Através dos dados mensurados construíram-se duas curvas que representam o comportamento da corrente e da potência o gráfico observado, a partir destes valores foi verificado o ponto de máxima potência e implementado o seguinte gráfico comprovando o correto funcionamento do protótipo.

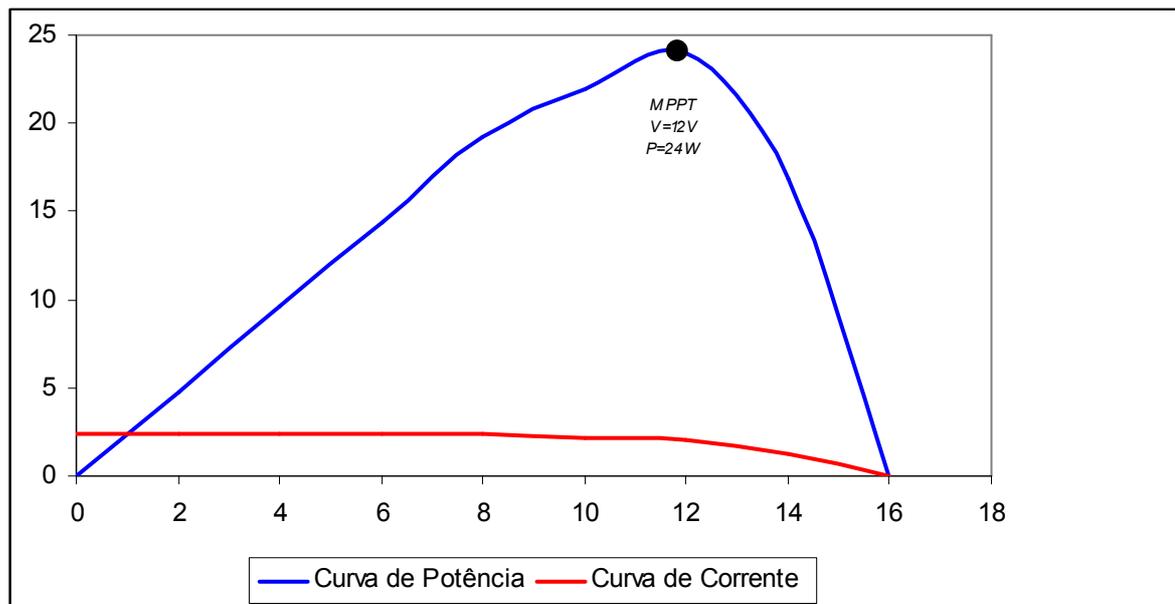


Figura 4.17 - Gráfico Construído a partir de testes Práticos

5. CONCLUSÕES

A necessidade de fontes alternativas de energia para atendimento do mercado consumidor torna-se inevitável nos dias atuais. Desta forma os geradores fotovoltaicos obtiveram maior espaço no mercado vem se tornando mais competitivo comparado a outras tecnologias.

Os estudos em torno do processo de geração a partir da energia solar têm ganhado maior ênfase por interessados e investidores, principalmente por órgãos governamentais que dispõem de bolsas de pesquisas e subsídios aos que investem em tal tecnologia.

Ao longo do trabalho apresentaram-se duas formas muito eficazes para otimização da operação dos módulos fotovoltaicos as quais abordam aspectos completamente distintos e aumentam significativamente o rendimento do processo de geração.

Para realizar o aproveitamento completo da energia proveniente do sol verificou-se que através do sistema de eletromecânicos de seguimento do movimento solar observou-se através de ensaios realizados um aumento em torno de 20% da eficiência do sistema comparado com módulos estacionários. Além de aumentar o rendimento o sistema é de baixo custo e consumo reduzido de energia para prover a orientação não comprometendo nenhuma parcela significativa da energia gerada, haja vista que os movimentos são sazonais e não contínuos possibilitando a recuperação da carga fornecida pela bateria.

A fim de que o sistema seja otimizado durante a realização deste trabalho apresentou-se o ponto de máxima potência, como ele é influenciado pela radiação solar e pela temperatura. Foram desenvolvidos circuitos analógicos e digitais, testados, simulados e implementados para obtenção do circuito Seguidor de Máxima Potência (MPPT).



