

@UNESP - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"
Faculdade de Engenharia-Campus de Guaratinguetá



GERAÇÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA PARA CARGAS

PONTUAIS EM RESIDÊNCIAS

Novembro de 2011

UNESP – UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE GUARATINGUETÁ

Trabalho de Graduação
Departamento de Engenharia Elétrica

**Geração de Energia Fotovoltaica para Cargas Pontuais
em Residências**

Aluno: Alexandre Nunes de Souza Nassabay

Orientador: Prof. Dr. Márcio Abud Marcelino

Guaratinguetá, 2011

ALEXANDRE NUNES DE SOUZA NASSABAY

GERAÇÃO DE ENERGIA FOTOVOLTÁICA PARA CARGAS PONTUAIS EM
RESIDÊNCIAS

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

2011

N26 Nassabay, Alexandre Nunes de Souza
5g Geração de energia fotovoltaica para cargas pontuais em residências /
Alexandre Nunes de Souza Nassabay – Guaratinguetá : [s.n], 2011.
92 f : il.

Bibliografia: f. 90-92

Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica – Universidade
Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2011.

Orientador: Prof. Dr. Marcio Abud Marcelino

1. Energia solar 2. Geração de energia fotovoltaica I. Título

CDU 620.91



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá

**GERAÇÃO DE ENERGIA FOTOVOLTÁICA PARA CARGAS PONTUAIS
EM RESIDÊNCIAS**

ALEXANDRE NUNES DE SOUZA NASSABAY

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

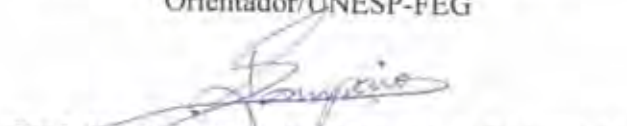
APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO
DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Prof. Dr. Samuel Euzédice de Lucena
Coordenador

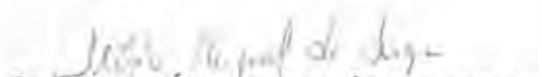
BANCA EXAMINADORA:



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



Prof. Dr. DANIEL JULIEN B. DA S. SAMPAIO
UNESP-FEG



Prof. Dr. TEÓFILO MIGUÉL DE SOUZA
UNESP/FEG

Dezembro de 2011

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao apoio incondicional de meus pais, Samir e Maristela, bem como por todo o sacrifício que fizeram por mim. À minha irmã Isabella em quem busco forças para ir adiante. Ao meu tio Élcio e à minha tia Wanda por todo o suporte dado para seguir meu curso.

Em especial á professora Maria Cecília Zanardi, da FEG, e aos professores Marcelo Lopes de Oliveira e Souza e Renato Magalhães de Oliveira, do INPE, por me desenvolver meu interesse por energia solar.

Aos moradores da República APAE, pelo suporte e por tanto terem me ajudado a crescer. A todos os meus outros amigos por terem me ajudado a me tornar quem sou.

Aos meus mestres, por sempre terem me forçado a trilhar
o caminho da excelência.

“Nossa ignorância só não é maior que nossa arrogância.”

– Autor Desconhecido

Nassabay, A. **Geração de Energia Fotovoltaica para Cargas Pontuais em Residências.** 2011. XX f. Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá.

RESUMO

O presente trabalho, baseado no pedido de patente feito junto ao INPI, protocolo nº 020110035974, apresenta o desenvolvimento de um sistema utilizando painéis solares, para atender a demanda de eletricidade gerada por cargas pontuais, sem unidade de armazenamento ou sincronismo com a rede elétrica, através de circuito de controle para utilização em conjunto com a rede de energia elétrica durante os períodos de baixa incidência de luz solar. Um estudo sobre a construção de painéis solares e de topologias usadas em geração elétrica foi feito, buscando analisar os impactos sobre o projeto. O desenvolvimento se foi de forma modular, permitindo uma expansão não só de capacidade de potência, mas de diversidade de cargas, buscando reduzir o total requisitado pelo setor residencial durante o dia.

PALAVRAS-CHAVE: Energia Solar. Energia Fotovoltaica. Pannel Solar. Geração Pontual. Sistemas Isolados.

Nassabay, A. **Photovoltaic Power Generation to Supply Residential Punctual Loads.** 2009. XX f. Monograph (Graduation in Electrical Engineering) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá.

