

Rômulo Fernandes da Costa

Chaveamento de cargas intermitentes usando sensor de corrente

Trabalho de graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Márcio Abud Marcelino

Guaratinguetá

2015

C837c Costa, Rômulo Fernandes da
Chaveamento de cargas intermitentes usando sensor de corrente / Rômulo Fernandes da Costa. – Guaratinguetá, 2015.
74 f. : il.
Bibliografia : f. 61-64

Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica –
Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de
Guaratinguetá, 2015
Orientador: Prof. Dr. Márcio Abud Marcelino

1. Energia solar 2. Teoria de comutação I .Título.

CDU 620.91

**CHAVEAMENTO DE CARGAS INTERMITENTES USANDO SENSOR DE
CORRENTE**


RÔMULO FERNANDES DA COSTA


ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO
COMO PARTE DO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
GRADUADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

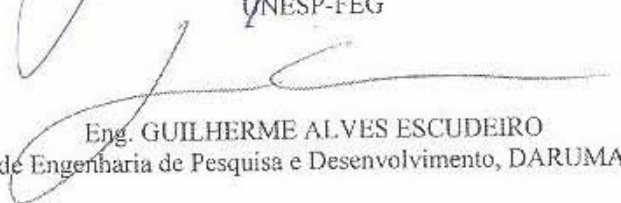
APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO
DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Prof. Dr. Leonardo Mesquita
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. MÁRCIO ABUD MARCELINO
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. FRANCISCO ANTONIO LOTUFO
UNESP-FEG


Eng. GUILHERME ALVES ESCUDEIRO
Departamento de Engenharia de Pesquisa e Desenvolvimento, DARUMA URMET Ltda.

Março de 2015

Dedicado aos alunos da FEG, que terão
grandes carreiras como engenheiros, físicos e
matemáticos.

AGREDECIMENTOS

Agradeço a todos os meus colegas de classe, em especial aos meus colegas Galtieri Costa, Lucas Navarro, Mariana Gades Peneiras e Matheus Spolon Alcalá, pelo apoio pessoal e acadêmico dado durante o curso de Engenharia como um todo.

Agradeço também aos meus professores do departamento de Engenharia Elétrica, por me transmitirem seus conhecimentos, em especial ao professor Márcio Abud Marcelino pela paciência e ajuda prestada como orientador neste trabalho.

COSTA, R.F. **Chaveamento de cargas intermitentes usando sensor de corrente**. 2014.74f. Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista Guaratinguetá.

RESUMO

Devido à preocupação com o uso racional de energia, várias tecnologias alternativas de geração de energia surgiram, dentre elas a conversão de energia solar em energia elétrica através de painéis fotovoltaicos. Em residências de baixa renda, há um impacto considerável representado pela geladeira na conta de energia elétrica, uma vez que esta exige alimentação constante dado seu uso na conservação de alimentos. É possível reduzir essa parcela, com o uso de uma fonte alternativa de energia. Este trabalho apresenta um sistema eletrônico comutador temporizado, que permite que equipamentos comerciais que não sejam prejudicados por interrupções curtas no fornecimento de energia façam uso de um painel fotovoltaico como fonte de energia alternativa, que geralmente não proporcionam energia continuamente. A comutação é feita automaticamente em caso de baixa incidência de luz solar, e sem qualquer forma de armazenamento de energia. Entre cada comutação, há um tempo morto sem fornecimento de energia, assim evitando o uso de circuitos sincronizadores entre o painel fotovoltaico e a rede pública de energia elétrica. Utilizou-se um circuito contendo um microcontrolador 80C31 para controlar a comutações do sistema. O inversor de tensão do painel fotovoltaico é de configuração em ponte H, sendo também controlado pelo microcontrolador através de modulação por largura de pulso, que faz uso de tabelas pré-programadas para gerar os sinais de controle dos transistores de potência. Através de simulações por *software*, foi testado o sistema proposto, capaz de alimentar cargas monofásicas intermitentes. As simulações indicam que o projeto desenvolvido neste trabalho pode ser testado num protótipo, em condições reais de funcionamento, desde que considerado o dimensionamento dos componentes, as características do painel fotovoltaico a ser usado, e da carga envolvida no projeto.

PALAVRAS-CHAVE: Energia Solar, Chaveamento, Comutação, Painel Fotovoltaico, Sistemas isolados, PWM.

COSTA, R.F. **Switching in intermittent loads by current sensor.** 2014. 74p. Monograph(Degree in Electric Engineering)–Guaratinguetá's College of Engineering, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá.

ABSTRACT

Due to concerns about rational use of energy, several alternative technologies of power generation appeared, including the conversion of solar energy into electrical energy by photovoltaic panels. In low-income households, the refrigerator represents considerable impact on the electric bill, since it requires constant power given its use in food preservation. It is possible to reduce this share, with the use of an alternative energy source. This work presents a timed switching electronic system, which allows commercial equipment that is not affected by short interruptions in the power supply to use a photovoltaic panel as a source of alternative energy, which usually do not provide energy continuously. Switching is made automatically in case of low incidence of sunlight, and without any form of energy storage. Between each switching, there is a dead time without power supply, therefore preventing the use of synchronizers circuits between the photovoltaic panel and the public power grid. A circuit containing a 80C31 microcontroller is used to control the system's switching. The photovoltaic panel's voltage inverter is in H bridge configuration, and is also controlled by the microcontroller through Pulse Width Modulation, which makes use of preprogrammed tables to generate the control signals of the power transistors. Through the use of software simulations, the proposed system was tested, which is capable of supplying intermittent single-phase loads. The simulations indicates that the project developed in this paper can be assembled into a prototype and be tested under real operating conditions, as long as the scaling of components, the characteristics of the photovoltaic panel to be used, and the project involved load are taken into account.

KEYWORDS: Solar Energy, Switching, Commutation, Solar Panel, Isolated Systems, PWM Power Inverter.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1- Painel fotovoltaico com 24 módulos.	15
Figura 2.10- Curva característica I_xV típica para uma célula de silício.....	28
Figura 2.11 - Curva de potência versus tensão.	29
Figura 2.12 - Curvas de corrente versus tensão e potência versus tensão superpostas.	29
Figura 2.13 - Efeito da temperatura sobre as curvas de corrente versus tensão para irradiância de 1000 W/m^2	31
Figura 2.14 - Curvas Corrente versus Tensão sob diferentes irradiâncias	31
Figura 2.15 - Modelo Equivalente da célula fotovoltaica.....	32
Figura 2.16 - Efeito de r_s sobre V_{pv} e I_{pv}	32
Figura 2.17 - Efeito de r_p sobre V_{pv} e I_{pv}	33
Figura 2.18 - Controlador de ponto de máxima potência	35
Figura 2.2- Painel fotovoltaico em Americus, Geórgia, em 1954.....	17
Figura 2.3- Vanguard I, o primeiro satélite contendo um sistema de alimentação por energia solar.	18
Figura 2.5 - Célula de silício policristalino.....	23
Figura 2.6 - Células de silício amorfo.	24
Figura 2.7 - Amostra de telureto de cádmio	25
Figura 2.8 - Células solares de GaAs de alta eficiência cobrindo o satélite MidSTAR-1.....	26
Figura 2.9 - Diodo bypass à esquerda e diodo de bloqueio à direita.....	27
Figura 3.1 – Diagrama de blocos do sistema	38
Figura 3.10 – Trem de pulsos emitidos à Q1 e Q2.....	47
Figura 3.11 – Trem de pulsos emitidos à Q3 e Q4.....	48
Figura 3.2 - Exemplo de circuito retificador em ponte.....	39

Figura 3.3 - Esquemático do acoplador MOC3021-3023 e do acoplador MOC3041-3043..	41
Figura 3.4 - Circuito de chaveamento usando MOC3042.	41
Figura 3.5 - Comparador responsável pelo sinal D.	43
Figura 3.6 - Exemplos de inversores simples.	44
Figura 3.7- Exemplo de comparador PWM.	46
Figura 3.8 - Controle de largura de pulso através de comparador.	46
Figura 3.9 - Circuito de inversor em ponte.	47
Figura 4.1- curva de tensão versus corrente de um painel fotovoltaico, superposta à curva de tensão de uma fonte DC.....	52
Figura 4.2- Microcontrolador 80C31.....	54
Figura 4.3: Circuito de habilitação do TRIAC.....	55
Figura 4.4 - Configuração do circuito de driver.....	56
Figura 4.5 – Saída HO do driver conectado à porta P3.0.	56
Figura 4.6 - Saída do driver conectado à porta P3.1.	57
Figura 4.7 – Inversor em Ponte	58
Figura 4.8 - Forma de onda obtida na saída do inversor	58
Figura 4.9 - Circuito completo do sistema.....	59

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área, Corrente elétrica
C	Capacitância
c	Velocidade da Luz, Velocidade de Propagação de um Fluido
D	“ <i>duty cycle</i> ” – Ciclo de Trabalho
e	Carga Elétrica Fundamental
E	Energia, Energia absorvida por um Fóton, Campo Elétrico, Tensão Elétrica
F	Força
h	Constante de Planck, altura
HP	“Horse-Power” – 746 W
I	Corrente Elétrica
L	Indutância
nm	Nanômetro
P	Perdas, Potência Dissipada
Q, q	Carga Elétrica
r	Raio, distância
R	Resistência Elétrica
S	Área, Potência
t	Tempo
US\$	Dolár Americanos
V	Potencial Elétrico, Tensão Elétrica, Volume
Vol	Volume
W	Trabalho, Energia

x Raio, distância

λ Comprimento de Onda

μm Micrometro

\AA Angstrom – 10-10 m

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVO	13
1.2 MOTIVAÇÃO.....	13
1.3 DESCRIÇÃO.....	13
1.4 METODOLOGIA	14
1.5 DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS	14
2 INTRODUÇÃO SOBRE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS	15
2.1 HISTÓRICO	15
2.2 DESCRIÇÃO DO EFEITO FOTOELÉTRICO	19
2.3 TIPOS E MATERIAIS DE PLACAS SOLARES.....	21
2.3.1 SILÍCIO MONOCRISTALINO (C-SI).....	21
2.3.2 SILÍCIO POLICRISTALINO (P-SI)	22
2.3.3 SILÍCIO AMORFO (A-SI).....	23
2.3.4 CÉLULAS DE TELURETO DE CÁDMIO (CDTE)	24
2.3.5 CÉLULAS DE DISSELENETO DE COBRE E ÍNDIO (CUINSE ₂ OU CIS)	25
2.3.5 CÉLULAS DE ARSENETO DE GÁLIO (GAAS)	25
2.4 DESCRIÇÃO DO MÓDULO FOTOVOLTAICO.....	26
2.5 CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DAS CÉLULAS E MÓDULOS.....	28
2.6 MODELO EQUIVALENTE DA CÉLULA FOTOVOLTAICA.....	31
2.7 RASTREAMENTO DO PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA	33
2.8 TOPOLOGIAS COMUNS DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA.....	36
3 SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO DE CARGAS INTERMITENTES	37
3.1 DESCRIÇÃO DA CARGA.....	38
3.2 ADAPTAÇÕES DA TENSÃO ELÉTRICA DA REDE E DO PAINEL FOTOVOLTAICO.....	38

3.3 CHAVEAMENTO.....	39
3.4 CIRCUITO DO COMPARADOR DE TENSÃO	41
3.5 INVERSOR	43
3.6 DIMENSIONAMENTO DOS PAINÉIS FOTOVOLTAICOS	47
4 RESULTADOS	50
5 CONCLUSÃO.....	59
REFERÊNCIAS.....	61
ANEXO A- Programa em C responsável pela tabela do inversor	64
ANEXO B - Programa em Assembly para o microcontrolador.....	69

1 INTRODUÇÃO

1.1 Objetivo

O presente trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema de alimentação e chaveamento temporizado entre painéis fotovoltaicos e a rede elétrica para atender a demanda de eletricidade de uma carga intermitente, isto é, uma carga que não requer alimentação constante. O sistema não faz uso de qualquer forma de armazenamento de energia e baseia-se no pedido de patente da invenção “Sistema Comutador Temporizado de Energias Alternativas para Cargas Intermitentes”, publicada na Revista da Propriedade Industrial (MARCELINO & PRADO, 2014).

1.2 Motivação

Em residências de baixa renda a geladeira é responsável por 20% a 30% do consumo mensal de energia. Com a utilização desse sistema, pode-se alimentar uma geladeira quase independentemente da rede, através de fontes alternativas de energia, portanto reduzindo o impacto deste consumo na conta de energia elétrica. Equipamentos sem a necessidade de alimentação constante, como refrigeradores e condicionadores de ar, comuns atualmente em boa parte das empresas e residências, podem também ser alimentados pelo sistema proposto, sem prejuízo da operação e com importante redução no consumo de energia elétrica da rede pública.

1.3 Descrição

Os sistemas existentes atualmente para aproveitamento de energias alternativas se baseiam no armazenamento e na utilização conjunta com a rede pública de energia elétrica. Em geral, o custo com baterias e circuitos de sincronismo com a rede inviabilizam a popularização destes sistemas (NASSABAY, 2011). Marcelino e Prado (2014) propuseram um sistema que não faça uso de armazenamento de energia, assim reduzindo custos.

Neste trabalho, é descrito um sistema que usa um painel fotovoltaico como fonte de energia alternativa. Este sistema possui um circuito de controle que realiza a comutação entre a rede e o painel, sem permitir que ambas as fontes alimentem a carga paralelamente, o que simplifica o controle. O sistema faz as comutações de acordo com o nível de insolação, de maneira que se o nível de insolação for suficientemente alto para garantir a alimentação da carga, comuta-se para o painel fotovoltaico. Caso o nível de insolação não for suficiente, é feita a comutação para a rede.

1.4 Metodologia

O presente estudo fez uso da literatura na área de eletrônica de potência, dados obtidos em sites de órgãos públicos, como IBGE, ANEEL, trabalhos acadêmicos no campo de painéis fotovoltaicos, e em *datasheets* dos componentes usados no desenvolvimento do sistema. Os circuitos aqui mostrados foram projetados e simulados, sendo utilizados os simuladores *Multisim* e *Proteus*.

1.5 Descrição dos capítulos

O capítulo 2, "Introdução sobre painéis fotovoltaicos", trata de assuntos sobre painéis fotovoltaicos, abordando o histórico, uma breve descrição do efeito fotoelétrico, tipos de materiais de células solares, modelos elétricos de células solares, e topologias comuns de painéis solares.

O capítulo 3, "Sistema de Alimentação de Cargas Intermitentes", enfoca no sistema proposto por este trabalho, descrevendo detalhadamente cada parte do sistema, os circuitos que usados, e como estes interagem entre si.

O capítulo 4, "Resultados", descreve os resultados obtidos e explicando como foram alcançados.

O capítulo 5 trata das conclusões, mostrando possíveis tópicos nos quais trabalhos futuros podem se aprofundar.

2 INTRODUÇÃO SOBRE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

2.1 Histórico

Um painel fotovoltaico é um dispositivo capaz de converter energia solar em energia elétrica através do efeito fotovoltaico, sem necessidade de fonte externa de energia. Um painel fotovoltaico consiste de um conjunto de células solares (chamadas de módulos) conectadas, de maneira a gerar potência DC para alimentar uma carga. Cada módulo do painel gera normalmente algo em torno de 100 a 250 watts. Um sistema inteiro tipicamente inclui uma placa contendo os painéis solares, um inversor e uma bateria (para armazenamento de energia). A Figura 2.1 apresenta um painel fotovoltaico composto por 24 módulos.

Figura 2.1- Painel fotovoltaico com 24 módulos.



Fonte: (WIKIPÉDIA, 18.jul.2014)

O efeito fotovoltaico foi demonstrado experimentalmente pela primeira vez em 1839, pelo físico francês Edmond Becquerel, através de uma solução condutora exposta à luz solar. Enquanto realizava experiências eletroquímicas, Becquerel notou por acaso que ao expô-lo à luz os eletrodos de platina ou prata, estando mergulhados num eletrólito, causava uma pequena diferença de potencial. (GEVORKIAN, 2007)

Em 1877, dois norte-americanos, W.G. Adams e seu aluno Richard E. Day, desenvolveram o primeiro dispositivo de geração de eletricidade através de luz solar. Tratava-se de um filme depositado num substrato de ferro, onde um filme de ouro extremamente fino servia de contato frontal. No entanto, a eficiência de conversão deste dispositivo atingia 0,5%.

Em 1883 a primeira célula fotovoltaica em estado sólido foi construída por Charles Fritts que cobriu um semicondutor de selênio com uma camada extremamente fina de ouro, de maneira a formar as junções. O dispositivo tinha uma eficiência de aproximadamente 1%.

Albert Einstein explicou o efeito fotoelétrico em 1905, pelo qual receberia o Nobel de Física em 1921. Juntamente com o aparecimento da física quântica, a teoria das bandas e a física de semicondutores, técnicas de dopagem e purificação do silício, estes avanços impulsionaram o desenvolvimento inicial das células fotovoltaicas.

O desenvolvimento de células solares modernas teve início em 1953. Calvin Fuller trabalhava na Bell Laboratories, onde desenvolveu o processo de dopagem de silício. Este processo consiste em introduzir impurezas em cristais de silício, para ajustar as características elétricas do cristal. A barra produzida havia sido dopada com Gálio, de maneira a constituir um material “tipo p”, isto é, um semicondutor com cargas móveis positivas. Banhando esta barra em lítio, criou-se uma dopagem “tipo n”, um semicondutor com cargas móveis negativas, e desta maneira formou-se um campo elétrico na junção dos materiais. Verificou-se durante a caracterização elétrica deste material que produzia corrente ao ser exposta a luz (UNIVERSIDADE TÉCNICA DE LISBOA, 2006).

A primeira célula fotovoltaica viável foi apresentada ao público em 25 de Abril de 1954, pela empresa americana Bell Laboratories, onde usada uma junção p-n de silício que alcançava até 6% de eficiência. Um maior avanço foi alcançado quando Gálio foi substituído por Fósforo na dopagem do Silício. Desta maneira, as células foram mais facilmente soldadas entre si, superando os 6% de eficiência.

Em 1955, a célula de silício teve sua primeira aplicação prática, atuando como fonte de alimentação em uma rede telefônica em Americus, na Geórgia, EUA. O painel era composto por nove células de 30 mm de diâmetro, sendo montado em outubro de 1955 e removido em março de 1956. A Figura 2.2 apresenta uma foto deste painel sendo instalado.

De 1954 à 1960, a *Hoffman Electronics Corporation* aumentou a eficiência de suas células solares de 2% para 14%, um aumento significativo, numa época onde 1 watt de energia produzida por uma célula solar custava 250 dólares, comparado aos 2 a 3 US\$/W obtidos através de usinas a carvão.

Nestas primeiras aplicações de energia fotovoltaica, os objetivos resumiam-se a alimentar cargas quando não havia disponibilidade de energia vinda da rede, geralmente em lugares remotos, e em aplicações espaciais, em satélites e sondas espaciais. Nas décadas de 1960 e 1970, apesar dos altos preços (cerca de 100 dólares por Watt em 1971) das placas solares, houve um grande aumento de uso dessa tecnologia nestas aplicações espaciais, devido à baixa relação peso-potência (UNIVERSIDADE TÉCNICA DE LISBOA, 2006).

Figura 2.2- Painel fotovoltaico em Americus, Geórgia, em 1954.



Fonte: (UNIVERSIDADE TÉCNICA DE LISBOA, 2006)

A NASA instalou no satélite *Vanguard I* um painel contendo seis células solares de 0,01 m² de área, para a alimentação de um transmissor reserva. Enquanto o transmissor original, alimentado por uma bateria de mercúrio, funcionou por vinte dias, o transmissor alimentado pelo painel fotovoltaico funcionou por cerca de oito anos. O programa espacial soviético adotou uma medida similar, e o satélite *Sputnik-3* foi dotado também de um painel fotovoltaico. A Figura 2.3 apresenta um modelo do satélite *Vanguard I*.