Aplicou-se o método da perturbação para desenvolvimento do software para rastreamento do ponto e realização da operação do conversor CC-CC tipo *Buck* sobre o ponto de máxima potência do gerador.

De acordo com os ensaios realizados constatou-se que o circuito implementado funciona corretamente, contudo ainda existem deficiências referentes à autonomia de energia e obtenção do MPPT em cargas onde há grande oscilação na corrente em virtude de limitações no software e tempo de resposta.

Como aprimoramento deste trabalho recomenda-se a implementação de um conversor tipo *BOOST* capaz de elevar a tensão na saída realizando o carregamento de um banco de baterias onde este possa fornecer energia a cargas significativas. Sugere-se ainda que o método de controle, monitoramento e aquisição de dados seja realizado através de um microprocessador com comunicação serial a fim de obter-se uma maior capacidade de processamento e maiores recursos.

Referente ao dispositivo de seguimento aparente do sol sugere-se alteração da engrenagem, com projeto realizado por profissionais capacitados para tal e o controle microprocessado da movimentação do módulo.

Sendo possível a aplicação de um microprocessador pode-se projetar um gerador com controles inteligentes e diversas situações podem ser analisadas para obter-se o desempenho máximo dos sistemas.



6. REFERÊNCIAS

- [1]CEPEL-CRESESB - *Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos*, Grupo de Trabalho de Energia Solar-GTES,
- [2]FRAIDENRAICCH, N., LYRA, F.- *Energia Solar. Fundamentos e Tecnologia de Conversão Heliotérmica e Fotovoltaic*, Editora Universitária da UFPE, 1995.)
- [3]COCIAN, L. F. E.; SANTOS, J. C. V.-. *Sistemas Fotovoltaicos - Uma Alternativa para a Geração de Energia Elétrica*. Lumière, São Paulo, v. 27, p. 32 - 38, 02 jul. 2000.)
- [4]ROSA, M. C., CARNEIRO, P.M., *Estudo de Viabilidade Técnica e Econômica da Utilização de Energia Solar em Estações Rádio Base (ERB's)*, (2001).
- [5]CASTRO, RUI, M., G., *Energias Renováveis e Produção Descentralizada*. Universidade Técnica de Lisboa – DEEC/Secção de Energia).
- [6]Mello, Luiz Fernando P. de, *Análise e Projeto de Fontes Chaveada*. São Paulo. Érica, 1996
- [7]TRINDADE, Manuel, MARTINS, Júlio S., AFONSO, João L. Sistema para Otimização e Extração de Painéis Solares Fotovoltaicos. In CONFERENCIA SOBRE ENERGIA RENOVÁVEIS E AMBIENTE EM PORTUGAL. Azúrem, 2005/2006
- [8]GARCIA, Pedro Donoso. Uma Viasão de Energia Fotovoltaica. Apostila Universidade Federal de Minas Gerais]
- [9]SANTOS, Jancarle L, dos, ANTUNES, Fernando L. M. Seguidor de Máxima Potência para Sistemas Fotovoltaico. 2002
- [10]S. Armstrong; W.G. Hurley. Self-regulating maximum power point tracking for solar energy systems. *REVISTA IEEE*, Ireland, v.2, p. 6-8, Sept. 2004.]
- [11]OLIVEIRA, Maurício, Madeira *Análise do Desempenho de um Gerador Fotovoltaico com Seguidor Solar Azimutal*, Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica. UFRGS, 2008)
- [12]United States Department of Energy, Center for Renewable Energy and Sustainable. Technology, Aurora educational web site]
- [13]ENERGIA SOLAR – FFSOLAR. Sistemas de Energias Alternativas Portugal, Lda. Disponível em: <http://www.ffiolar.com/index_pt.html>
- [14]www.joinville.udesc.br/portal/professores/cassiano/materiais/EPOII__Capitulo_2__Buck_Boost.pdf]
- [15] www.aneel.gov.br
- [16] www.national.com