ABSTRACT

This work, based in a patent request at INPI, protocol no. 020110035974, presents a system development using solar panels to supply the electricity demand required by punctual loads, without a storage unit or utility grid synchronism, through a control circuit that allows parallel operation with the power grid during low sunlight incidence periods. A study about solar panel construction and topologies for Power generation was done, in a attempt to evalute impacts in project. This development was modular, providing the system the possibility of power capacity expansion and load diversity as well, in an attempt to reduce the total energy requirements from the residential sector drained from the power grid along the day.

KEY-WORDS: Solar Power. Photovoltaic Energy. Solar Panels. Off-grid Generation. Off-grid Systems.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Diagrama de Blocos do sistema.....	21
Figura 1.2: Diagrama do sistema da patente	21
Figura 2.1: Oscilador a centelhador usado por Hertz em seus experimentos.....	23
Figura 2.2: Válvula fotoelétrica.....	27
Figura 2.3: Esquema do experimento de Millikan sobre o efeito fotoelétrico	27
Figura 2.4: Excerto da patente da célula fotoelétrica de Chapin, Fuller e Pearson.....	29
Figura 2.5: Painel solar com a tecnologia de Fuller.....	29
Figura 2.6: Evolução das eficiências dos painéis solares de diversas tecnologias.....	32
Figura 2.7: Evolução da manufatura das células de silício	33
Figura 2.8: Método da fusão por zonas de crescimento de lingotes.....	34
Figura 2.9: Método Czochralski de crescimento de lingotes.....	34
Figura 2.10: Células de silício cristalino	35
Figura 2.11: Células de silício amorfo	38
Figura 2.12: Célula de Telureto de Cádmio.....	39
Figura 2.13: Célula CIGS flexível	40
Figura 2.14: Processo de co-evaporação para uma célula CIS.....	41
Figura 2.15: Corte de uma célula de filme fino policristalina.....	41
Figura 2.16: Elementos usados na composição de uma célula CdS/I-III-IV	42
Figura 2.17: Aspecto visual de células Grätzel.....	43
Figura 2.18: Célula orgânica	43
Figura 2.19: Sensibilidade do olho humano e de junções de Silício contrastadas contra o espectro solar	44
Figura 2.20: Variação do espectro solar conforme a luz atravessa a atmosfera.....	45
Figura 2.21: Estrutura de uma célula em pilha de GaAs/GaSb	47
Figura 2.22: Células empilhadas associadas para casar suas tensões.....	47
Figura 2.23: Célula com três junções.....	48

Figura 2.24: Estrutura de um módulo fotovoltaico	49
Figura 2.25: Módulos com concentradores	50
Figura 2.26: Célula translúcida de filme fino	51
Figura 2.27: Integração arquitetônica de módulos fotovoltaicos	52
Figura 2.28: Diodo <i>bypass</i>	52
Figura 3.1: Sistema de geração isolado	54
Figura 3.2: Complexo Waldpolenz, Brandis, Alemanha	55
Figura 3.3: Equipamentos típicos de um sistema interligado á rede de distribuição	56
Figura 4.1: Curvas características de um painel solar	58
Figura 4.2: Circuitos equivalentes de um painel solar	59
Figura 4.3: Variação nas curvas características de um painel em função da insolação e da temperatura	61
Figura 4.4: Funcionamento de um conversor Buck	62
Figura 4.5: Conversor Buck – Tensões e Correntes	64
Figura 4.6: Resposta a transientes de corrente	65
Figura 4.7: Diagrama de um conversor Boost	68
Figura 4.8: Tensões e correntes típicas de um conversor Boost	68
Figura 4.9: Controle Boost via multiplicador	73
Figura 4.10: Inversor monofásico de ponte completa	74
Figura 4.11: Conexão equivalente à chave de transferência	75
Figura 4.12: Circuito de força com chave reversora	76
Figura 4.13: Chave reversora com contadores intertravados	76
Figura 4.14: Chave de transferência estática	78
Figura 5.1: Forma de onda do sinal PWM	82
Figura 5.2: Conexão dos TRIACS	83
Figura 5.3: Circuito de habilitação dos TRIACS	84
Figura 5.4: Circuito <i>driver</i> dos TRIACS	84
Figura 5.5: Mapas de incidência solar no Brasil	86
Figura 6.1: Execução do circuito proposto	87