Na década de sessenta a pesquisa em painéis solares foi grandemente impulsionada, devido à guerra fria. Nesta época, todo o esforço era no sentido de aumentar a eficiência dos painéis, sem haver grandes preocupações com o custo.

No começo da década de setenta, enquanto Joseph Lindmeyer trabalhava para a *Communications Satellite Corporation*, ele inventou uma célula de silício, cerca de 50% mais eficiente do que as concorrentes da época. Embora a *Comsat* fosse dona da patente, Lindmeyer convenceu-se de que a energia solar estava pronta para o público em geral, assim, Lindmeyer saiu da *Comsat* e fundou a *Solarex* em 1973 junto com Peter Varadi (UNIVERSIDADE TÉCNICA DE LISBOA, 2006).

Figura 2.3- *Vanguard I*, o primeiro satélite contendo um sistema de alimentação por energia solar.



Fonte: (WIKIPÉDIA, 18.jul.2014)

Devido à crise petrolífera da época, o mercado de painéis solares entrou em expansão. Em 1980, a *Solarex* detinha metade do mercado de células solares. Neste mesmo ano, Elliot *Berman*, trabalhando numa subsidiária da *Exxon*, a *SPC (Solar Power Corporation)* usando material de segunda categoria, foi capaz de reduzir os preços das placas, produzindo painéis por 10 US\$/W.

A crise de petróleo de 1973 levou a uma investigação mais profunda sobre células solares, agora com um enfoque em diminuir os custos de produção. Os painéis eram baseados exclusivamente em silício mono-cristalino, o que encarecia a produção das placas. Com a descoberta de outros materiais, como o silício multicristalino, e com novos métodos de produção de silício, reduziu-se os custos de produção dos painéis, ao mesmo tempo em que a eficiência aumentava, sendo 20% usando Silício monocristalino, chegando a 25% de eficiência usando concentradores de luz. (PARTEIN, 1995).

A partir dos anos 80, devido a preocupação com mudanças climáticas e independência energética, houve um aumento significativo no número de políticas para economia de larga escala para células solares. Em 1982, uma central fotovoltaica de 1MW é posta em operação na Califórnia, abrindo precedente para que, em 1999, a marca de 1GW de potência instalada fosse atingida.

Em 1998, células de silício monocristalino atingiram 24,7% de eficiência, e em 2003, células de Silício policristalino ultrapassaram os 20% de eficiência. Células mais complexas, otimizadas para maior aproveitamento de todas as faixas do espectro, conseguem atingir mais de 34% de eficiência. (VALLÈRA, 2006)

Atualmente, melhorias subseqüentes na tecnologia fizeram os custos de produção chegar a menos de 1US\$/W, enquanto os preços de venda chegam à menos de 2 US\$/W. Desde 2010, sistemas comerciais inteiros podem ser construídos por menos de US\$3,40.

Fora dos Estados Unidos, outros países a investirem massivamente nessa tecnologia são o Japão e Alemanha; ambos os países trabalham para baixar os custos de produção e tornar a energia solar competitiva, através de pesquisa e desenvolvimento de novas técnicas de produção.

2.2 Descrição do Efeito Fotoelétrico

O Efeito fotoelétrico refere-se à observação que muitos metais emitem elétrons ao serem expostos a luz; elétrons emitidos dessa maneira são referidos como fotoelétrons. Apesar de que a teoria eletromagnética vigente previsse que fosse possível a ejeção de pequenas partículas carregadas de superfícies metálicas (a estrutura das superfícies metálicas possuem fracas ligações a partículas carregadas), a análise de resultados dos experimentos sobre ejeção de elétrons sob efeito da luz não era compatível com a teoria eletromagnética, e foram mais bem explicados em 1925, com o desenvolvimento da Mecânica Quântica (ELERT, 2011).

Os prótons de uma onda de luz possuem energia característica proporcional a frequência de onda. Quando a luz atinge ou supera uma determinada frequência, a energia por próton fica maior do que a energia que prende o elétron ao núcleo do átomo. Se um elétron absorve esta energia, ele é desalojado do material metálico. Para valores de frequência abaixo deste limiar, não há emissão de elétrons, independentemente da amplitude ou do tempo da exposição à luz. Toda a energia do próton deve ser absorvida e usada para deslocar o elétron, ou caso contrario, a energia é reemitida. Se a energia é absorvida, parte da energia é usada para liberar o elétron do átomo e o resto contribui como energia cinética do elétron como uma partícula. (MILLIKAN, 1916)

A teoria clássica de eletromagnetismo previa que esse efeito seria atribuído à transferência da energia da luz para o elétron, donde deduzir-se-ia que uma alteração na amplitude ou no comprimento de onda corresponderia a uma alteração na taxa de elétrons

emitidos pelo material. Também segundo a teoria clássica, existiria um atraso entre a emissão de elétrons e a incidência da luz, que seriam proporcionais entre si, e o efeito seria independente da frequência da onda. No entanto, as observações experimentais mostraram que não há relação entre energia cinética dos elétrons liberados e a intensidade da luz, não há atraso perceptível entre a incidência de radiação e ejeção de elétrons, e que para baixas frequências de onda, não se observa o efeito fotoelétrico (SERWAY, 1990).

Essa discrepância decorre do fato que o sistema de trabalho nas equações de Maxwell é suposto como contínuo. Este problema decorria de que se ainda considerava a matéria no Universo como contínua, e não como quantizada. A teoria que considera a matéria como quantizada começou a ser aceita no final do século XIX devido aos trabalhos de Thomson, que descrevia a matéria como granular. Aquele problema era recorrente também em outros fenômenos da física, como o espalhamento luminoso. (ELERT, 2011). Outro problema era na descrição matemática da interação da matéria com ondas eletromagnéticas, pois o átomo de Thomson tem um raio da ordem 10^{-10} m, enquanto a luz tem um comprimento de onda muito maior do que o raio do átomo, variando entre 10^{-6} e 10^{-7} m.

Em 1905, Albert Einstein apresentou uma solução ao problema; ele publicou um artigo que propunha que a energia na onda de luz fosse discretizada em pacotes quantizados de energia, chamada de fótons. Os resultados previstos por Einstein foram confirmados por Robert Millikan em 1915, e Einstein recebeu o Nobel em 1921 pela descoberta da lei do efeito fotoelétrico.

A energia cinética máxima de um elétron ejetado é de:

$$K_{max} = h \cdot f - \varphi \quad (2.1)$$

Nesta equação, a energia cinética é dada por K_{max} , h é a constante de Planck, a frequência da onda é f , e φ seria a função trabalho, que determina a energia necessária para a ejeção do elétron. No entanto, a equação poderia ser reescrita, pois φ tem o valor dado por:

$$\varphi = h \cdot f_0 \quad (2.2)$$

Onde f_0 é a frequência mínima requerida para a ejeção do elétron. Substituindo na equação de energia cinética, tem-se:

$$K_{max} = h \cdot (f - f_0) \quad (2.3)$$

Como K_{max} e h são positivos, a frequência f deve ser maior do que f_0 . (FROMHOLD,1991)

2.3 Tipos e materiais de placas solares

Até 2004 o limite teórico de conversão de energia em células de silício era de 27%, sendo que atualmente o limite teórico é de 33,5%, enquanto na prática pode-se alcançar até 28% de eficiência (SAVAGE, 2011). O semiconductor é purificado a níveis de 99,9999%, e é introduzido nele impurezas numa determinada medida, no processo chamado de dopagem (CRESESB, 2004).

As células fotovoltaicas são em sua grande maioria constituídas de silício cristalino, sendo que o funcionamento destas baseia-se no conceito de uma junção p-n. O silício é dividido em várias categorias, dependendo da cristalinidade e tamanho de cristal. Além de silício, células também podem ser constituídas de telureto de cádmio ou de uma liga de cobre-índio-gálio-selênio. Estes materiais são apresentados a seguir.

2.3.1 Silício monocristalino (c-Si)

As células constituídas por silício monocristalino têm maior eficiência comparada a outros tipos de materiais, porém em contrapartida, é mais cara, devido à maior complexidade de produção e maior pureza de matéria prima.

Como as pastilhas de silício são obtidas de um lingote cilíndrico de silício, elas não cobrem completamente uma célula quadrada sem desperdiçar uma quantia significativa de silício. Por isto a maioria dos painéis deste material tem lacunas em seus quatro vértices.

Nesta composição de silício, o cristal é homogêneo, o que pode ser notado por uma coloração externa uniforme. Cristais únicos grandes são raros de ser obtidos na natureza, sendo também difíceis de serem produzidos em laboratório.

A partir de lingotes de silício monocristalino, são obtidas pastilhas de silício usando-se laminas metálicas com bordas de diamante, ou com fios estreitos junto de lodo abrasivo. As rebarbas resultantes do corte são removidas com hidróxido de sódio (NaOH). As pastilhas são geralmente dopadas com boro, para serem difundidas com Fósforo através de gás fosfina (PH₃), o que cria uma camada tipo-n no material. Após isto, imprime-se os contatos na pastilha.

Para os contatos da superfície que capta a luz, usa-se uma cola de prata em pó juntamente com ligantes orgânicos e um compósito vítreo. As conexões traseiras consistem de cola de alumínio pra dopar a região tipo-p para construir a *Back Surface Field*. Seca-se esta

pasta através de temperaturas entre 350 à 400 graus Celsius. Conclui-se o processo de metalização à 700°C, de maneira a obter uma boa resistividade dos contatos. Aplica-se a camada anti-reflexo, através de spray de dióxido de titânio. Finalmente, limpam-se os excessos e as células são testadas e soldadas (NASSABAY, 2011). A Figura 2.4 apresenta a aparência de uma célula fotovoltaica constituída de silício monocristalino.

Figura 2.4 - Célula de silício monocristalino.



Fonte: (DEPARTMENT OF ENERGY, 2005)

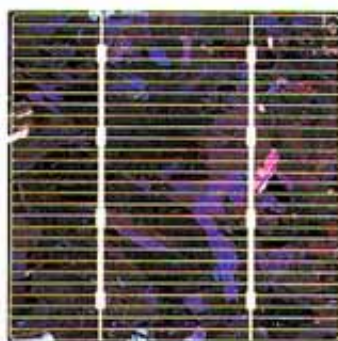
Atualmente, silício monocristalino é usado para a construção de painéis fotovoltaicos de alto desempenho, sendo que estas células podem chegar a 25% de eficiência em laboratório, e seus módulos ultrapassaram a eficiência de 20% em 2013, mostrando uma melhoria de 5,5% num período de dez anos. Painéis de silício monocristalino correspondem a cerca de 36% do mercado de painéis fotovoltaicos, atrás apenas da fatia de mercado ocupada pelos painéis de silício policristalino (FRAUNHOFER ISE, 2014).

2.3.2 Silício policristalino (p-Si)

Células de silício policristalino são mais baratas e menos eficientes do que as células de silício monocristalino. O custo destas células é menor pois não há a necessidade de criar um cristal único de silício, como os métodos da seção anterior descrevem. Silício policristalino é obtido de lingotes quadrados de silício, que são blocos de silício fundidos cuidadosamente resfriados e solidificados.

É um material composto por vários cristais pequenos de silício. Podem ser reconhecidos por granulado visível no material. Este silício policristalino pode ter uma pureza de até 99,9999%, como mencionado anteriormente, sendo que o material ultra-puro é usado na indústria de semicondutores, a partir de barras de 2 a 3 metros de comprimento e em componentes micro. A Figura 2.5 apresenta a aparência de uma célula constituída de silício policristalino.

Figura 2.5 - Célula de silício policristalino



Fonte: (CRESESB, 2004)

Os painéis de silício policristalino dominam o mercado atual, com fatia de 55% do mercado. Em laboratório, estas células atingiram a marca de 20,4% de eficiência (FRAUNHOFER ISE, 2014), porém pesquisadores do MIT conseguiram aumentar a eficiência das células solares de silício policristalino para 27% em laboratório, o que pode colocar a eficiência das células solares policristalinas no mesmo nível das monocristalinas, podendo em alguns casos até superá-las (BULLIS, 2008).

2.3.3 Silício Amorfo (a-Si)

As células de filmes finos é uma tecnologia mais recente, comparadas com as células de cristais de silício. Estas células têm eficiência de cerca de 13%, menor do que as células de silício monocristalino e policristalino. O processo de produção de silício amorfo permite que filmes finos do material sejam depositados em substratos de baixo custo, como vidro, aço inox e alguns plásticos. Assim, pode-se desenvolver painéis solares mais leves, mais resistentes, semitransparentes e com superfícies curvas. (FALCÃO, 2005)

Ainda pesquisa-se a solução para alguns problemas encontrados com a estabilidade deste material, como o efeito Staebler-Wronski, que se refere ao aumento na densidade das imperfeições com a exposição à luz, o que causa redução na eficiência de conversão de energia solar em energia elétrica. Este efeito pode ser minimizado através da adoção de

células com múltiplas camadas (CRESESB, 2004), ou pode ser revertido ao aquecer a substância a temperaturas de mais de 150°C.

As primeiras aplicações comerciais desta tecnologia surgiram na década de 80, com módulos de área de poucos centímetros quadrados, em calculadoras portáteis. É estimado que o volume vendido das células amorfas seja maior do que o volume de células cristalinas vendidas até o momento (NASSABAY, 2011). No entanto, devido aos baixos níveis de eficiência das células amorfas, individualmente estas não são para a geração de grandes blocos de potência. Através de multijunções, pode-se atender aplicações de potência. A Figura 2.6 apresenta uma célula de silício amorfo flexível à esquerda e um rolo com vários módulos de maneira a atender aplicações de potência à direita.

Figura 2.6 - Células de silício amorfo.



Fonte: (NASSABAY, 2009)

2.3.4 Células de Telureto de Cádmio (CdTe)

Uma tecnologia recente na geração de energia fotovoltaica, a célula de telureto de cádmio está na forma de filmes finos, assim como as células de silício amorfo. Em calculadoras, esta célula já era usada a uma década, enquanto painéis de grande área começam a ser comercializados somente agora. Estes painéis têm uma coloração marrom ou azul escura, esteticamente diferente das outras células, mas assim como o silício amorfo, uma das características mais atrativas nesta tecnologia é o custo baixo para produção em massa. A eficiência destas células pode alcançar até 16,7% em condições específicas em laboratório, enquanto os valores de eficiência em condições comerciais estão em torno de 10 a 11% (HECHT, 2010). Esta tecnologia tem a distinção de ser a única baseada em filmes finos com menores custos que silício cristalino em muitos campos do mercado, especialmente em

sistemas de potência, como também é uma das tecnologias mais ecologicamente eficientes no mercado. A Figura 2.7 apresenta uma amostra de telureto de cádmio.

Figura 2.7 - Amostra de telureto de cádmio



Fonte: (NASSABAY, 2009)

2.3.5 Células de disseleneto de cobre e índio (CuInSe₂ ou CIS)

Outra tecnologia de célula fotovoltaica muito atrativa pela sua alta eficiência seria os compostos de disseleneto de cobre e índio (CuInSe₂), geralmente referido pela sigla CIS. Estes possuem as mesmas características dos painéis de silício amorfo e telureto de cádmio, sendo que as eficiências alcançadas em laboratório chegam a 19,2%.

Atualmente, a liga CuInGaSe₂ pode ser usada como alternativa ao CIS, sendo que estas duas ligas são referidas como CIGS. Estas ligas mostram-se estáveis e resistentes a radiação solar, não somente em aplicações terrestres, mas também em aplicações espaciais. (FALCÃO, 2005).

Assim como o telureto de cádmio, o disseleneto de cobre e índio tem sido usado desde o final da década de 70. Sua eficiência, em condições comerciais atuais é de 15%; Seriam necessários 124kg deste material para produzir um megawatt de potência (PARTEIN, 1995).

2.3.5 Células de arseneto de gálio (GaAs)

O arseneto de gálio possui varias propriedades desejáveis para aplicações em células solares como energia de banda proibida próxima do valor ideal, alto coeficiente de absorção e a possibilidade de formar ligas com vários materiais. As células solares deste material possuem alta eficiência, porém devido ao elevado custo de fabricação, seu uso se restringe a aplicações espaciais, que demandam alta eficiência. (CARVALHO, 2012)

Em 2011, foi apresentado na *37th IEEE Photovoltaic Specialist Conference*, em Seattle, uma célula de arseneto de gálio capaz de atingir 28,2% de eficiência, um nível capaz de competir com combustíveis fósseis (SAVAGE, 2011). Atualmente, a indústria produz células com níveis de eficiência de até 35%, valor superior às células de silício. A Figura 2.8 apresenta o satélite MidSTAR-1 encoberto por seus painéis fotovoltaicos.

Figura 2.8 - Células solares de GaAs de alta eficiência cobrindo o satélite MidSTAR-1.



Fonte: (NASSABAY, 2009)

2.4 Descrição do módulo fotovoltaico

O módulo ou painel fotovoltaico é a menor unidade de aproveitamento de energia solar do ponto de vista do usuário. Estas estruturas, compostas por células interconectadas, podem ser conectadas em série ou em paralelo, de acordo com a necessidade de tensão e corrente.

Como cada célula gera uma baixa tensão elétrica, cerca de 0,5V, estas devem ser agrupadas em módulos, sendo desejável que as células possuam as mesmas características elétricas, pois em caso de discrepâncias, as células de maior foto corrente e foto voltagem dissipam sua potência em células de desempenho inferior, o que reduz a potência do módulo fotovoltaico (CRESESB, 2004).

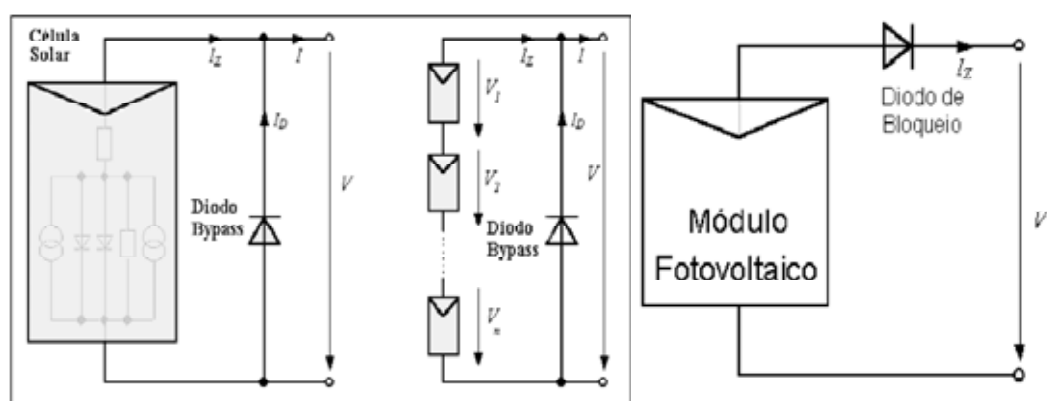
Para carregar baterias de 12V, um módulo fotovoltaico deve ser capaz de gerar 16V, devido à temperatura e perdas no sistema. Desta forma, os módulos geralmente possuem 28 a 40 células de silício cristalino. Como as células baseadas em filme fino produzem tensão mais alta do que aquelas baseadas em células cristalinas, módulos de filme fino podem conter menos de 28 células.

As células, por terem espessura muito reduzida, necessitam de proteções contra esforços mecânicos e fatores ambientais. Inicialmente, as células eram posicionadas entre duas camadas de vidro, presas por uma cola de silicone, o que fazia o processo lento, caro e sujo. Atualmente as células são encapsuladas em materiais plásticos, sendo os mais comuns o *EVA* (*Etil Vinil Acetato*) e o *Tedlar* (*PVF – Polyvinyl Fluoride Film*). O lado exposto à radiação solar incidente era coberta por plástico, vidro temperado ou resina de silicone, os quais são bastante resistentes, protegendo as células fotovoltaicas e aumentando a rigidez mecânica. A região não exposta à radiação é coberta por materiais como folha de alumínio, plástico e vidro. Para a dissipação de calor, utiliza-se alumínio, uma vez que altas temperaturas podem diminuir a vida útil do módulo. (LUQUE e HEGEDUS, 2011).

Como as células solares num módulo são ligadas em série, sua potência de saída pode cair drasticamente caso a superfície do módulo seja parcialmente sombreada. Para que a corrente do módulo não seja limitada por uma celular de desempenho inferior, usa-se um diodo em paralelo com a célula para permitir um caminho alternativo para a corrente, que é chamado de diodo “*bypass*” ou de passagem (CARVALHO, 2012).

Além destes diodos “*bypass*”, existe um diodo em série com cada módulo, chamado de diodo de bloqueio. Quando um módulo fotovoltaico alimenta uma bateria, pode haver corrente reversa passando pelas células, o que reduz a eficiência das células. Com o diodo de bloqueio, a corrente só flui no sentido direto. A Figura 2.9 apresenta um modelo para o circuito interno de um módulo fotovoltaico com o diodo de bloqueio em série com o módulo.

Figura 2.9 - Diodo bypass á esquerda e diodo de bloqueio à direita.



Fonte: (CRESESB, 2004)

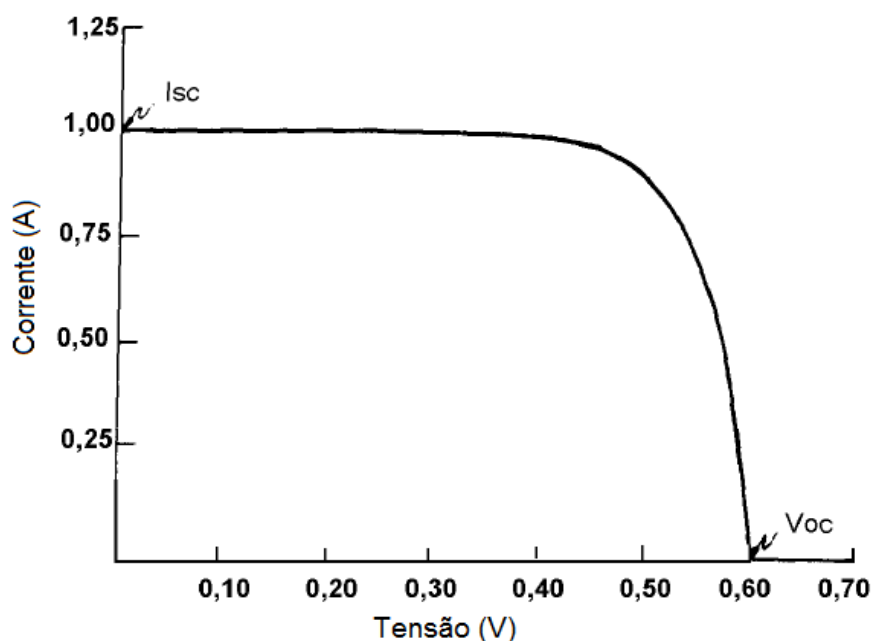
2.5 Características elétricas das células e módulos

A escolha de um painel fotovoltaico deve ser feita a partir da necessidade de corrente e potência que é solicitada pela carga do sistema fotovoltaico. Assim, as características elétricas devem ser levadas em consideração para selecionar um módulo para cada sistema em particular.

A tensão medida entre os terminais da célula ou módulo fotovoltaico sem nenhuma carga ligada é chamada de tensão de circuito aberto, referida como V_{oc} , enquanto a corrente máxima atingida quando os terminais são conectados diretamente é chamada de corrente de curto-circuito, referida como I_{sc} .

Pode-se traçar uma curva característica corrente versus tensão com os valores destas variáveis, como é mostrado na Figura 2.10. A curva é parametrizada à temperatura e radiação as quais as curvas foram obtidas.

Figura 2.10- Curva característica IxV típica para uma célula de silício.

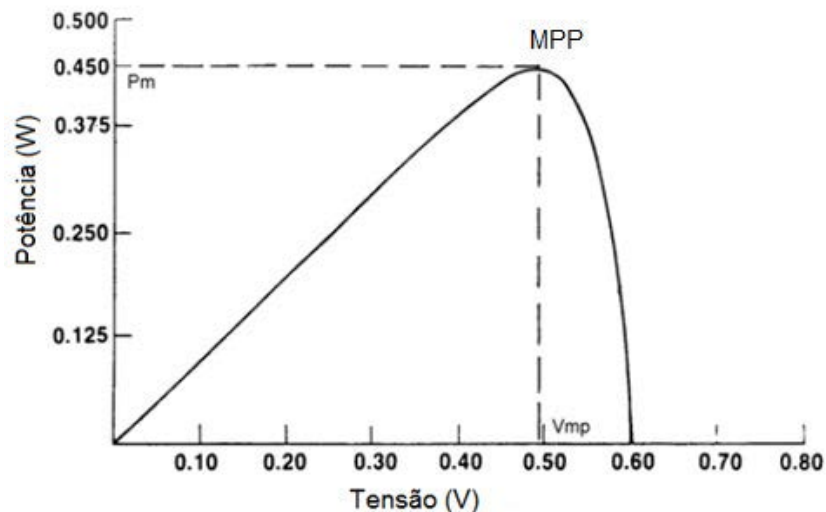


Fonte: (CRESESB, 2004)

Realizando o produto da tensão pela corrente, obtêm-se a potência gerada pela célula, permitindo traçar uma curva de potência versus tensão. Esta curva possui um ponto máximo, onde a tensão e corrente correspondente à potência máxima a ser extraída de uma célula fotovoltaica. Este ponto é chamado de ponto de potência máxima ou MPP (*Maximum Power Point*), e a potência, corrente e tensão são referidas por P_{mp} , I_{mp} e V_{mp} , respectivamente.

Estes valores de P_{mp} , I_{mp} , V_{mp} , V_{oc} , I_{sc} são todos dependentes de valores específicos de radiação, temperatura e massa de ar (CARVALHO, 2012). A Figura 2.11 mostra a curva de potência versus tensão típica para células de silício.

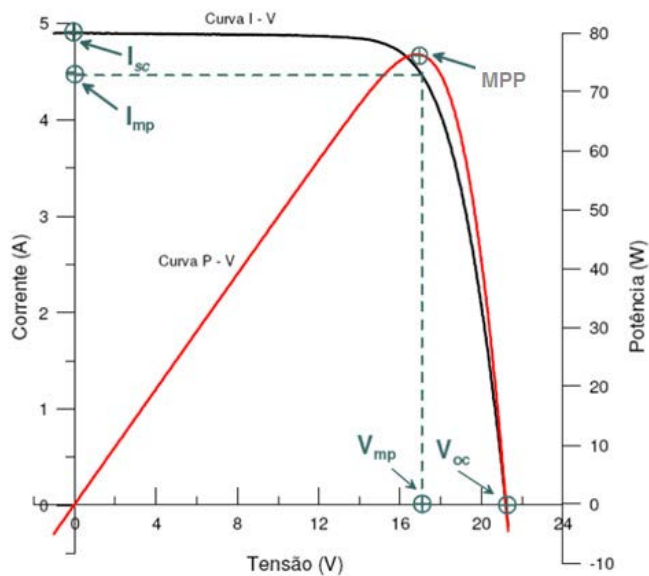
Figura 2.11 - Curva de potência versus tensão.



Fonte: (CRESESB, 2004).

Superpondo ambas as curvas de potência e corrente, obtém-se a Figura 2.12:

Figura 2.12 - Curvas de corrente versus tensão e potência versus tensão superpostas.



Fonte: (GASPARIN, 2009)

Pode-se ter uma medida da qualidade das células do módulo através da expressão do fator de forma. Quanto mais próximo este valor for de um, mais próxima será a curva da forma de um retângulo, o que indica melhor qualidade das células. A expressão é dada por:

$$FF = \frac{I_{mp}V_{mp}}{I_{sc}V_{oc}} \quad (2.6)$$

Onde FF é o fator de forma.

A eficiência de uma célula é simplesmente a divisão da potência máxima pela potência solar irradiada sobre a célula. É dada por:

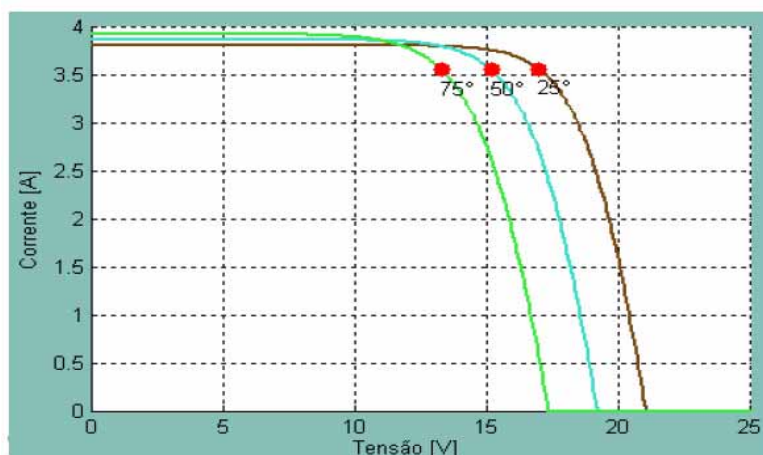
$$\eta = \frac{I_{mp}V_{mp}}{AG} \quad (2.7)$$

Onde η é a eficiência do painel, A é a área da célula em m^2 e G é a irradiância sobre o painel, dada em W/m^2 .

O desempenho dos módulos é afetado pela temperatura e irradiância (intensidade luminosa) das células. Sob condições normais, a temperatura é definida como $25^\circ C$ e a irradiância é definida como $1000 W/m^2$, o equivalente a radiação recebida na superfície da terra em dia claro ao meio dia sob a temperatura definida (CARVALHO, 2012).

A temperatura reduz a eficiência do módulo; quando a temperatura sobe, a tensão cai significativamente enquanto a corrente tem um aumento quase desprezível. Células baseadas em silício amorfo são menos influenciadas pela temperatura. A Figura 2.13 ilustra os efeitos causados pelo aumento da temperatura numa célula típica de silício.

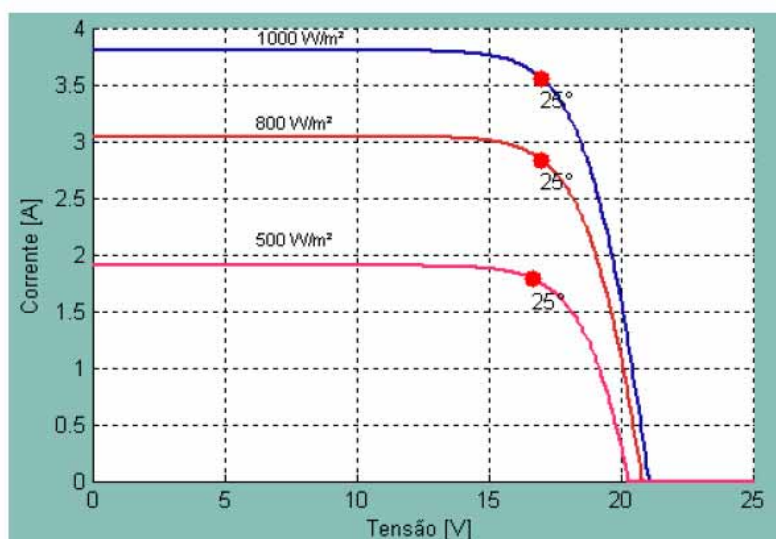
Figura 2.13 - Efeito da temperatura sobre as curvas de corrente versus tensão para irradiância de $1000 W/m^2$.



Fonte:(PACHECO, 2009)

Conforme aumenta a irradiância, aumenta-se a corrente gerada pelo módulo. É válido lembrar que como o Sol movimenta-se no céu de acordo com a hora do dia, para se aproveitar ao máximo da irradiância do Sol deve-se acompanhar este movimento. Isto pode ser feito com seguidores ou *trackers*, mas isto implicaria num elevado aumento de custos na instalação dos painéis. Outra solução seria fixar os painéis numa inclinação otimizada em função da latitude do sitio de instalação do painel (CARVALHO, 2012) O efeito da irradiância é ilustrado na Figura 2.14.

Figura 2.14 - Curvas Corrente versus Tensão sob diferentes irradiâncias

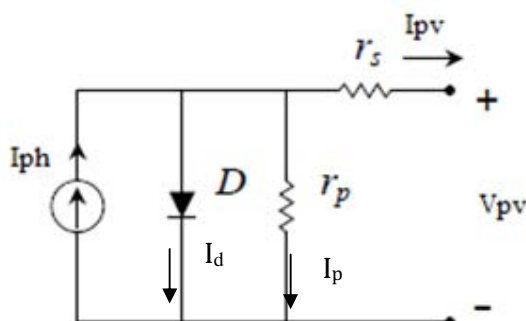


Fonte: (PACHECO,2009)

2.6 Modelo equivalente da célula fotovoltaica.

A Figura 2.15 é o circuito mais simples que representa uma célula fotovoltaica.

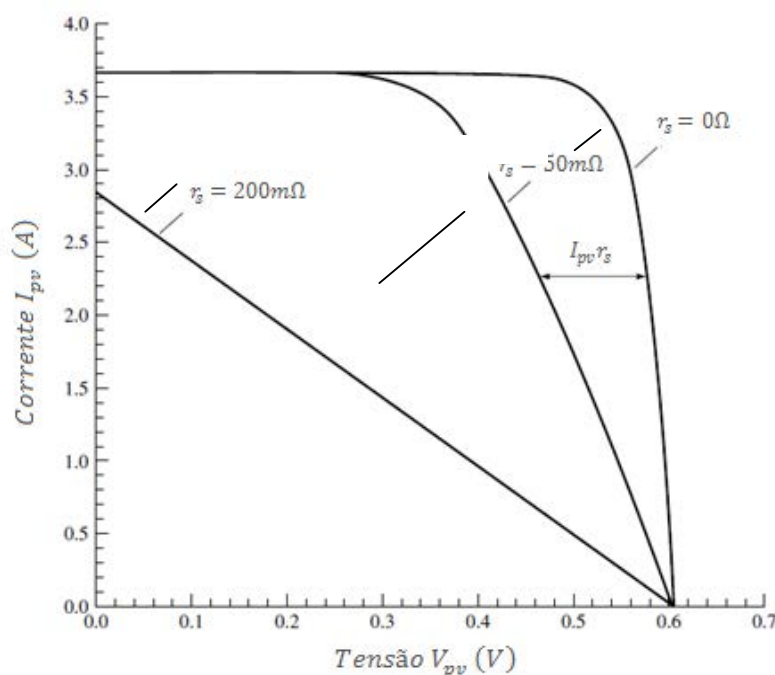
Figura 2.15 - Modelo Equivalente da célula fotovoltaica.



Fonte: (CARVALHO, 2012)

A corrente I_{ph} é proporcional a irradiância e a temperatura. A tensão V_{pv} e a corrente de saída I_{pv} apresentam não-linearidade, devido ao diodo D. Os valores de V_{pv} e I_{pv} também são afetados pela temperatura ambiente. A resistência r_s representa a resistência causada pelos terminais de saída e soldas do material semiconductor, além da resistência própria do material semiconductor. O resistor r_p age como passagem para a corrente de fuga na superfície do material. Como a corrente de fuga é baixa, o valor desta resistência é elevado. As Figuras 2.16 e 2.17 mostra o efeito de r_p e r_s na curva $I \times V$.

Figura 2.16 - Efeito de r_s sobre V_{pv} e I_{pv}



Fonte: (LUQUE e HEGEDUS, 2011)

Nota-se que r_s não afeta a tensão de circuito aberto V_{oc} , mas causa efeito sobre a corrente de circuito aberto I_{oc} . Já r_p não afeta a corrente de curto circuito I_{sc} , mas afeta V_{oc} . (LUQUE e HEGEDUS, 2011)

Pode-se encontrar uma equação para a corrente I_{pv} , uma vez que esta é a diferença entre as correntes I_{ph} (gerada pela célula) e a corrente I_d (através do diodo).

$$I_d = I_0 \cdot \left(e^{\frac{V_{pv} + r_s I_{pv}}{A \cdot V_t}} - 1 \right) \quad (2.8)$$

onde:

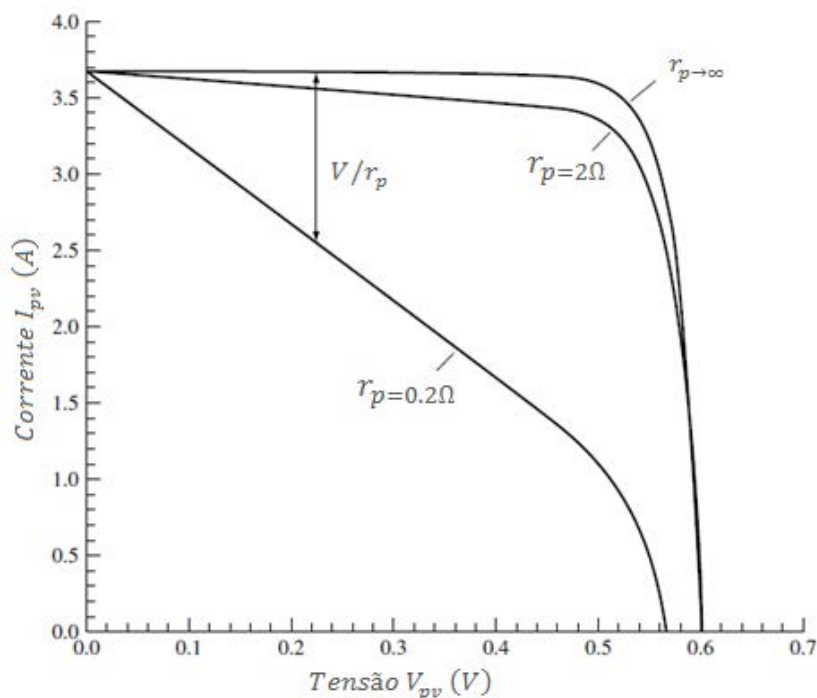
I_0 : corrente de saturação reversa do diodo [A];

I_{pv} : corrente de saída da célula fotovoltaica [A];

V_{pv} : tensão de saída da célula fotovoltaica [V];

A : área da célula [m^2];
 r_s : resistência em série [Ω];
 V_t : tensão térmica [J/C].