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

IBGE.....	Instituto Nacional de Geografia e Estatística
ANEEL.....	Agência Nacional de Energia Elétrica
ONS.....	Operador Nacional do Sistema (Elétrico)
BSF	<i>“Back Surface Field”</i>
c-Si	Silício monocristalino
CZ.....	processo Czochalski
FZ.....	processo de Fusão por Zonas
MCZ.....	processo de Fusão por Confinamento Magnético
p-Si	Silício policristalino
a-Si	Silício amorfo
PECVD	<i>“Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition”</i> – Deposição Química por Vaporização Intensificada à Plasma
GD	<i>“Glow Discharge”</i> – Deposição por Descarga Elétrica
CVD	<i>“Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition”</i> - Deposição Química por Vaporização
ALE.....	<i>“Atomic Layer Epitaxy”</i> – Deposição Epitaxial de Camada Atômica
CIS	<i>“Copper-Indium Selenide”</i> – Seleneto de Cobre e Índio
MOCVD	<i>“Metal-Organic Chemical Vapor Deposition”</i> - Deposição Química por Vaporização Metal-Orgânica
CIGS.....	<i>“Copper-Indium-Gallium Disselenide”</i> – Disseleneto de Cobre, Índio e Gálio
TAB	<i>“Tape Automated Bonding”</i> – Conexão Automatizada em Fitas
PVB	Polivinil Butiral
EVA	Etil Vinil Acetato
PVF	Polifluoreto de Vinila
AC	Corrente Alternada
DC	Corrente Direta

CC	Corrente Contínua
TES	<i>“Thermal Energy Staorage”</i> – Unidade de Armazenamento Térmico
SMES	<i>“Compressed Air Energy Staorage”</i> – Armazenamento De Energia por Ar Comprimido
ITVAN	Instituto de Alta Temperatura
LASL	<i>“Los Alamos Scientific Lab”</i>
JPL	<i>“Jet Propulsion Laboratory”</i>
PWM	<i>“Pulse Width Modulation”</i> – Modulação por Largura de Pulso
SPDT	<i>“Single PoleDouble Thow ”</i> – Interruptor Monopólo de duas Posições
NBR	Norma Brasileira
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
UPS	<i>“Uninterruptible Power Supply”</i> – Fonte de Energia sem Interrupção
CI	Circuito Integrado
PID	Controlador Proporcional, Integrativo e Derivativo

LISTA DE SÍMBOLOS

YW	.....	Iota watt – 10^{24} W
μm	.....	micro-metro
nm	.....	nano-metro
ν	.....	Frequência de um Fóton
ν_0	.....	Frequência Limiar de um corpo Fotoemissor
h	.....	Constante de Planck, altura
E	.....	Energia, Energia absorvida por um Fóton, Campo Elétrico, Tensão Elétrica
V	.....	Potencial Elétrico, Volume
Vol	.....	Volume
Q, q	.....	Carga Elétrica
e	.....	Carga Elétrica Fundamental
λ	.....	Comprimento de Onda
c	.....	Velocidade da Luz, Velocidade de Propagação de um Fluido
$US\$W_p$	.....	Dólares Americanos por Watt de pico
$\text{\AA}$	.....	Angstrom – 10^{-10} m
A	.....	Área
F	.....	Força
r	.....	Raio, distância
x	.....	Raio, distância
W	.....	Trabalho, Energia
ε	.....	Permissividade Elétrica
L	.....	Indutância
C	.....	Capacitância
S	.....	Área, Potência
P	.....	Perdas, Potência Dissipada
η	.....	Rendimento

R	Resistência Elétrica
$f.e.m.$	Força Eletro-motriz
t	Tempo
τ	Constante de Tempo
δ, D	“ <i>duty cycle</i> ” – Ciclo de Trabalho
f	Frequência
Q_x	Semicondutor número x
HP	“Horse Power” – Cavlo-força – 746 W
d	Variação no <i>duty cycle</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	20
1.1 Objetivo	20
1.2 Motivação	20
1.3 Descrição do Sistema.....	20
1.4 Metodologia e Descrição dos Capítulos.....	21
2 TECNOLOGIA FOTOVOLTAICA	23
2.1 Histórico	23
2.2 Efeito Fotoelétrico	24
2.2.1 Conceitos	26
2.3 Materiais e Técnicas de Manufatura	27
2.3.1 Células de Silício Monocristalino (c-Si).....	31
2.3.2 Células de Silício Policristalino (p-Si)	35
2.3.3 Tecnologias de Filmes Finos	35
2.3.3.1 Células de Silício Amorfo (a-Si)	36
2.3.3.2 Células de Telureto de Cádmio (CdTe).....	38
2.3.3.3 Células de Disseleneto de Cobre e Índio	39
2.3.3.4 Outras ligas para filmes finos	41
2.3.4 Células baseadas em Pigmentos Sintéticos	42
2.3.5 Células Poliméricas/Orgânicas	43
2.3.6 Células Multijunção	44
2.4 Módulos Fotovoltaicos	49
2.4.1 Módulos com concentradores	49
2.3.2 Módulos de células de filme fino	50
2.3.2.1 Células Translúcidas/Semitransparentes.....	51
2.3.3.4 Células Flexíveis/Ultra Leves	51
2.4.3 Diodos de Proteção	52