Figura 2.17 - Efeito de r_p sobre V_{pv} e I_{pv}



Fonte: (LUQUE e HEGEDUS, 2011)

2.7 Rastreamento do ponto de máxima potência

Existem controladores desenvolvidos especialmente para melhorar o desempenho dos sistemas de alimentação constituídos por uma fonte não linear. Estes controladores, denominados de Controladores de Ponto de Máxima Potência começaram a ser desenvolvidos em 1968. O controlador na Figura 2.25 é usado para fazer com que fontes de energia com características não lineares trabalhem no ponto de potência máxima, resultando assim, numa melhoria na transferência de energia para carga. (CARVALHO, 2012)

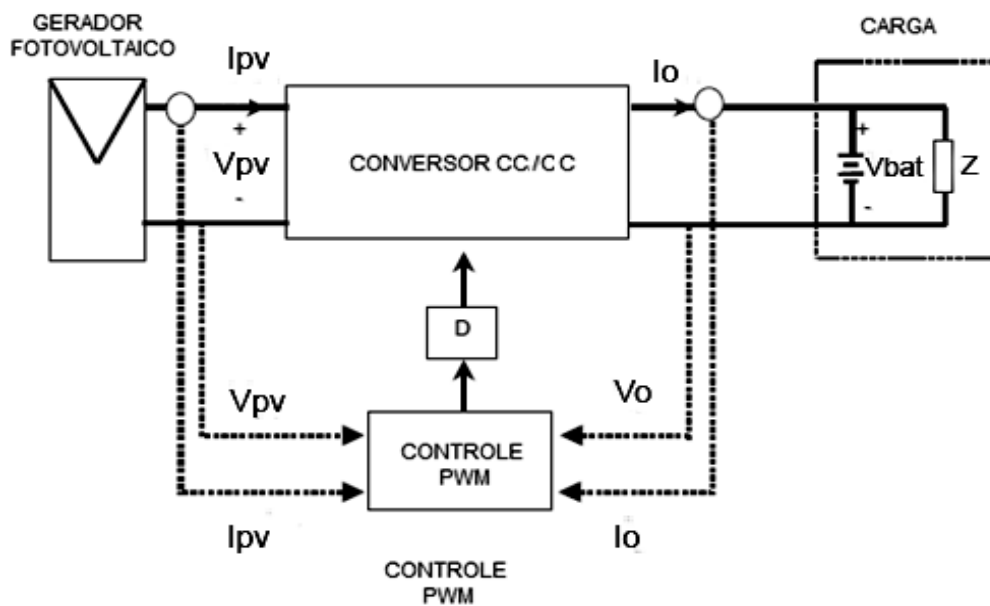
Estes controladores trabalham no sentido de forçar fontes não lineares, como é o caso do painel fotovoltaico, a funcionar em seu ponto de máxima potencia, garantindo a transferência máxima de potência para uma carga arbitraria.

A precisão e robustez do controlador dependem de parâmetros específicos do circuito, tais como o rendimento global do sistema, o tipo de conversor PWM usado, a característica de fornecimento de energia(se esta é DC-DC ou DC-AC) e o tempo de convergência. O uso

do rastreamento do ponto de máxima potência produzem um acréscimo de 15% a 30% no rendimento do sistema. (CARVALHO, 2012)

Existem vários métodos discutidos na literatura de rastreamento do ponto de máxima potência. Pode-se listar alguns dos métodos mais comuns, no quadro 2.1.

Figura 2.18 - Controlador de ponto de máxima potência



Fonte: (SALAS ET AL, 2006)

Quadro 2.1 - Métodos de rastreamento do ponto de máxima potência

CLASSIFICAÇÃO	MÉTODOS	DESVANTAGENS
Métodos indiretos: Baseado nos parâmetros armazenados em banco de dados e dados empíricos.	Ajuste de curva: Modelagem off-line das características não-lineares de um painel fotovoltaico.	<ul style="list-style-type: none"> A resolução implica um difícil controle; Requer conhecimento prévio dos parâmetros físicos.
	Pesquisa de tabela: Armazenamento de valores do MPP em uma base de dados.	<ul style="list-style-type: none"> Grande memória; Ajustado para um painel específico.
	Gerador fotovoltaico de tensão de circuito aberto: A tensão de saída é linearmente proporcional a tensão de circuito-aberto.	<ul style="list-style-type: none"> Os ajustes são específicos para cada tecnologia e condições meteorológicas; A potência real não é exata.
	Gerador fotovoltaico de corrente de curto-circuito: A corrente de saída é linearmente proporcional a corrente de curto-circuito.	<ul style="list-style-type: none"> Os ajustes são específicos para cada tecnologia e condições meteorológicas; A potência real não é exata.
	Teste de tensão de circuito aberto da célula fotovoltaica: Monitoração da tensão de circuito aberto do gerador fotovoltaico.	<ul style="list-style-type: none"> Este teste supõe que as células sejam idênticas, o que nem sempre é verdade.
Métodos de amostragem (Método direto): a tensão e/ou corrente do gerador fotovoltaico é medida para que a potência de saída seja sucessivamente comparada.	Diferenciação: Equações.	<ul style="list-style-type: none"> Os cálculos e medidas têm que ser efetuados rapidamente.
	Realimentação de tensão e corrente: Ajuste do <i>duty cycle</i> do conversor DC/DC.	<ul style="list-style-type: none"> Não é possível adaptar-se às variações súbitas de irradiância e temperatura.
	Perturbação e observação (P&O): Mede a perturbação para que seja determinada a mudança de direção no rastreamento do MPP.	<ul style="list-style-type: none"> Não é possível adaptar-se às variações súbitas de irradiância e temperatura.
	Condutância incremental: Baseado no método da P&O, usa os valores de I_{PV} / V_{PV} para determinar o sinal de $[d(P_{PV}) / d(V_{PV})]$.	<ul style="list-style-type: none"> Circuito de controle complexo Necessita dos sensores de tensão e corrente.
	Capacitância parasita: Similar ao método da condutância incremental inclui a capacitância parasita.	<ul style="list-style-type: none"> Circuito de controle complexo.
	Amostragem de corrente: Mede somente a corrente do PV.	<ul style="list-style-type: none"> Método simples; Implementado somente para conversores <i>buck</i>.
Métodos de modulação.	Oscilações forçadas: Uma pequena tensão (modulação) é somada a tensão de operação do gerador fotovoltaico.	<ul style="list-style-type: none"> Implementação complexa.
Métodos de inteligência artificial.	Lógica <i>fuzzy</i> e redes neurais.	<ul style="list-style-type: none"> Mede duas variáveis: tensão e corrente; Implementação complexa.

Fonte:(Adaptado de SALAS et al, 2006)

2.8 Topologias comuns de geração fotovoltaica

Um sistema fotovoltaico é definido como um conjunto de dispositivos destinados à conversão de energia solar em energia elétrica, sendo composto por pelo menos um painel fotovoltaico, pela estrutura de sustentação dos painéis, um inversor de frequência para o atendimento de cargas AC, dispositivos de proteção, e em certos casos, um sistema de armazenamento de energia, utilizando capacitores e baterias. A tecnologia atual ainda não é competitiva comparada a formas convencionais de geração de energia, mas aplicações para esses sistemas são encontradas em ambientes rurais ou em pequenos sistemas elétricos, como repetidores de sinal de telefonia móvel. Em conjunto com um sistema de armazenamento de energia, estes sistemas isolados são capazes de atender cargas de até algumas dezenas de *kilowatts*, o que torna estas opções mais atrativas do que outras opções tradicionais, como a conexão à rede ou o uso de geradores (NASSABAY, 2009).

Sistemas fotovoltaicos isolados geralmente recorrem a alguma forma de armazenamento de energia. Este armazenamento pode ser feito através de baterias, através de energia gravitacional, bombeando água em tanques de abastecimento, ou através de uma forma pneumática, ou seja, através de ar pressurizado. Em alguns casos esse armazenamento não é necessário, como por exemplo, na irrigação, onde toda a água bombeada é consumida diretamente ou estocada em reservatórios (TER-GAZARIAN, 1994).

Para os casos onde a energia é armazenada em baterias, um dispositivo é usado para carga e descarga da bateria. Esse controle de carga é necessário, pois evita redução na vida útil da bateria por descarga profunda ou por sobrecarga. O controlador de carga é usado em sistemas pequenos de baixa tensão e corrente contínua.

Para a alimentação de equipamentos de corrente alternada, é necessário um inversor, que converte a tensão DC obtida dos painéis em tensão AC. Geralmente estes inversores agem em conjunto com um seguidor de ponto de máxima potência, de maneira a aperfeiçoar a eficiência do processo de conversão da tensão. É um sistema usado para a alimentação elétrica de eletrodomésticos.

Também existem os sistemas fotovoltaicos centralizados, que agem como estações centralizadas de distribuição de energia, que são instaladas a certa distância do ponto de consumo final, e não são ligadas a um consumidor de eletricidade em particular. Além destes, existem os sistemas híbridos, que integram mais de uma forma de obtenção de energia, como o uso de um gerador a diesel, por exemplo.

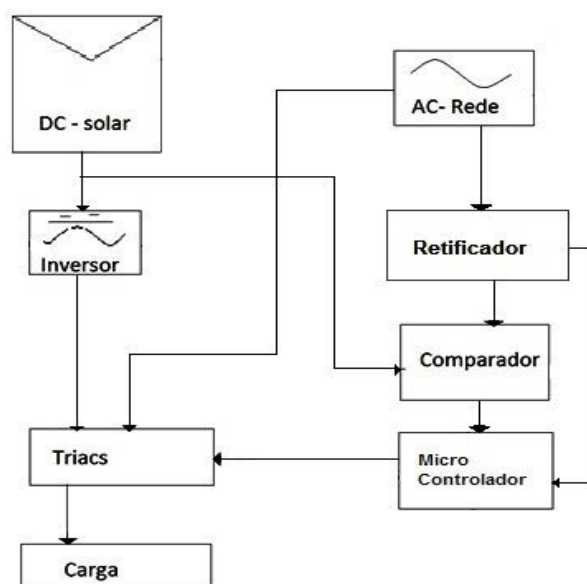
3 SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO DE CARGAS INTERMITENTES

Neste capítulo é feita uma descrição detalhada do sistema de alimentação e comutação, levando-se em consideração cada circuito e descrevendo sua função no sistema.

O sistema alimenta uma carga através da rede elétrica e pelo painel fotovoltaico, de maneira não paralela. Quando houver tensão suficiente gerada pelo painel fotovoltaico, haverá uma comutação da alimentação de energia da rede para a obtida através de painel fotovoltaico; em caso contrário, haverá comutação para a alimentação da rede. Entre cada comutação realizada pelo sistema existe um período, de aproximadamente 5 segundos, onde a carga não receberá alimentação tanto dos painéis solares quanto da rede. Esse tempo morto evita o uso de circuitos sincronizadores entre as duas fontes (MARCELINO & PRADO, 2014).

A finalidade principal deste sistema é a alimentação de cargas com potência não superiores a 1/3 HP, devido às limitações próprias dos painéis fotovoltaicos, sendo que cargas maiores podem ser atendidas com a utilização de mais unidades deste sistema em paralelo. (MARCELINO & PRADO, 2014). A Figura 3.1 apresenta um diagrama de blocos do sistema.

Figura 3.1 – Diagrama de blocos do sistema



Fonte: (AUTOR)

3.1 Descrição da carga

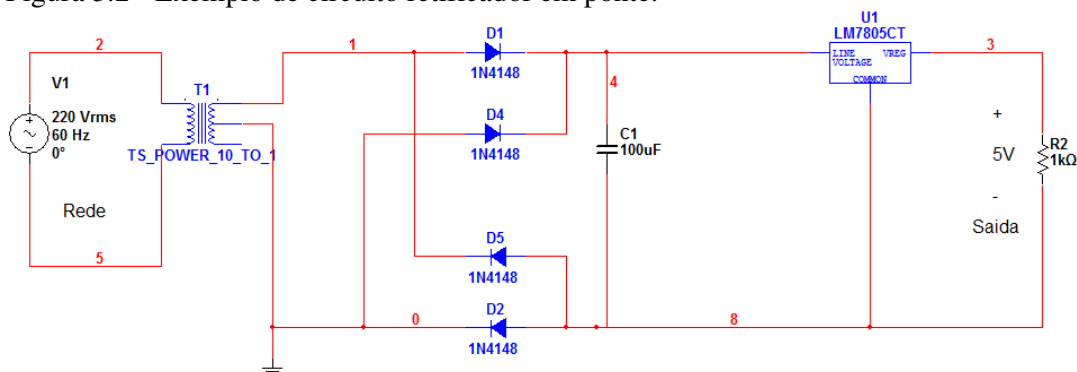
A carga a ser alimentada pelo sistema é uma geladeira doméstica, que em geral, funciona de forma intermitente, ou seja, não é mantida ligada continuamente, desligando-se automaticamente de tempo em tempo. Quando a alimentação da geladeira é cortada, a isolamento térmica permite que a temperatura necessária para conservar os alimentos persista por um tempo significativo. Como o compressor não trabalha a todo tempo na geladeira, não há perigo de partidas seqüenciais, o que poderia queimar o compressor. Isso permite um processo de transição mais simples.

É válido notar que, como é usado um painel fotovoltaico para a alimentação do sistema, este sistema estará disponível somente durante o dia, período em que a maioria das pessoas não se encontra em casa. Assim, o consumo de energia da geladeira diminui, pois o número de vezes que a geladeira é aberta é menor.

3.2 Adaptações da tensão elétrica da rede e do painel fotovoltaico.

Todos os subsistemas do sistema de alimentação, com exceção do inversor, requerem alimentação de corrente direta. Para fazer uso da grande maioria dos circuitos integrados, é necessário uma tensão de cerca de 5V. Como os painéis solares não funcionam continuamente, a tensão DC que estes subsistemas usam não pode depender dos painéis. Usa-se então a tensão AC da rede para gerar a tensão necessária, através de um circuito retificador. A Figura 3.2 mostra um circuito retificador como exemplo. A saída de tensão deste circuito é de aproximadamente 5V.

Figura 3.2 - Exemplo de circuito retificador em ponte.



Fonte: (AUTOR)

Na Figura 3.2, usa-se um transformador para abaixar a tensão AC da rede, para um valor cerca de 10 vezes menor. Dois pares de diodo se encarregam de permitir a passagem de corrente apenas em um sentido, e o capacitor mantém a tensão estável, sem grandes oscilações. Por ultimo, o circuito integrado LM7805 regula a tensão de saída. Puramente para fins de exemplo, foi colocado um resistor de 1 k Ω representando a carga dos CIs.

3.3 Chaveamento

Uma geladeira residencial requer atualmente uma potência ($P_{geladeira}$) de 1/3HP, ou seja, aproximadamente 250W. Supondo que esta seja alimentada à tensão ($V_{sistema}$) de 127V RMS(AC) e fator de potência Fp de 0,8 pode-se calcular a corrente I solicitada:

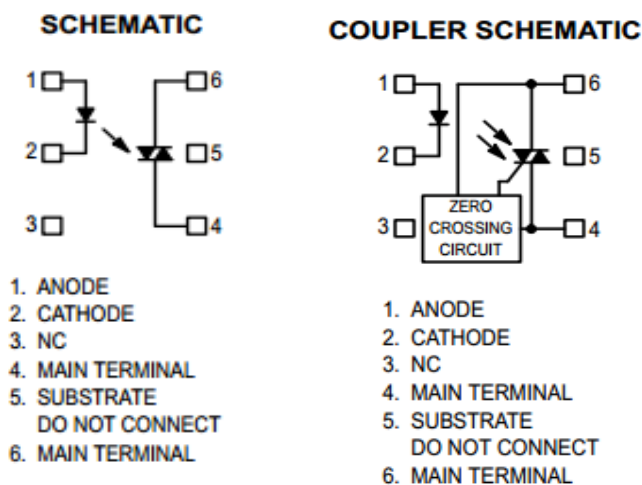
$$I = \frac{S_{geladeira}}{V_{sistema}} = \frac{\frac{P_{geladeira}}{Fp}}{V_{sistema}} = \frac{\frac{250}{0,8}}{127} = 2,461 A \quad (3.1)$$

Esta corrente AC vem dos TRIACs do sistema, que funcionam como chaves contadoras. Um está ligado à tensão da rede enquanto o outro está conectado à saída de tensão do inversor do painel fotovoltaico. O circuito de controle transmite sinais de corrente para o *gate* dos TRIACs, liberando ou não a condução. Enquanto um deles está em estado de corte, o outro deve estar conduzindo, exceto quando ambos estão simultaneamente cortados, como ocorre durante o tempo morto entre as comutações.

Como se trata de um sistema de alimentação com fonte de energia alternativa, é imperativo que não haja a possibilidade de conexão simultânea de ambas as fontes. A cada corte, o sistema se mantém desligado por 5 segundos, antes de realizar a conexão. Isto evita problemas de sincronismo e assegura que as fontes não serão conectadas simultaneamente. (MARCELINO & PRADO, 2014).

Faz-se necessário um acoplador entre o circuito de controle e os TRIACs que conduzirão corrente à carga, um CI que envie um sinal adequado ao *gate* dos TRIACs para que estes entrem em condução quando necessário. Para isto, existem CIs que servem para este propósito, chamados de optoisoladores, que são componentes capazes de transferir sinais entre circuitos isolados através de luz. Os CIs MOC 3021, MOC 3022, MOC 3023, MOC 3041, MOC 3042, MOC 3043 atuam desta maneira. Na Figura 3.3 está o diagrama interno destes circuitos, com o acoplador MOC3021-3023 à esquerda e acoplador MOC3041-3043 à direita. (MOTOROLA, 1995).

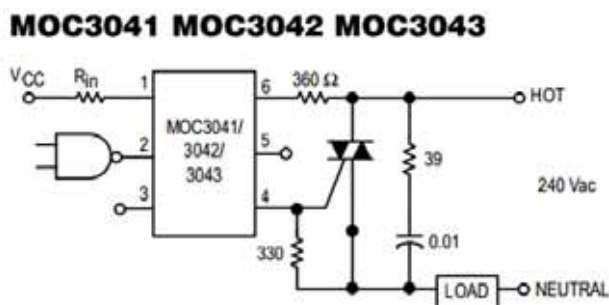
Figura 3.3 - Esquemático do acoplador MOC3021-3023 e do acoplador MOC3041-3043.



Fonte: (MOTOROLA, 1995)

Nota-se que os CI MOC 3041-3043 contam com um circuito de detecção de zeros. Os *datasheets* recomendam o uso do MOC3041-3043 para partida de motores. A Figura 3.4 apresenta um circuito típico de chaveamento usando MOC3042.

Figura 3.4 - Circuito de chaveamento usando MOC3042.



Fonte: (MOTOROLA, 1995)

O CI MOC3042 age como um *driver* para o TRIAC de chaveamento. O pino 1 está conectado a voltagem de alimentação do sistema de controle através de R_{in} , enquanto o pino 2 recebe um sinal invertido do sistema de controle. No caso de um sinal alto do sistema de controle (o que significa que esta saída deverá ser habilitada), o pino 2 receberá um sinal baixo, o que faz a corrente passar pelos pinos 1 e 2 (no caso do MOC3042, uma corrente de 10mA. Estimando-se $V_{cc} = 5V$, tem-se que $R_{in} = 500\Omega$), e por sua vez permite a passagem de corrente no pino 4, que é conectado no *gate* do TRIAC. Finalmente, o pulso resultante no *gate* do TRIAC libera a condução de corrente da fonte para a carga, quando a tensão estiver

passando pelo zero. Desta maneira, o circuito de controle não interage diretamente com o circuito de condução e chaveamento.

3.4 Circuito do comparador de tensão

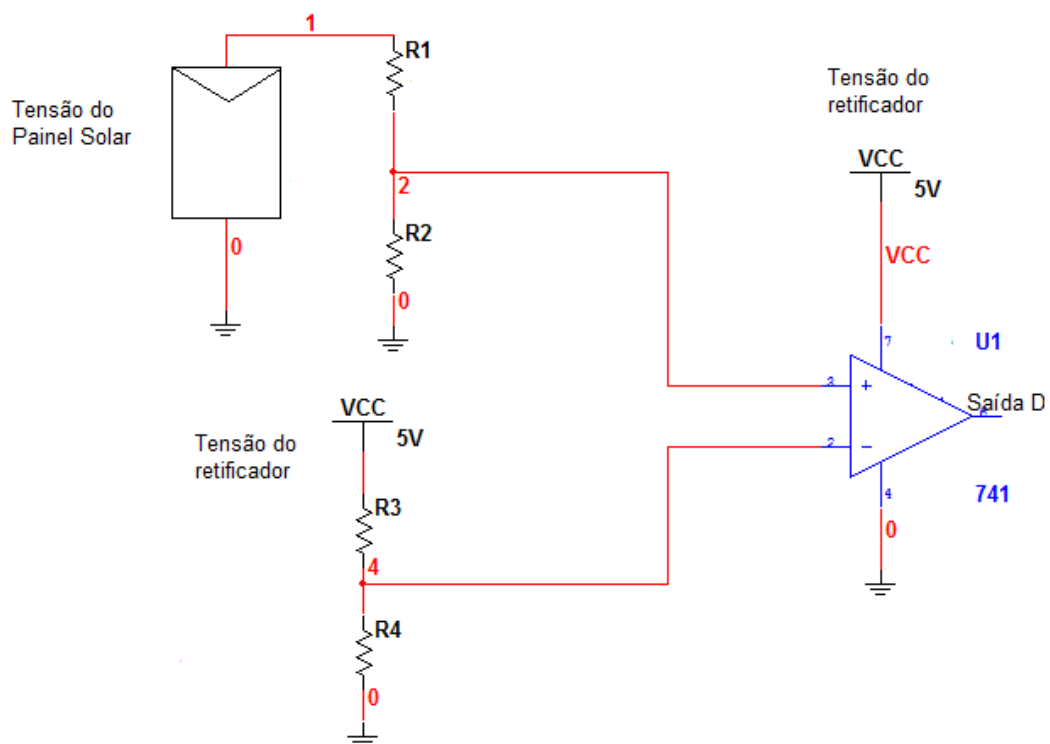
O circuito de controle deverá enviar sinais digitais que realizam o controle do chaveamento da alimentação da carga. Há um sinal de entrada, chamado D, que depende do comparador de tensão da rede elétrica e do inversor do painel fotovoltaico, e existem dois sinais de saída, sendo um que controla a saída de tensão pela rede elétrica, definido aqui como sinal P, e outro que controla a saída de tensão do inversor do painel fotovoltaico, definido como Q.

O sinal D refere-se à disponibilidade da potência de saída do inversor do painel fotovoltaico. Quando há tensão suficientemente alta para alimentar a carga, ou seja, acima de um limiar capaz de gerar a potência necessária para alimentar a carga, D torna-se alto, e caso esteja abaixo deste limiar de tensão, D torna-se baixo. Este limiar deve ser ajustado considerando a curva de potência por tensão, para permitir que a potência de saída do painel atinja os valores solicitados pela carga (MARCELINO & PRADO, 2014).

A Figura 3.5 apresenta um circuito comparador que gera o sinal D. A tensão vinda do painel fotovoltaico é reduzida pelo divisor de tensão composto por R1 e R2, e comparada com a tensão referência obtida do divisor de tensão composto por R3 e R4. Caso a tensão do painel seja mais alta do que a tensão da referência, a saída D será de 5V (sinal alto), mas caso seja menor, a saída D será de 0V (sinal baixo).

A tabela 3.1 apresenta a tabela da verdade do sistema, contendo todos os estados possíveis para os sinais do sistema. O sinal Q, em estado 1, da lógica temporizada aciona o TRIAC do painel fotovoltaico para disponibilizar a energia alternativa para a carga. O sinal P, em estado 1, aciona o TRIAC da rede, para disponibilizar a energia da rede pública para a carga. Os estados futuros para Q e P, são Q_f e P_f , respectivamente. A garantia que as energias não serão fornecidas ao equipamento ao mesmo tempo, está no fato de não existir o estado $Q = 1$ e $P = 1$, na tabela da verdade (MARCELINO & PRADO, 2014). Uma maneira de implementar um circuito que obedeça a tabela-verdade acima é através de um microcontrolador, que irá interpretar os dados e gerar os sinais corretos para P e Q.

Figura 3.5 - Comparador responsável pelo sinal D.



Fonte: (AUTOR)

Tabela 3.1 – Tabela da verdade do sistema.

D	Q	P	Q _f	P _f
1	0	1	0	0
1	0	0	1	0
1	1	0	1	0
1	1	1	*	*
0	1	0	0	0
0	0	0	0	1
0	0	1	0	1
0	1	1	*	*

Fonte:(MARCELINO & PRADO, 2014)

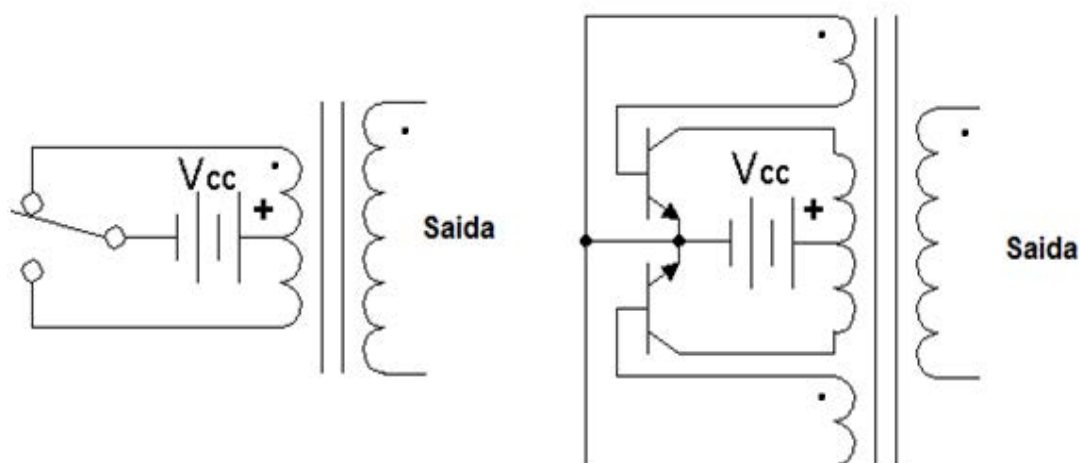
3.5 Inversor

O inversor é um circuito que converte corrente direta para alternada. A tensão e frequência de saída dependem dos parâmetros de montagem do circuito. A forma de onda de saída geralmente é senoidal, quadrada ou senoidal modificada, isto é, uma onda senoidal aproximada por ondas quadradas. É desejável que a onda seja senoidal pura, pois a vasta maioria dos eletrodomésticos trabalha com uma senoidal, podendo haver mau funcionamento caso o dispositivo seja alimentado por uma onda quadrada, devido a presença de harmônicos.

A topologia do circuito inversor pode variar bastante entre projetos, mas a idéia central é de um circuito que alimenta a carga, enquanto força uma troca de polaridade na frequência desejada. Geralmente, usa-se uma chave ou um par de transistores para realizar o chaveamento, de maneira que a corrente flua pela carga por ambos os sentidos. Se um par de transistores é usado, geralmente há também uma parte no circuito agindo como um oscilador, que se encarrega de controlar o chaveamento dos transistores.

A Figura 3.6 mostra exemplos de circuitos inversores simples. Para trocar a polaridade da saída, o circuito à esquerda realiza chaveamento através de uma chave mecânica, enquanto o circuito à direita usa um par de transistores para realizar o chaveamento. A frequência de saída da onda depende da frequência que é feito o chaveamento.

Figura 3.6 - Exemplos de inversores simples.



Fonte: (COWIE, 2006)

Os circuitos acima geram uma onda quadrada na saída. Para gerar uma onda senoidal, acopla-se um filtro na saída do sistema, uma vez que a componente fundamental da onda quadrada, após a supressão das componentes harmônicas, é a forma de onda desejada na

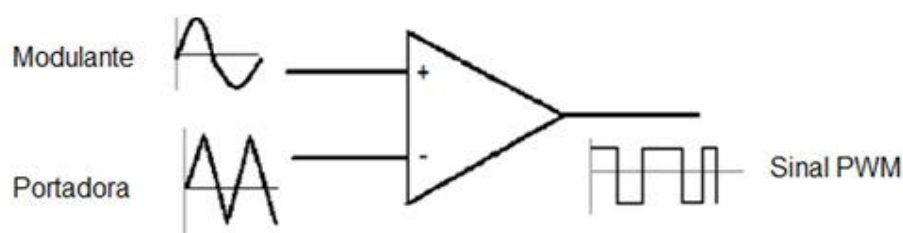
alimentação. Se o inversor envolve um transformador, o filtro pode ser incluído no secundário ou primário do transformador.

Outro método de se aproximar a onda de saída de uma senoidal seria através da modulação PWM, ou modulação por largura de pulso. A finalidade básica dos métodos de modulação por largura de pulso é produzir a amplitude e frequência de uma onda fundamental determinada, mantendo a energia das harmônicas na mais alta faixa do espectro de frequências (MARCELINO, 1998).

Para criar um trem de pulsos com largura de pulso variável, considera-se um sinal de onda triangular, chamado de portadora, sendo comparado com um sinal de entrada, chamado de sinal modulante, num comparador. Enquanto o sinal da portadora tiver um nível de tensão maior do que o sinal modulante, o comparador emite um sinal de saída baixo, e emite um sinal alto pela duração do período que o sinal modulante manter-se acima da portadora. Logo, a onda de saída seria uma serie de pulsos, sendo que cada pulso teria sua largura controlada pelo nível do sinal modulante. Quanto maior for este nível, maior a largura do pulso.

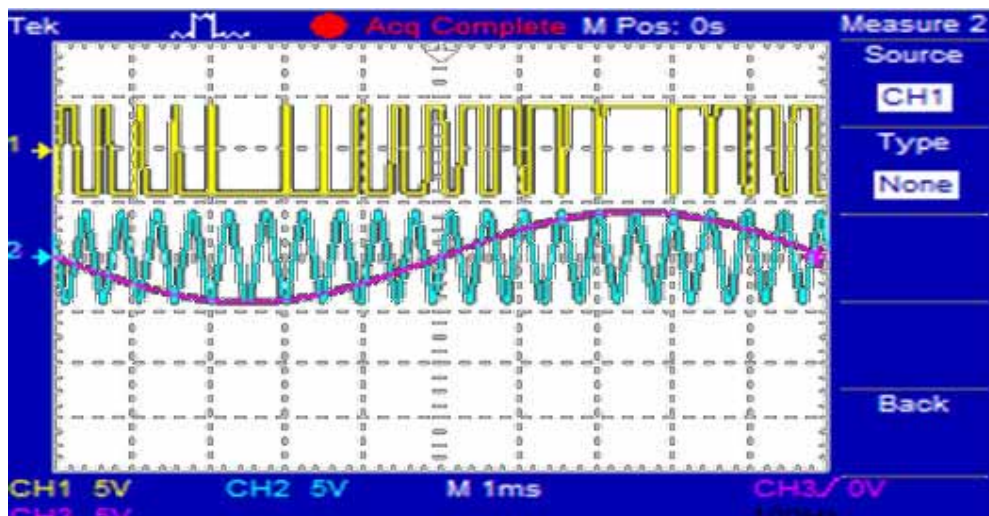
A Figura 3.7 apresenta um exemplo de comparador PWM, com o sinal modulante na entrada positiva e o sinal da portadora na entrada negativa. A Figura 3.8 mostra o resultado de uma simulação no *Multisim* do comparador mostrado na Figura 3.7. Uma senoidal é usada como sinal modulante (4.3 V de amplitude, 60Hz) e é comparada com a portadora (4.3V de amplitude, 2.1kHz). O trem de pulsos resultante está logo acima das ondas modulante e portadora. A largura dos pulsos da saída cresce a medida conforme sobe o nível do sinal modulante.

Figura 3.7- Exemplo de comparador PWM.



Fonte: (AUTOR)

Figura 3.8 - Controle de largura de pulso através de comparador.



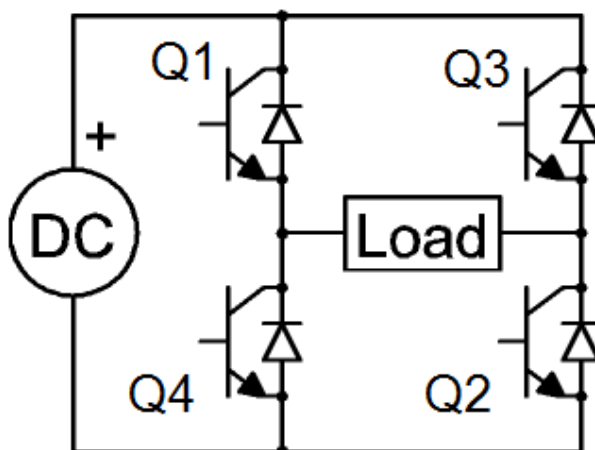
Fonte: (AUTOR)

A Figura 3.9 mostra um circuito de inversor em ponte. O par de transistores Q1 e Q2, e o par de transistores Q3 e Q4, atuam em conjunto para controlar a polaridade da tensão sobre a carga. No momento que Q1 e Q2 entram em condução, Q3 e Q4 cortam, o que força a corrente a atravessar a carga no sentido de Q1 a Q2. Se Q3 e Q4 entrarem em condução, Q1 e Q2 entrarão em corte e a corrente irá passar pela carga no sentido oposto, no sentido de Q3 para Q4.

É comum o uso de PWM para controlar os pulsos emitidos aos transistores. É possível gerar dois trens de pulsos para controlar os dois pares de transistores, de maneira que a onda de tensão resultante na carga tenha uma forma próxima da senoidal desejada. Durante o primeiro semiciclo da forma de onda de saída, o sinal emitido para o par de transistores Q1 e Q2 mantém este par conduzindo, enquanto o sinal emitido ao par Q3 e Q4 mantém o par cortado. Desta maneira, o sinal de controle de Q1 e Q2 seria um trem de pulsos de largura variável, enquanto o sinal de controle de Q3 e Q4 é mantido baixo durante este primeiro semiciclo da onda de saída.

No segundo semiciclo da forma de onda da saída, o sinal emitido ao par Q3 e Q4 força o par à condução, enquanto Q1 e Q2 entram em corte devido ao sinal emitido para o par. Logo, durante o segundo semiciclo da onda, o sinal de controle de Q1 e Q2 é mantido baixo, enquanto o sinal de controle de Q3 e Q4 é uma cadeia de pulsos. Desta maneira a corrente percorre a carga por ambos os sentidos. No caso do inversor alimentar uma carga indutiva, como o lado de um transformador, por exemplo, a forma de onda da corrente torna-se próxima da senoidal, devido à carga agir como um integrador de tensão.

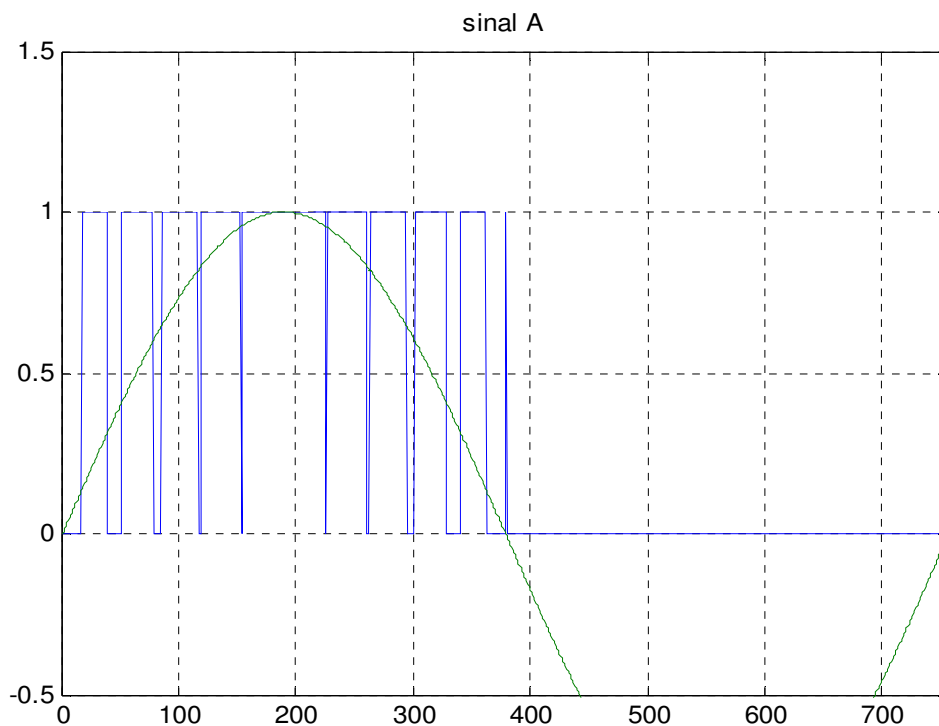
Figura 3.9 - Circuito de inversor em ponte.



Fonte: (COWIE, 2006)

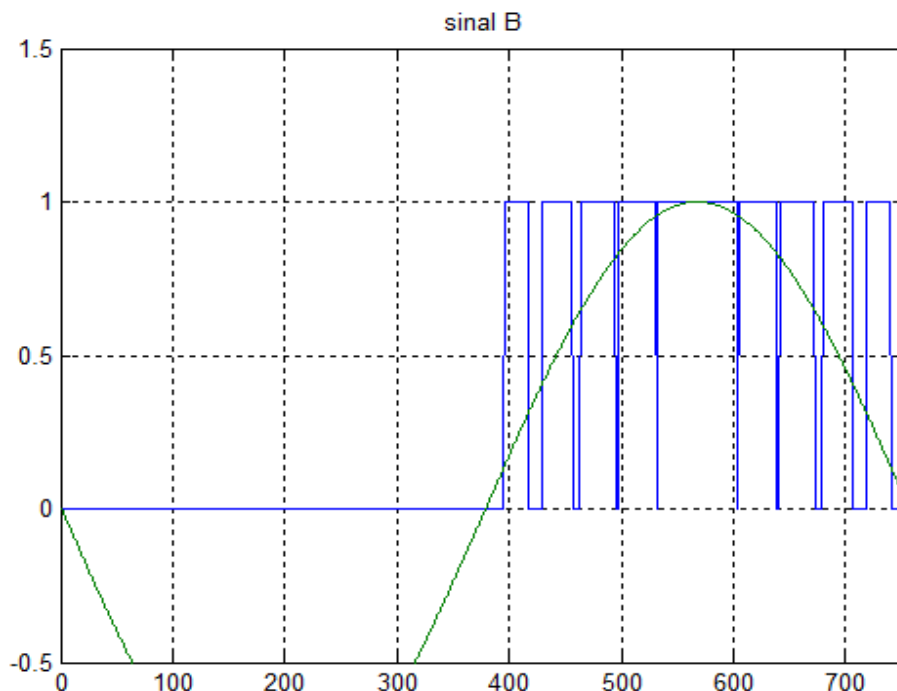
As Figuras 3.10 e 3.11 mostram exemplos de sinais emitidos aos pares de transistores Q1 e Q2, e Q3 e Q4, durante um período completo da forma de onda de saída. Estes sinais PWM foram gerados através do *software* MATLAB, usando a lógica descrita anteriormente. É notado que os sinais são iguais, porém defasados de meio período entre si.

Figura 3.10 – Trem de pulsos emitidos à Q1 e Q2



Fonte: (AUTOR)

Figura 3.11 – Trem de pulsos emitidos à Q3 e Q4



Fonte: (AUTOR)

Pode-se descrever um inversor que atende as demandas do sistema proposto, através de um microcontrolador, que atue gerando os sinais PWM que permitam controlar os transistores do inversor. Como a comparação direta entre um sinal modulador senoidal e um sinal de portadora triangular envolveria testes e decisões que demandariam alta velocidade de processamento por parte do microcontrolador, adota-se a discretização da saída, isto é, fazendo que todas as saídas possíveis sejam amostradas. Com o uso de uma tabela pré-programada contendo as comparações, pode-se usar um microcontrolador de baixa velocidade e custo (MARCELINO, 1998).