3 TOPOLOGIAS DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA	53
3.1 Definição de Sistema Fotovoltaico e suas Aplicações	53
3.2 Sistemas Isolados.....	53
3.3 Sistemas Híbridos.....	54
3.4 Sistemas Centralizados.....	55
3.5 Sistemas Distribuídos	55
4 CONDICIONAMENTO DE ENERGIA	58
4.1 Características e Modelo Elétrico de um Pannel Solar	58
4.2 Conversores Chaveados	62
4.2.1 Conversores Step-Down ou Buck.....	62
4.2.2 Conversores Step-Up ou Boost	68
4.2.2.1 Controle PWM em malha fechada do Conversor Boost.....	71
4.2.2.1 Controle por multiplicador do Conversor Boost	72
4.3 Inversores.....	73
4.4 Chaves de Transferência.....	75
4.4.1 Chaves Estáticas	77
5 SISTEMA PARA ATENDIMENTO DE CARGAS PONTUAIS.....	79
5.1 Descrição do Sistema e Justificativas	79
5.2 Conversor Chaveado	81
5.2.1 Conversor Boost.....	81
5.2.2 Circuito de Controle.....	81
5.3 Inversor	81
5.3.1 Circuito de Potência	81
5.3.2 Circuito de Controle.....	82
5.4 Chave de Transferência.....	83
5.4.1 Chave Estática	83
5.4.2 Circuito de Controle.....	83
5.6 Dimensionamento dos Painéis	85

6 RESULTADOS	87
7 CONCLUSÕES	89
8 BIBLIOGRAFIA.....	90

1 INTRODUÇÃO

1.1 Objetivo

O presente trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema utilizando painéis solares para atender a demanda de eletricidade gerada por cargas pontuais, sem unidade de armazenamento, de acordo a patente nº 020110035974, registrada no INPI, fazendo uso de uma abordagem modular para possibilitar a expansão da capacidade de potência do sistema.

1.2 Motivação

A geladeira é um eletrodoméstico que, dado o seu uso na conservação de alimentos, exige alimentação elétrica constantemente disponível. Representa uma considerável parcela do consumo de uma residência, algo entre 20% e 30% do consumo mensal para populações de baixa renda, gerando um impacto significativo nas despesas mensais fixas.

A utilização de painéis solares como fonte alternativa para alimentar cargas pontuais durante todo o período de incidência de luz solar pode, por exemplo, alimentar uma geladeira. A proposta busca a redução do consumo de energia elétrica de residências, sem exigência de grandes áreas de incidência de luz, tendo instalação simples e custo de implantação reduzido, além de amortização em curto período de tempo, devido à economia na conta de energia elétrica.

1.3 Descrição do Sistema

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 sincronia com a rede inviabilizam a popularização destes sistemas. Uma possibilidade de se construir tal sistema é não fazer uso de armazenamento de energia, conforme proposto na patente nº 020110035974 (Marcelino, 2011). As vantagens de tal arranjo serão apresentadas no decorrer do trabalho. O sistema inclui um circuito de controle que comuta entre a fonte de energia alternativa e a rede, de modo a impedir o paralelismo de ambas, o que simplifica o controle necessário para evitar

problemas decorrentes deste tipo de operação. O sistema também é capaz de detectar o nível de insolação, de modo que se esta for muito baixa para garantir a alimentação da carga, o sistema comute para a rede. Como os painéis, o circuito também constitui um módulo, que pode ser associado a outros similares para atingir a potência desejada. As figuras 1.1 e 1.2 apresentam o sistema construído e o da patente seguida.