3.6 Dimensionamento dos painéis fotovoltaicos

Para iniciar os cálculos de dimensionamento de placas, precisa-se de dados a respeito de potência e custo para várias placas. Pesquisando por painéis no mercado, pode-se ter valores em relação ao custo-benefício e área que estes painéis ocupariam quando instalados.

Da pesquisa realizada em mercado, os painéis com uma menor razão custo-potência foram os modelos HG135, KD250GH-4FB2, SL6P60-240W, e YL140P-17b. A Tabela 3.2 mostra algumas das características obtidas na pesquisa:

Tabela 3.2 – Características de painéis disponíveis no mercado (valores de setembro de 2014)

Fabricante	Modelo	Potência (W)	Preço (R\$)	Dimensões (mm)	Área (m ²)	Material
<i>Mitsubishi</i>	HG-135	135	809,00	1480x680x35	1,0064	silício monocristalino
<i>Kyocera</i>	KD250GH-4FB2	250	1095,00	1662x990x46	1,64538	silício policristalino
<i>Yingli</i>	YL140P-17b	140	629,00	1470x680x25	0,9996	silício policristalino

Fonte: (SOLARTERRA; MINHA CASA SOLAR; NEOSOLAR. 2014)

No capítulo referente ao sistema de cargas intermitentes, foi mencionado a potência consumida pela carga, que seria em torno de 1/3 HP, ou aproximadamente 248W. Para atender esta carga, os painéis serão acoplados em paralelo, em número suficiente. Para se obter a potência esperada, vê-se que a menor área a ser ocupada pelos painéis seria de 1,6m², usando-se um painel com um módulo, ou pode-se obter uma potência maior, em consideração às perdas envolvidas no sistema, colocando dois módulos de menor potência em paralelo, ocupando uma área de 2m².

Considerando um painel que satisfaça a potência solicitada pela carga e a tarifa de energia elétrica para residências, pode-se calcular o tempo necessário para amortizar o investimento necessário para adquirir a placa.

Toma-se como exemplo, o painel de 250W da Kyocera (MINHA CASA SOLAR, 2014), que custa R\$1095,00, e a tarifa de energia elétrica (dados de outubro de 2014, da Bandeirantes Energia S.A), de R\$ 0,41775194 por kWh. Se o painel gerar a potência nominal por cerca de 5 horas por dia, economiza-se 1,25kWh por dia. Assumindo-se que não houvesse reajuste na tarifa de energia elétrica, calcula-se o número de anos *N* necessários para amortecer a dívida:

$$N = \frac{P_{\text{painel}}}{E_{\text{economizada}} \cdot T_{\text{Energia}} \cdot 365} = \frac{1095}{1,25 \cdot 0,41775194 \cdot 365} = 5,745 \text{ Anos} \quad (3.2)$$

Onde:

N = Número de anos necessários para amortecer a dívida;

P_{painel} = Preço do painel fotovoltaico;

$E_{economizada}$ = Energia economizada por dia;

$T_{Energia}$ = Tarifa de energia.

Pode-se chegar à conclusão que em menos de 6 anos o investimento inicial para implementar o painel usado no trabalho seria amortizado. É importante constar que os demais itens não foram considerados no cálculo devido aos baixos valores, e principalmente, em uma realização em grande escala, os circuitos seriam otimizados em montagem em superfície, e os custos, que já são baixos, reduziriam significativamente. O custo do painel deve reduzir com o tempo e com o desenvolvimento de novas tecnologias, porém mais lentamente.

4 RESULTADOS

Uma vez projetados os circuitos descritos, partiu-se para a simulação de um circuito completo do sistema. Os circuitos foram simulados em duas plataformas: através de *Multisim* e no *Proteus*. A vasta maioria dos circuitos, como retificadores, comparadores, entre outros, pôde ser testada no *Multisim*.

Foi utilizado no circuito um microcontrolador para realizar o controle do chaveamento e pelo controle do PWM do inversor do painel fotovoltaico, de maneira a gerar tensão AC senoidal a partir da tensão DC do painel fotovoltaico, assim podendo alimentar a carga descrita. Para realizar a programação e simulação do microcontrolador, outra plataforma de simulação teve que ser usada. Foi então usado o *Proteus*, que por possuir um modelo para o microcontrolador, possibilitou sua programação e simulação no circuito principal do sistema.

Um modelo próprio para a simulação de um painel fotovoltaico não foi encontrado na plataforma *Proteus*, logo foi necessário substituir o painel por um modelo simplificado para a simulação. Notou-se que na curva de tensão versus corrente típica de um painel solar, desde que a corrente de saída se mantenha abaixo da corrente de máxima potência, há pouca variação na tensão de saída do painel, o que permite considerar que o painel fotovoltaico comporta-se como uma fonte de tensão DC com baixa resistência interna, durante este intervalo da curva. Assim, deve-se também considerar que o painel na simulação possui potência nominal superior ou igual à consumida pela carga alimentada pelo sistema.

A Figura 4.1 mostra a curva típica de tensão versus corrente de um painel fotovoltaico, superposta à curva de tensão de uma fonte DC com baixa resistência interna, demonstrando a similaridade entre as curvas no intervalo onde a corrente de saída é inferior à corrente de máxima potência do painel.

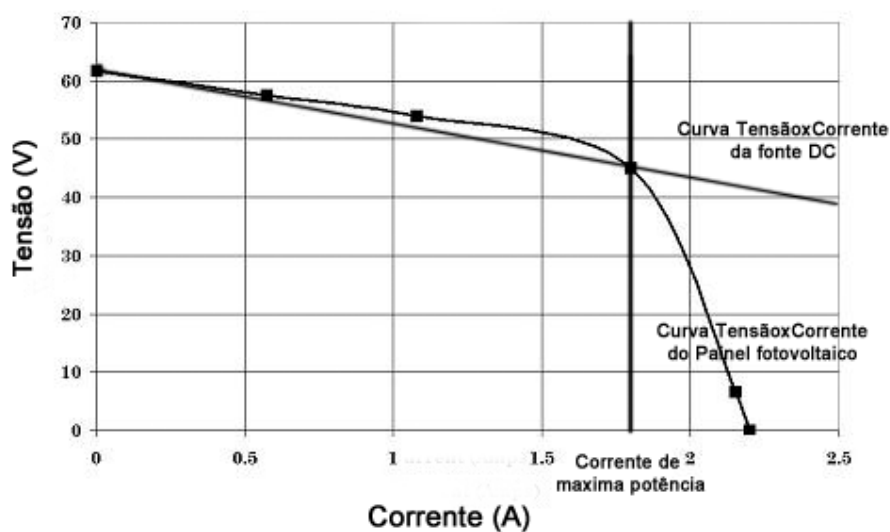
Baseando-se nos parâmetros obtidos do *datasheet* do painel fotovoltaico modelo KD250GH-4FB2 da Kyocera (KYOCERA, 2014), calculam-se os valores de tensão da fonte e da resistência interna da fonte. A Tabela 4.1 mostra as características medidas do painel KD250GH-4FB2 sob condições de teste.

Tabela 4.1 – Parâmetros do painel KD250GH-4FB2

Potência máxima (W)	250
Tensão de potência máxima (V)	29,8
Corrente de potência máxima (A)	8,39
Tensão de circuito aberto (V)	36,9

Fonte: (KYOCERA, 2014)

Figura 4.1- curva de tensão versus corrente de um painel fotovoltaico, superposta à curva de tensão de uma fonte DC



Fonte: (AUTOR)

A tensão nominal da fonte é igual a tensão de circuito aberto do painel fotovoltaico. Para calcular a resistência interna da fonte, considera-se que o painel opera no ponto de máxima potência. Sendo V_{oc} a tensão de circuito aberto, V_{mp} a tensão de máxima potencia e I_{mp} a corrente de máxima potência, calcula-se a resistência interna:

$$R_{int} = \frac{V_{oc} - V_{mp}}{I_{mp}} \Rightarrow R_{int} = \frac{36,9 - 29,8}{8,39} = 0,846\Omega \quad (4.1)$$

Para amostrar o sinal PWM para o controle do inversor, foi usado um programa escrito em C (disponível no anexo A) que faz os cálculos e comparações necessárias para ativar um inversor PWM em ponte H (MARCELINO, 1998). Este programa foi originalmente desenvolvido para controlar um inversor trifásico, e foi modificado para o objetivo deste trabalho, que é o controle da alimentação de uma carga monofásica e intermitente.

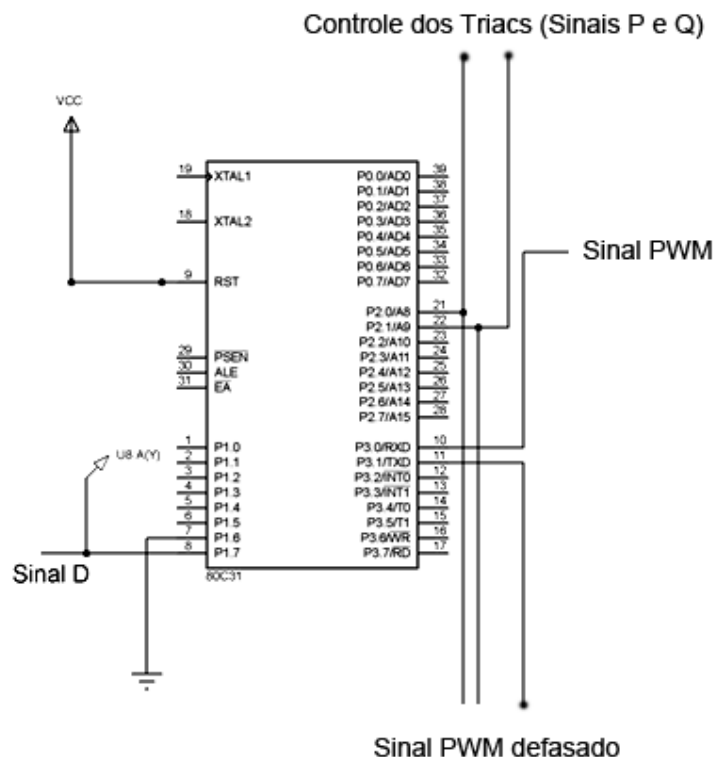
O programa atua como um comparador PWM, realizando comparações entre uma onda senoidal de frequência f e uma onda triangular de frequência $n.f$, sendo n um número inteiro maior que 1. Para cada período da onda portadora, são tomadas m amostras. O programa então gera um arquivo contendo uma tabela com $n.m$ bytes que foram usados no programa do microcontrolador.

O programa fez comparações entre uma onda modulante senoidal de 60 Hz e uma onda portadora triangular de frequência 21 vezes maior do que a modulante. Foram tomadas 36 amostras para cada período da portadora, assim, a onda modulante foi dividida em 756 amostras. Esses parâmetros foram escolhidos de acordo com as recomendações feitas por Marcelino (1998), a fim de reduzir as harmônicas resultantes do processo e garantir que a forma de onda resultante da corrente seja o mais próxima possível de uma senoidal.

Também foi escrito um código em *Asssembly* para o microcontrolador, a partir de outro código existente para o uso de controle de velocidade em motores trifásicos (SOUZA,2011). O programa, modificado para os fins deste trabalho e que pode ser consultado no anexo B, atua gerando a onda PWM para o inversor e o controle dos *TRIACs* do sistema, conforme descrito pela tabela verdade do projeto.

O microcontrolador utilizado neste circuito baseia-se no modelo 80C31 da INTEL, porém nas simulações foi usado um CI genérico, trabalhando na frequência de 24MHz, e possuindo 4 portas, definidas como P0, P1, P2, e P3, cada uma com 8 bits de entrada/saída programáveis. A porta P1 foi tratada como uma porta de entrada, que recebeu o sinal D do comparador. A porta P2 atua como saída para chaveamento dos *TRIACs* de potência, e a porta P3 se encarrega do controle PWM do inversor. A Figura 4.2 mostra o microcontrolador usado no circuito.

Figura 4.2- Microcontrolador 80C31



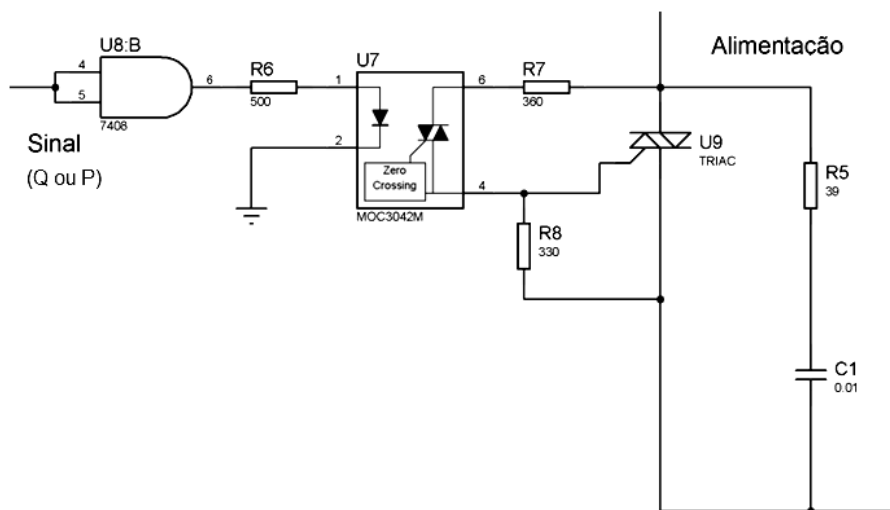
Fonte: (AUTOR)

O sinal D, que é o comparador responsável por identificar se há tensão no painel fotovoltaico, é ligado ao *port* P1.7. Foi usada uma porta AND para atuar como *buffer* do sinal, uma vez que alguns amplificadores operacionais podem não atingir os valores de VCC e GND (sinais que seriam interpretados como 1 e 0, respectivamente).

O tempo morto de 5 segundos entre as transições entre alimentação da rede e alimentação do inversor do painel fotovoltaico, foi implementado por temporizador interno. O programa do microcontrolador permite escolher entre habilitar ou não esta pausa, através do *port* 1.6. Quando um sinal alto (VCC) é aplicado ao *port* 1.6, esta pausa é ignorada, e conectando o *port* ao GND, habilita-se o tempo morto.

Os *ports* P2.0 e P2.1 são responsáveis por habilitar o funcionamento dos *TRIACs* de alimentação da carga. Como descrito anteriormente, existem CIs que permitem o controle destes *TRIACs* através de correntes contínuas, e foi usado o MOC3042M para realizar esse controle. Na Figura 4.3 está o circuito usado para habilitação do *TRIAC*.

Figura 4.3: Circuito de habilitação do TRIAC.

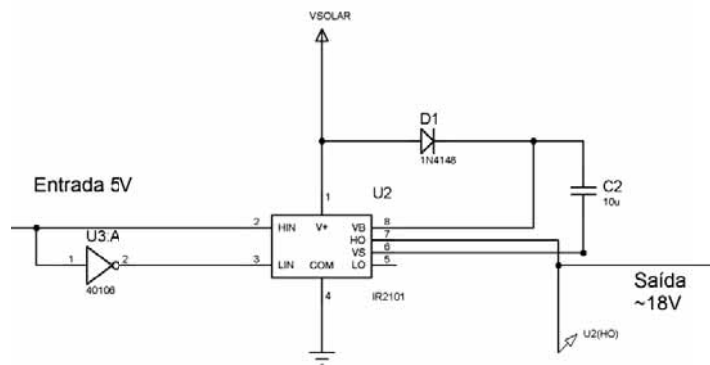


Fonte: (AUTOR)

Para a geração dos sinais de controle do inversor PWM, foram utilizados os *ports* 3.0 e 3.1. O programa lê a tabela de dados gerados pelo programa em C disponível no anexo A, e habilita os *ports* conforme esta lista, a cada interrupção de tempo no programa *Assembly* do microcontrolador. Como a tensão gerada pelo microcontrolador é baixa, é anexado a cada *port* um *driver*, que atua como amplificador de tensão para o sinal dos *ports* para os *gates* dos transistores do inversor. Neste caso, foi utilizado o circuito integrado IR2101. A Figura 4.4 apresenta um dos CI IR2101 do circuito e como foi configurado.

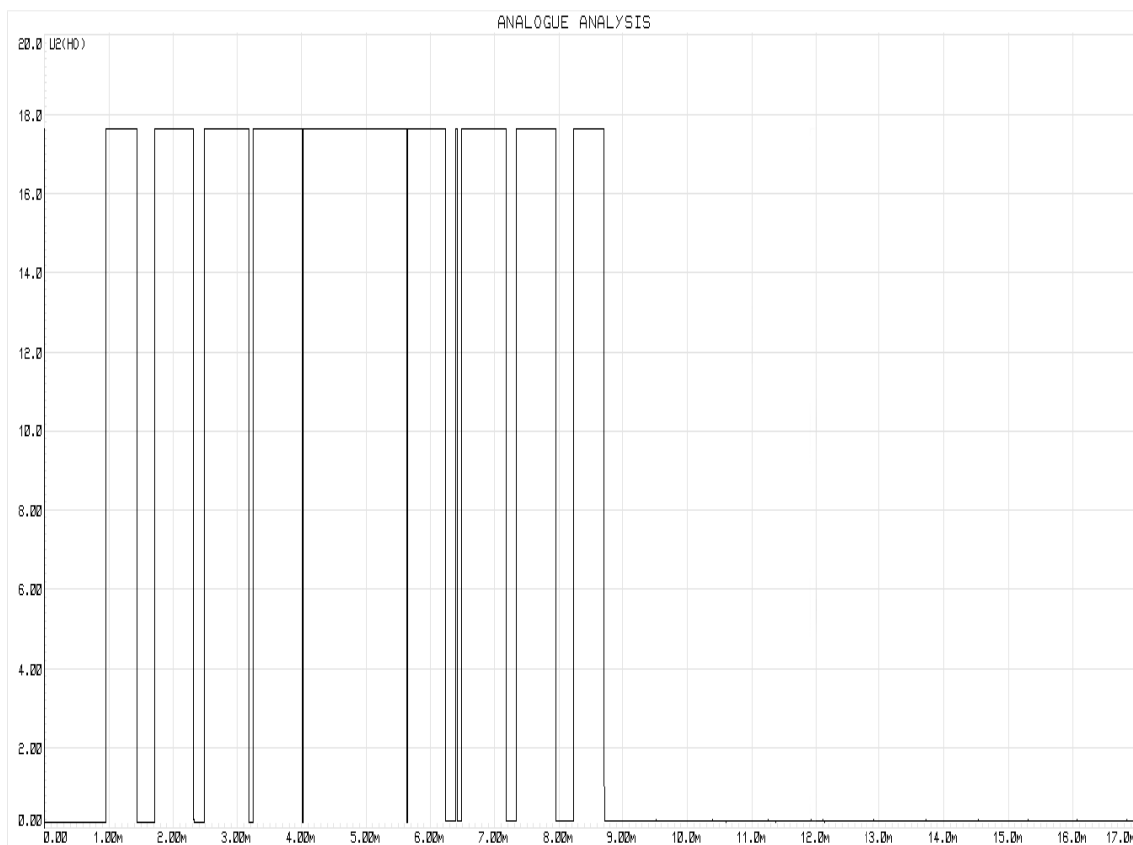
O IR2101 na Figura 4.4 está conectado a um circuito de *bootstrap*, composto pelo diodo D1 e pelo capacitor C2, o que permite ao CI atingir os níveis de tensão flutuantes necessários para disparar os transistores de potência do inversor. A saída HO do CI IR2101 corresponde diretamente aos valores predeterminados pela tabelas de valores no microcontrolador. Como a saída invertida LO do CI não foi utilizada, esta não foi conectada. As saídas HO de ambos os CIs IR2101 podem ser vistas nas Figuras 4.5 e 4.6. Nota-se a defasagem entre as duas formas de onda, com cada onda responsável por gerar um semiciclo da onda senoidal do inversor do painel fotovoltaico.

Figura 4.4 - Configuração do circuito de driver.



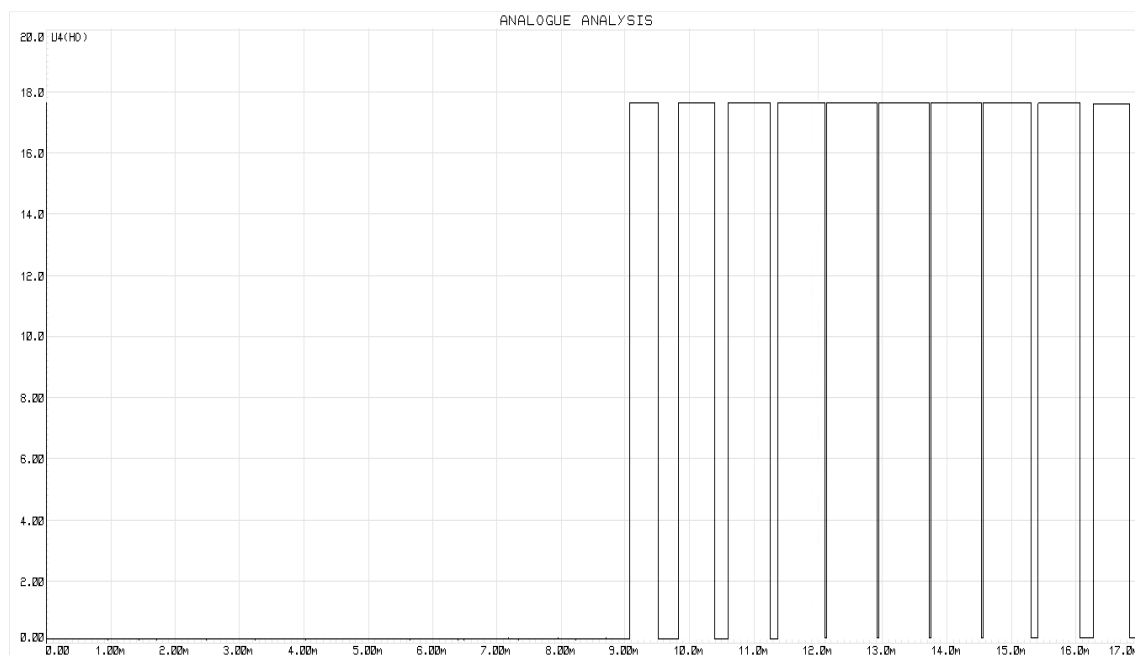
Fonte: (AUTOR)

Figura 4.5 – Saída HO do driver conectado à porta P3.0.



Fonte: (AUTOR)

Figura 4.6 - Saída do driver conectado à porta P3.1.

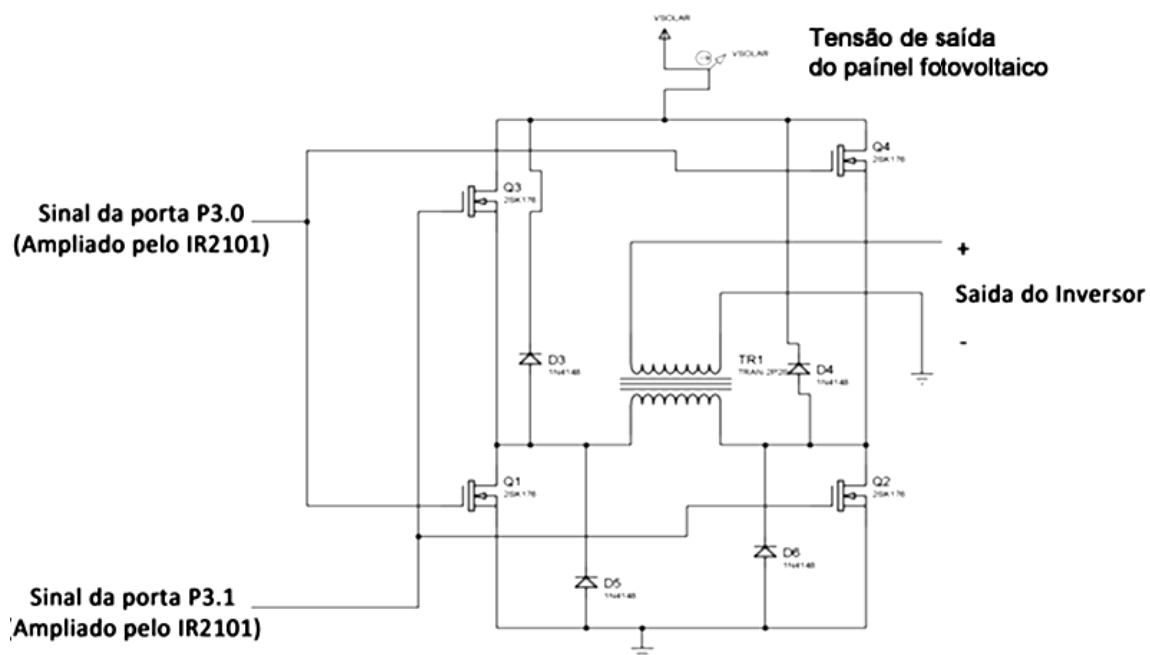


Fonte: (AUTOR)

O inversor usado é do tipo ponte H, acionado pelos sinais PWM transmitido pelo par de CIs IR2101. O sinal é aplicado ao *gate* de cada par de transistores MOSFET, permitindo que a corrente flua no sentido desejado. A corrente flui pelo transformador de pulsos, que é responsável por aumentar a tensão para o nível desejado na saída (127V ou 220V rms). Ao fazer a corrente passar pelo transformador de pulsos, o transformador age como um integrador, o que gera uma onda senoidal na saída do transformador. A Figura 4.7 apresenta o inversor usado no sistema, e os sinais aplicados aos pares de transistores. A Figura 4.8 mostra a onda senoidal de 60Hz obtida na saída do inversor.

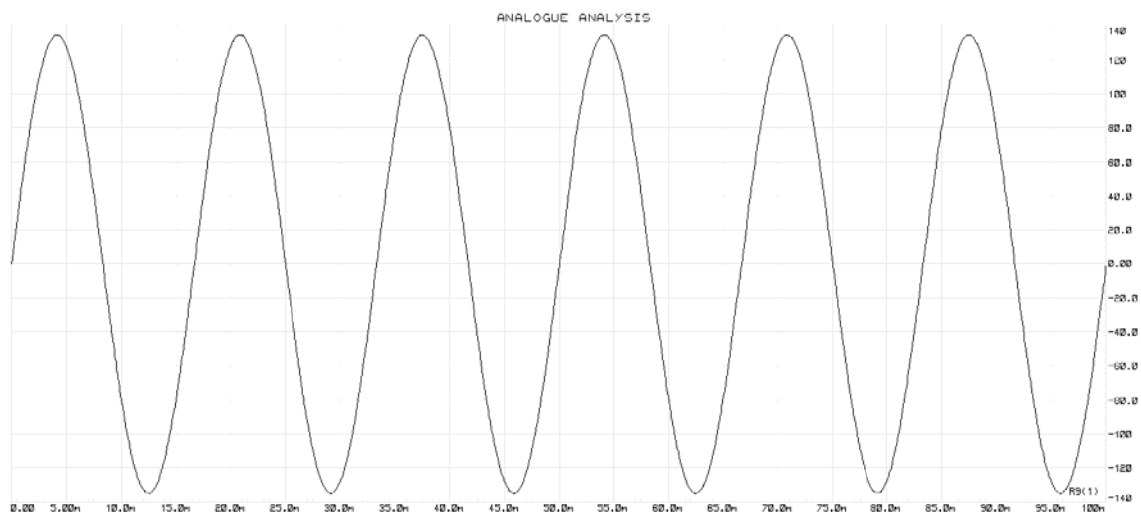
A Figura 4.9 mostra o circuito completo do sistema, incluindo todos os circuitos descritos anteriormente. Na configuração mostrada, o tempo morto entre as comutações está desabilitado, pois o *port* 1.6 está conectado à tensão de alimentação.

Figura 4.7 – Inversor em Ponte



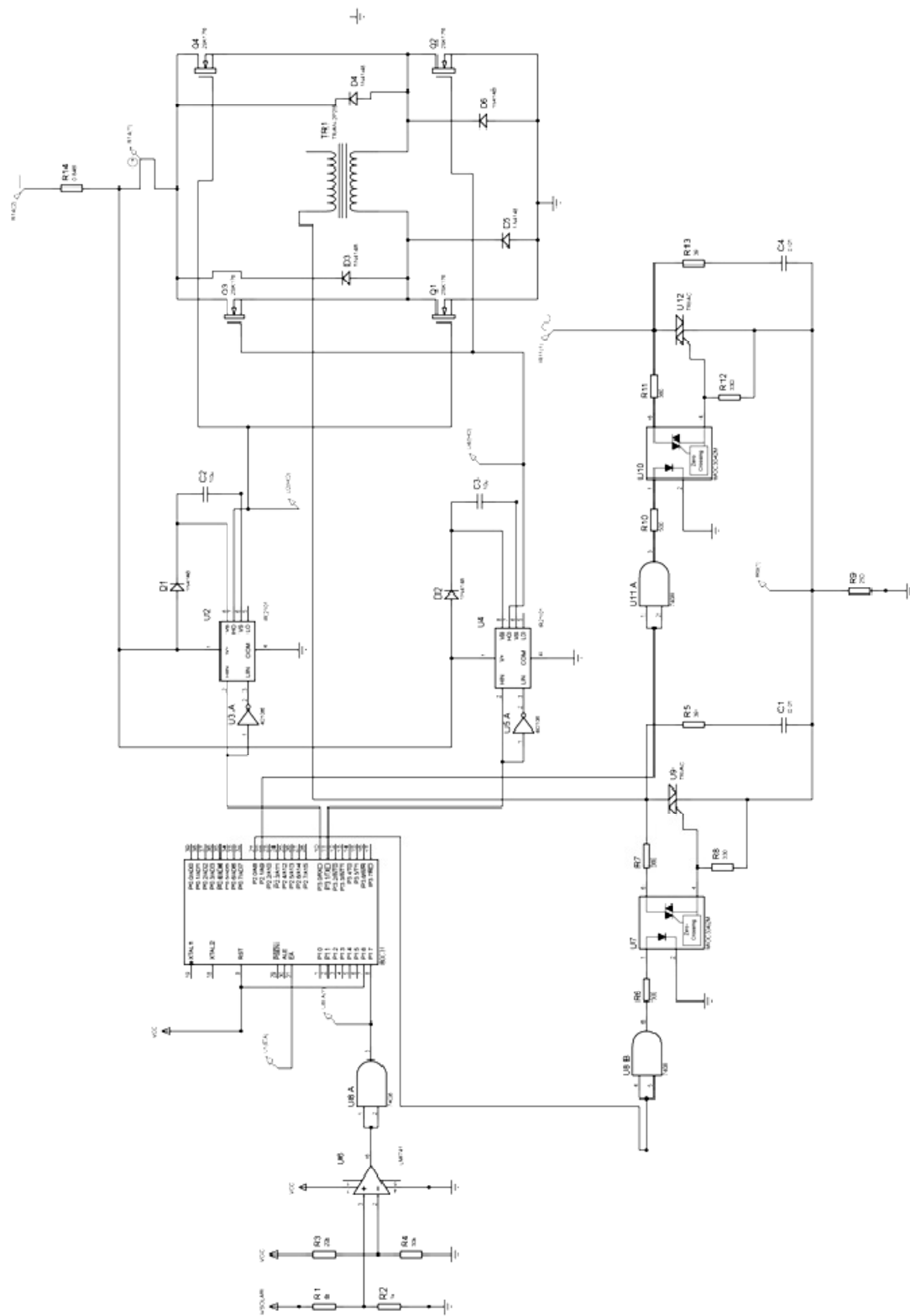
Fonte: (AUTOR)

Figura 4.8 - Forma de onda obtida na saída do inversor



Fonte: (AUTOR)

Figura 4.9 - Circuito completo do sistema



Fonte: (AUTOR)

5 CONCLUSÃO

Este trabalho apresenta um sistema eletrônico comutador temporizado, que permite que equipamentos comerciais que não sejam prejudicados por interrupções curtas no fornecimento de energia façam uso de um painel fotovoltaico como fonte de energia alternativa, que geralmente não proporcionam energia continuamente. A comutação é feita automaticamente em caso de baixa incidência de luz solar, e sem qualquer forma de armazenamento de energia. Também apresentou um estudo de painéis fotovoltaicos e de fontes de alimentação não lineares de corrente contínua, e propôs um sistema de alimentação por fontes alternativas de energia controlado por microcontrolador, usando um inversor em ponte H controlado através de sinais PWM.

Constatou-se que painéis constituídos de silício monocristalino obtêm desempenho superior às demais tecnologias, mas também é a alternativa mais cara, e outras tecnologias recentemente têm reduzido custos, assim permitindo alternativas viáveis, como o silício amorfo ou policristalino, sendo que esta última é a tecnologia que domina a maior parte do mercado.

Através de simulações por *software*, foi testado o sistema proposto no trabalho, capaz de alimentar cargas monofásicas intermitentes. Foi projetado um circuito eletrônico utilizando microcontrolador, programado em linguagem *Assembly*, que atuou no controle das chaves de alimentação e no controle PWM do inversor. As simulações indicam que o projeto desenvolvido neste trabalho pode ser testado num protótipo, em condições reais de funcionamento, desde que considerado o dimensionamento dos componentes, as características do painel fotovoltaico a ser usado, e da carga envolvida no projeto. Devido ao longo tempo de simulação e poder computacional necessário para simular uma comutação completa entre as fontes, não foi documentada ambas as comutações possíveis deste sistema.

O projeto pode ser desenvolvido futuramente de diversas maneiras, adaptando o inversor de alimentação e modificando o tamanho dos componentes usados para atender carga de maior potência, modificando o circuito para trabalhar com cargas trifásicas, ou ainda, adaptar o sistema para a alimentação de motores, através de uso de técnicas de partidas suaves de motores.

REFERÊNCIAS

BULLIS, Kevin. **Technology review More-Powerful solar cells**. MIT. Disponível em: <<http://www.technologyreview.com/energy/20476/>>. Acesso em: 10 dez. 2014.

CARVALHO, E.P. **Uma nova abordagem no rastreamento de ponto de máxima potência em painéis fotovoltaicos**. 2012. 138f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Universidade de Taubaté. Taubaté, 2012

COWIE, C.J. **Power inverter**. Disponível em: <http://en.wikipedia.org/wiki/Power_inverter>. Acesso em 18 jul. 2014

CRESESB (Org.). **Tutorial de Energia Solar – Princípios e Aplicações**. CRESESB, 2006. Disponível em: < [http://www.cresesb.cepel.br/index.php?link=/tutorial/tutorial_solar .htm](http://www.cresesb.cepel.br/index.php?link=/tutorial/tutorial_solar.htm)>. Acesso em 10 ago. 2014.

ELERT, G. Photoelectric Effect. IN: __ **The Physics Hypertextbook**. Disponível em: <<http://physics.info/photoelectric/>>. Acesso em: 18 jul. 2013.

FALCÃO, V. D. **Fabricação de células solares de CDS/CDTE**. 2005. 120f. Dissertação de Mestrado em Ciências dos Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2005.

FRAUNHOFER ISE. **Photovoltaics Report**. Disponível em: < <http://www.ise.fraunhofer.de/en/downloads-englisch/pdf-files-englisch/photovoltaics-report-slides.pdf> >. Acesso em: 10/12/2014.

FROMHOLD, A. T.. **Quantum Mechanics for Applied Physics and Engineering**. Courier Dover Publications, 1991. 448f.

GEVORKIAN, P. **Sustainable Energy Systems Engineering: The Complete Green Building Design Resource**. McGraw Hill Professional, 2007. 568f.

HECHT, J. **Photonic frontiers: next-generation photovoltaics: new techniques Boost photovoltaic efficiency**. Laser Focus World, jan.2010. Disponível em:

<<http://www.laserfocusworld.com/articles/2010/08/photonic-frontiers.html>> Acesso em: 10 ago. 2014.

KYOCERA. **KD250GH-4FB2 Datasheet**. 2014. Disponível em: <<http://crocsolar.com.au/wp-content/uploads/2013/11/KD250GH-4FB2.pdf>>. – Acesso em 10 ago.2014.

LUQUE, A. HEGEDUS, S. **Handbook of photovoltaic science and engineering**. Instituto de Energía Solar, Universidade Politécnica de Madri. Madri: Wiley, 2. ed., 2011.

MARCELINO, M.A, PRADO, P. P. L.. **Sistema Comutador Temporizado de Energias Alternativas para Cargas Intermitentes (PI 1101546-2)**. Revista da Propriedade Industrial, v. 2275, p. 74--, 2014.

MARCELINO, M.A. **Controle de Velocidade de Motor de Indução Trifásico Usando Geração PWM Discreta, Otimizada e Sincronizada**. 1998. 68f. – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 1998.

MILLIKAN, R.. A Direct Photoelectric Determination of Planck's "h". In:____. **Physical Review**. Universidade de Chicago, 1916. Página 355 a 388. Disponível em: <http://www.fisica.net/quantica/millikan_a_direct_photoelectric_determination_of_plancks_h.pdf> Acesso em: 18 jul. 2014.

MINHA CASA SOLAR. **Painel Solar Fotovoltaico Policristalino de 250W Kyocera Solar**. Disponível em: <<http://minhacasasolar.lojavirtualfc.com.br/prod,IDLoja,14743,IDProduto,4467157,painel-solar-fotovoltaico-painel-de-205w-a-260w-painel-solar-fotovoltaico-policristalino-de-250w-kyocera-solar---kd250gh-4fb2>>. Acesso em 08.ago.2014

MOTOROLA. **6-pin Dip Zero-cross Optoisolators Triac Driver Output (400 Volts Peak)**. 1995. Disponível em: <<http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet/motorola/MOC3042.pdf>>. – Acesso em 10 ago.2014.

NASSABAY, A. **Geração de Energia Fotovoltaica Para Cargas Pontuais em Residências**. 2011. 92 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de

Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

NEOSOLAR. **Painel Solar Fotovoltaico Yingli YL140P-17b (140Wp)**. Disponível em: <<http://www.neosolar.com.br/loja/painel-solar-fotovoltaico-yingli-yl140p-17b-140wp.html>>. Acesso em 10 ago.2014 .

PACHECO, J.P.. **Otimização da energia gerada por painéis solares fotovoltaicos em sistemas isolados da rede elétrica**. 2009. 150f. Dissertação de Mestrado em Informática Industrial. Programa de Pós- graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2009. Disponível em: <http://www.files.dirppg.ct.utfpr.edu.br/cpgei/miscellaneous/imapp/2009/CPGEI_MAPP_2009_Pacheco.pdf>. Acesso em: 12 ago. 2014.

PARTAIN, L. D. **Solar Cells and Their Applications**. Palo Alto: John Wiloey & Sons, Inc., 1995. 566 p. (Wiley Series in MicroWave and Optical Engineering).

RASHID, M. H. **Eletrônica de potência: circuitos, dispositivos e aplicações**. São Paulo, Makron, 1999. 884 p.

SALAS,V. et al. **Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems**. Solar Energy Materials & Solar Cells, Elsevier, 2006. Volume 90.

SAVAGE, N. **Solar cell breaks efficiency record**. IEEE Spectrum, ago.2011. Disponível em:<<http://spectrum.ieee.org/green-tech/solar/solar-cell-breaks-efficiency-record>>. Acesso em: 21.jul. 2014.

SERWAY, R. A.. **Physics for Scientists & Engineers**. 3º Edição. Saunders, 1990. p. 1150.

SOLARTERRA. **Painel Solar Fotovoltaico 135Wp**. Disponível em: <http://solarterra.com.br/cart?page=shop.product_details&flypage=flypage.tpl&product_id=41&category_id=6>. Acesso em 08.ago.2014

SOUZA, A.R. **PWM discreto para controle de velocidade com tabelas pré-programadas reduzidas** . 2011. 78f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade de Taubaté, São Paulo, 2011.

TER-GAZARIAN, A.. **Energy Storage for Power Systems**. Stevenage: Peter Peregrinus Ltd., 1994.

UNIVERSIDADE TÉCNICA DE LISBOA. **Breve histórico da energia solar**. Disponível em: <<http://web.ist.utl.pt/palmira/solar.html>>. Acesso em 18.jul.2014.

VALLÊRA, A; BRITO, M.C. **Meio Século de Historia Fotovoltaica**. Disponível em: <<http://solar.fc.ul.pt/gazeta2006.pdf>>. Acesso em 18.jul.2014.

WIKIPEDIA(ORG). **Solar Cell**. Disponível em: <http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_cell>. Acesso em 18.jul.2014

ANEXO A- Programa em C responsável pela tabela do inversor

Código fonte

Este é o código fonte usado para o programa que escreve a tabela usada pelo microprocessador que ativa o inversor. O programa foi originalmente escrito por Marcio Abud Marcelino para discretizar a saída para um sistema trifásico, e foi adaptado para os propósitos deste trabalho. A listagem gerada no arquivo ASCII de saída deve ser copiado para o código *Assembly* do microcontrolador.

```
#include "stdio.h"
#include "stdlib.h"
#include "conio.h"
// #include "memory.h"
#include "math.h"

/* Programa GERPWM: Gera sequencia PWM monofasica
   Original criado por Marcio Abud Marcelino em 13/05/1997
   Modificado por Rômulo Fernandes da Costa em 13/08/2014

   este programa gera uma tabela pwm, que será usada para controlar
   dois pares de transistores em um inversor monofásico.
*/

#define pi 3.141592654

double triangular(double radianos){ //gera uma onda triangular de amplitude 1 e
//período 2pi
    double angulo = radianos-2*pi*floor(radianos/(2*pi)); //joga o radianos pra
//baixo, entre 0 e 2pi
    double saida=0;
    if(angulo<pi/2){ //primeiro segmento de reta, angulo entre 0 e
//pi/2
        saida = angulo/(pi/2);
    }else if (angulo<3*pi/2){ //segundo e terceiro segmentos de reta, angulo entre
//pi/2 a 3*pi/2
        saida = 1-2*(angulo-pi/2)/(pi);
    }else{ //ultimo segmento de reta, angulo
//maior que 3*pi/2
        saida = -1+(angulo-3*pi/2)/(pi/2);
    }
    return (saida);
}

void main()
{
//variaveis e valores iniciais
int i,ii,j,jj,k=21,kk,l,l1,m,n,nn,cs=22,limit=0,cc,cc1;
char a[5000],b[5000],arq[15],s;
float fn=60,ts=1e-6,fo,fs,fa=60;
float arg,der,r,fse[5000],ftr[5000];
FILE *fp1;

ts=cs*1e-6;
//clrscr(); //limpa a tela */
system("cls");
printf(" Gerador de sequencias PWM trifasicas\n\n");
printf("freq. nominal do motor:fn=%f Hz tempo de leitura da tabela:ts=%f\n",fn,ts);
printf("freq.alvo de operacao:fa=%f Hz numero de pulsos/per.de fa:k=%d\n",fa,k);
printf("Deseja alterar as constantes? s/n:");
```

```

s=getche();
if(s == 's')
{
printf("\nEntre com as constantes:\n");
printf("fn,cs(ts=cs*1e-6),fa,k(divisivel por 3) :");
scanf("%f,%d,%f,%d",&fn,&cs,&fa,&k);
printf("O movimento e reverso? s/n: ");
s = getche();
if(s == 's') limit = 1;
ts=cs*1e-6;
printf("\nfreq. nominal do motor:fn=%f Hz    tempo de leitura da
tabela:ts=%f\n",fn,ts);
printf("freq.alvo de operacao:fa=%f Hz    numero de pulsos/per.de
fa:k=%d\n",fa,k);
}
r=220/fn;    /* razão V/F, 220/60 em condições comuns */
loop1:
arg=1/(fa*k*ts);
printf("\nnumero de amostras da portadora (triangular)=%f\n",arg);
printf("este numero deve ser inteiro e divisivel por 4\n");
kk=(int)(4*floor(arg/4));    //numero de amostras por periodo da
portadora, arredondado para multiplo de 4
printf("aproximando numero para:%d \n",kk);
//printf("Entre com o numero inteiro divisivel por 4 mais proximo: ");
//scanf("%d",&kk);
fo=1/(kk*k*ts);
m=k*kk;    //numero total de
//amostras da tabela.
if(m > 5000)
{
printf("\nO tamanho da tabela ficou maior que 5000, aumente o ts= ");
scanf("%f",&ts);
goto loop1;
}/* tamanho das tabelas, que tem que ser divisivel por 4 e 3 */
fs=fo;
printf("freq.alvo: fa=%f Hzfreq.real: fo=%f\n",fa,fo);
printf("\nnumero inteiro de amostras da portadora (triangular)=%d\n",kk);
printf("tamanho da tabela(e' divisivel por 4 e 3)=%d\n",m);
printf("produto V/F: 220/fn =%f\n",r);
printf("Deseja alterar o indice de modulacao para o 'start'? ");
s=getche();
if(s == 's')
{
printf("\nEntre com a freq. cuja amplitude V/F deseja fazer o 'start': fs= ");
scanf("%f",&fs);
}
arg = 2*pi/m;    //incremento de
//angulo
der = 220./(kk/4.);    //inclinação da
reta = 220/amostras por periodo da portadora
//printf("\ncoef. angular triang.=%f \n",der);
//cria onda senoidal e triangular, com m amostras, e faz as comparações
for(i=0;i<m;i++){
//o produto r*fs deverá ser igual a 220 em condicoes padrao
fse[i] = r*fs*sin(arg*i);    //senoide
ftr[i] = 220*triangular(k*arg*i); //triangular
if(fse[i]>0){ //onda modulante esta na fase positiva
b[i]=0;    //mantem 'b' desligado
if(fse[i] > ftr[i]) { //se a senoide for maior do que a onda triangular,
//liga a saida a
a[i]=1;
}else{
a[i]=0;
}
}else{ //onda modulante esta na fase negativa

```

```

        a[i]=0;                //mantem 'a' desligado
        if(-fse[i] > ftr[i]) { //se o negativo da senoide for maior que a onda
//triangular, liga a saida b
            b[i]=1;
        }else{
            b[i]=0;
        }
    }
}
//sobrescreve em 'a' os valores de cada bit de a,b, assim juntando as variaveis
//a e b. A palavra final é escrita na ordem ab(reverso) ou ba(padrao).
if(limit == 1)
    { //reverso
    for(i=0;i<m;i++)
        {
        n = 0;
        if(a[i] == 1) n = 2;
        if(b[i] == 1) n = n | 1;
        a[i] = n;
        printf("%x ",n);
        }
    }
else
    { //padrao
    for(i=0;i<m;i++)
        {
        n = 0;
        if(b[i] == 1) n = 2;
        if(a[i] == 1) n = n | 1;
        a[i] = n;
        printf("%x ",n);
        }
    }
s=getche(); ///pausa depois de salvar tabela
//geração de arquivo de tabela ASCII
printf("\nDeseja gerar arquivo ASCII? s/n: ");
s = getche();
if(s == 's')
    {
    printf("\nEntre com o nome do arquivo .tab: ");
    scanf("%s",arq);
    if((fp1 = fopen(arq,"wt")) == NULL)
        {
        printf("nao pode abrir arquivo\n");exit(0);
        }
    fprintf(fp1,"fn=%f  fa=%f  fo=%f  k=%d\n",fn,fa,fo,k);
    fprintf(fp1,"num.de amostras da portadora =%d  indice de
mod.:220/fn=%f\n",kk,r);
    fprintf(fp1,"tamanho da tabela divisivel por 4 e 3=%d\n",m);
    fprintf(fp1,"tempo de leitura da tabela:ts=%f\n",ts);
    if(fs == fo) fprintf(fp1,"indice de modulacao e'dado por V/F \n\n");
    else fprintf(fp1,"indice de modulacao alterado para o 'start' na amplitude de %f
Hz \n\n",fs);
    for(i=0;i<m;i++) fprintf(fp1,"a[%d]=%d;\n",i,a[i]);
        fprintf(fp1,"\n;aqui começa o sinal pwm em assembly\n");
        for(i=0;i<m;i++) fprintf(fp1,"DB %dH\n",a[i]);
        fclose(fp1);
    }
printf("\nDeseja gerar arquivo pwm? s/n: ");
s = getche();
if(s == 's')
    {
    printf("\nEntre com o nome do arquivo .asm: ");
    scanf("%s",arq);
    if((fp1 = fopen(arq,"wt")) == NULL)

```

```

    {
        printf("nao pode abrir arquivo\n");exit(0);
    }
j=0;jj=0;
limit=((2*256)/cs)-1;
if(cs<100)
{
    k=0;n=0;
    for(i=0;i<m;i++)
    {
        nn=0;
        if(j==0) fprintf(fp1,"    DB    ");
        j=j++;
        kk=1;
        cc=a[i];
        for(ii=1;ii<limit && i<m;ii++)
        {
            if(a[ii]==cc)
            {
                kk=kk++;
                i=i++;
            }
            else ii=limit+1;
        }
        l=kk*cs;
        if(l<=87)
        {
            if(k==0)
            {
                if(n==1) fprintf(fp1,"erro 3 int. rap.");
                cc=cc | 64; /* primeira int. rapida bit6=1 */
                k=1;
            }
            else
            {
                cc=cc | 32; /* 2 int. rapidas consec. */
                k=0;n=1; /* bit5=1 */
            }
        }
        else
        {
            n=0;
            k=0;
        }
        if(l >= 256)
        {
            nn=1;
            l1 = l - cs*limit/2;
            l = cs*limit/2;
            if(l1 >= 255) fprintf(fp1,"maior 2*255miseseg");
            for(;l1 <= 87;)
            {
                l = l - cs;
                l1 = l1 + cs;
            }
        }
        cc1 = cc;
        if(i==m-1)
        {
            cc1=cc | 128; /* bit7 = 1 */
            j=8;
        }
        if(nn==1)
        {
            fprintf(fp1,"%d,%d",cc,(256-l1));
        }
    }
}

```

```

        if(j==8)
        {
            fprintf(fp1, "\n      DB      ");
            j=0;
        }
        else fprintf(fp1, ",");
        j=j++;
    }
    fprintf(fp1, "%d,%d", cc1, (256-1));
    if(j==8)
    {
        fprintf(fp1, "\n");
        j=0;
    }
    else fprintf(fp1, ",");
}
else
{
    for(i=0; i<m; i++) /* p/ cs>=100 (5 e 10 Hz) */
    {
        if(j==0) fprintf(fp1, "      DB      ");
        j=j++;
        cc=a[i];
        if(i==m-1)
        {
            cc = cc | 128; /* bit7 = 1 */
            j=8;
        }
        fprintf(fp1, "%d,%d", cc, (256-cs));
        if(j==8)
        {
            fprintf(fp1, "\n");
            j=0;
        }
        else fprintf(fp1, ",");
    }
}
fclose(fp1);
}
}

```

ANEXO B - Programa em Assembly para o microcontrolador

```

;*****
; Programa para controle do sistema de alimentação de cargas através de painel solar
; Programa Original Desenvolvido por Alice Reis de Souza em 11/11/2011
; Modificado por Rômulo Fernandes da Costa em 20/10/2014
;*****
***
;***** Tabela de Macros *****
;* TABELA DE EQUIVALÊNCIA *
;*****

$NOMOD51
$INCLUDE (8051.MCU)

SEL EQU 40H ;parte alta do Timer
SEL1 EQU 41H ;parte baixa do Timer
PTH EQU 42H ;Define PTH como 42H
PTL EQU 43H ;Define PTH como 43H
CLKREG EQU 8FH ;Endereço de ativação do modo 2 para frequência do Mc

;***** Programa Principal*****
;* PARAMETRIZAÇÃO PRINCIPAL DO PROGRAMA *
;*****
****

ORG 0000H ;carrega programa na posição 0
MOV P3,#000H ;inicia P3
MOV P2,#000H ;inicia P2
;MOV P1,#0FFH ;inicia P1
LJMP INICIO
ORG 000BH
MOV TH0, #3CH ;Carrega o Timer0 para Interrupção com o valor
MOV TL0, #0FAH ;de 1ms
LJMP INT_TMR0
ORG 001BH
MOV CLKREG, #00H
MOV TH1,SEL1 ;Carrega o Timer1 para Interrupção com o valor dos
MOV TL1,SEL ;ports P1.0 a P1.3
LJMP INT_TMR1
ORG 0050H

INICIO:
JB P1.7,INICIO_INVERSOR ;Verifica se há tensão suficiente para usar inversor
LJMP INICIO_REDE

INICIO_INVERSOR:
MOV P2,#000H ;Desliga ambas as saídas de potência
CALL DELAY ;Vai para a subrotina de delay
MOV TMOD,#11H ;Configura T0 e T1 contagem com 16 bits
MOV TCON,#00H ;Configura TCON
MOV R2,#0 ;Determina item da Tabela
MOV R3,#0 ;Determina início da senóide
MOV TH0, #3CH ;Estabelece Interrupção
MOV TL0, #0FAH
MOV TH1,#0FBH ;Estabelece início da interrupção
MOV TL1,#0DDH
MOV CLKREG, #00H
MOV SP,#60H
MOV IP, 02H
SETB EA ;Habilita as Interrupções (Seta o valor EA para 1)
SETB ET1 ;Habilita Interrupção do Timer1
SETB TR1 ;Inicia a interrupção
MOV P2,#001H ;Habilita inversor

LOOP_INVERSOR: ;Loop para o inversor
CARREGA1:
CJNE R3,#0, CARREGA2 ;pula pra 2º parte da tabela se nao for 0
MOV DPTR,#FR_60_1 ;Carrega o registrador de data 16bits DPTR com os dados da Tabela 1
MOV PTH,DPH ;de 60Hz
MOV PTL,DPL
MOV SEL1, #0FFH
MOV SEL, #0FFH
LJMP LOOP_INVERSOR

CARREGA2:

```

```

CJNE R3,#1, CARREGA3 ;pula pra 3º parte da tabela se nao for 1
MOV DPTR,#FR_60_2 ;Carrega o registrador de data 16bits DPTR com os dados da Tabela 2
MOV PTH,DPH ;de 60Hz
MOV PTL,DPL
MOV SEL1, #0FFH
MOV SEL, #0FFH
LJMP LOOP_INVERSOR

CARREGA3:
CJNE R3,#2, CARREGA1 ;pula pra 1º parte da tabela se nao for 2
MOV DPTR,#FR_60_3 ;Carrega o registrador de data 16bits DPTR com os dados da Tabela 3
MOV PTH,DPH ;de 60Hz
MOV PTL,DPL
MOV SEL1, #0FFH
MOV SEL, #0FFH
LJMP LOOP_INVERSOR

INICIO_REDE:
MOV P2,#000H ;Desliga ambas as saídas de potência
CALL DELAY ;Vai para a subrotina de delay
MOV P2,#002H ;Habilita a saída da rede

LOOP_REDE:
JB P1.7,INICIO_INVERSOR ;Verifica se há tensão suficiente para usar inversor
LJMP LOOP_REDE

DELAY:
JB P1.6,DELAYEXIT ;Se há tensão no bit P1.6, não há delay de 5 segundos.
MOV TMOD,#11H ;Configura T0 e T1 contagem com 16 bits
MOV TCON,#00H ;Configura TCON
MOV R2,#0 ;Determina item da Tabela
MOV R3,#4 ;Determina condição de delay de 5 segundos
MOV TH0, #3CH ;Estabelece Interrupção
MOV TL0, #0FAH
MOV TH1,#000H ;Estabelece início da interrupção
MOV TL1,#000H
MOV CLKREG, #00H
MOV SP,#60H
MOV IP, 02H
SETB EA ;Habilita as Interrupções (Seta o valor EA para 1)
SETB ET1 ;Habilita Interrupção do Timer1
SETB TR1 ;Inicia a interrupção
;;inicio do loop
MOV A,#0
DELAYLOOP1:
MOV R3,#4
DELAYLOOP:
CJNE R3,#0,DELAYLOOP ;Fica no loop até R3=0
INC A
CJNE A,#77,DELAYLOOP1 ;Fica no loop até R3=0
DELAYEXIT:
RET

; ***** TRATAMENTO DA INTERRUPTÃO DO TIMER 1 *****
; *
; *****
*****
INT_TMR1:
PUSH ACC
PUSH PSW
PUSH DPL
PUSH DPH
JMP LOOPB

INT_TMR0:
PUSH ACC
PUSH PSW
PUSH DPL
PUSH DPH

LOOPB:
CJNE R3,#4,CARREGA_TABELA ;Verifica se foi uma chamada do inversor ou do delay de 5 segundos
;;procedimento caso seja interrupt de delay 5 segundos
MOV R3,#0
POP DPH
POP DPL
POP PSW

```

```

POP ACC
RETI
;;fim do interrupt 5 segundos

CARREGA_TABELA:
MOV A,R2          ;Pega o próximo elemento da tabela.
MOV DPH,PTH
MOV DPL,PTL
MOVC A,@A + DPTR

MOV P3,A          ;Carrega P3 com A
AJ_R2:
CJNE R2,#251,INC_R2 ;Verifica se é o último elemento da Tabela
MOV R2,#0
CJNE R3,#2,INC_R3  ;Verifica se chegou em 360°
MOV R3,#0
POP DPH
POP DPL
POP PSW
POP ACC
RETI

INC_R3:
INC R3
POP DPH
POP DPL
POP PSW
POP ACC
RETI

INC_R2:
INC R2
POP DPH
POP DPL
POP PSW
POP ACC
RETI

;*****TABELAS PRÉ-PROGRAMADAS*****
;*****
; os valores desta tabela são adquiridos por meio do programa do anexo I

```

Atenção: as linhas a seguir foram posicionadas em colunas, de maneira a diminuir o espaço ocupado pela tabela.

```

FR_60_1:           DB 1H           DB 1H
    ;aqui começa o sinal DB 1H           DB 1H
pwm em assembly   DB 1H           DB 1H
DB 0H            DB 1H           DB 1H
DB 0H            DB 1H           DB 1H
DB 0H            DB 1H           DB 1H
DB 0H            DB 1H           DB 1H
DB 0H            DB 1H           DB 1H
DB 0H            DB 1H           DB 1H
DB 0H            DB 1H           DB 1H
DB 0H            DB 1H           DB 1H
DB 0H            DB 1H           DB 1H
DB 0H            DB 1H           DB 1H
DB 0H            DB 1H           DB 1H
DB 0H            DB 1H           DB 1H
DB 0H            DB 0H           DB 1H
DB 0H            DB 0H           DB 1H
DB 0H            DB 0H           DB 1H
DB 0H            DB 0H           DB 1H
DB 0H            DB 0H           DB 1H
DB 0H            DB 0H           DB 1H
DB 1H            DB 0H           DB 1H
DB 1H            DB 0H           DB 1H
DB 1H            DB 0H           DB 1H
DB 1H            DB 0H           DB 1H
DB 1H            DB 0H           DB 1H
DB 1H            DB 1H           DB 0H
DB 1H            DB 1H           DB 0H
DB 1H            DB 1H           DB 0H
DB 1H            DB 1H           DB 0H

```