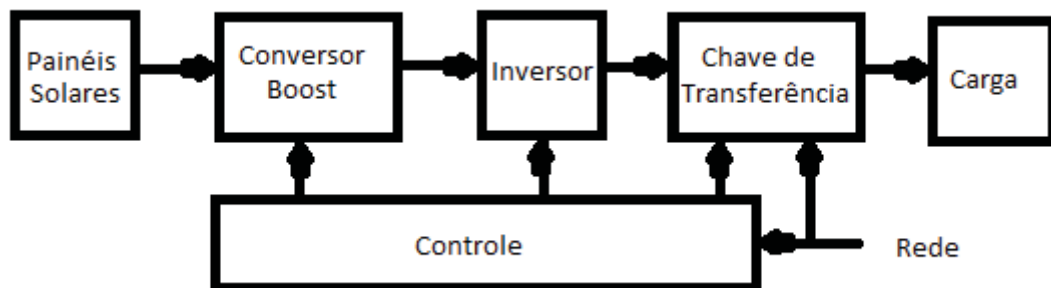


Figura 1.1: Diagrama de blocos do sistema.

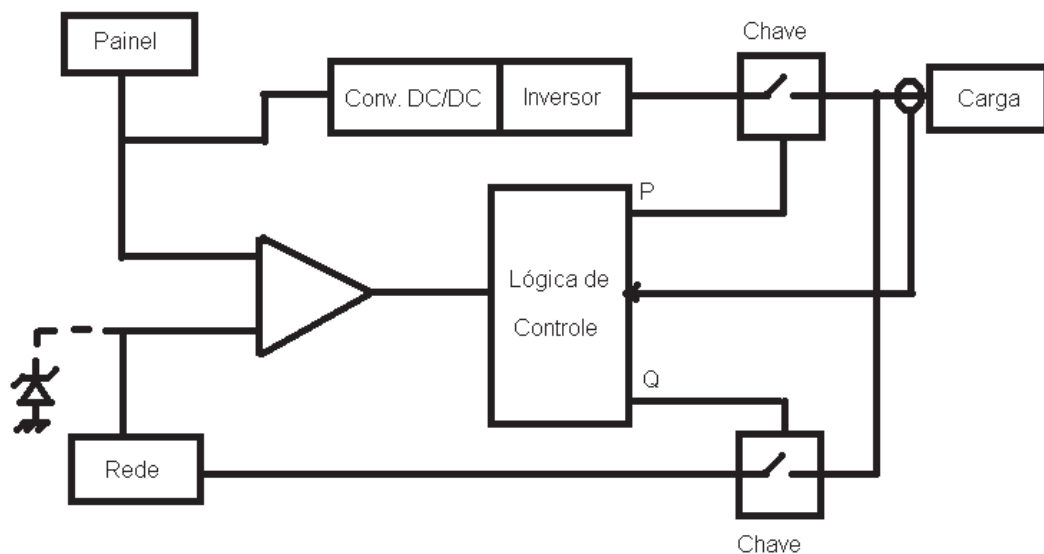


Figura 1.2: Diagrama do sistema da patente.

1.4 Metodologia e descrição dos capítulos

O presente estudo fez uso de bibliografia nas áreas de eletrônica de potência, bem como de geração de energia fotovoltaica, buscando obter o embasamento teórico necessário

ao desenvolvimento dos sistemas necessários à devida operação do conjunto, bem como dos fatores preponderantes para justificar a implantação desta classe de sistema. Alguns dados foram obtidos junto aos órgãos públicos competentes, tais como IBGE, ANEEL e ONS.

O presente trabalho se encontra estruturado conforme a seguir:

O Capítulo 2, Tecnologia Fotovoltaica, define o Efeito Fotoelétrico, e as técnicas desenvolvidas para explorá-lo na captação de grandes quantidades de energia.

O Capítulo 3, Topologias de Geração Fotovoltaica, trata da interconexão entre painéis solares, ou outra fonte alternativa, sistemas de armazenamento de energia, redes de distribuição e cargas.

O Capítulo 4, Condicionamento de Energia, aborda a teoria sobre conversores de potência, necessários para adequar a energia captada pelos painéis às necessidades da carga.

O Capítulo 5, Sistema para Atendimento de Cargas Pontuais, contém o desenvolvimento do sistema proposto, diagramas e simulações do mesmo.

O Capítulo 6, Resultados, avalia o desempenho de um protótipo e apresenta comentários sobre a implementação que foi executada.

O Capítulo 7, Conclusões, sumariza o que se pôde obter do trabalho e da implementação realizada, além de apresentar sugestões para trabalhos futuros.

2 TECNOLOGIA FOTOVOLTAICA

2.1 Histórico

Em 1863, Maxwell sintetizou nas equações que levam seu nome, as relações existentes entre os campos elétrico e magnético e, partindo delas, demonstrou que estes campos se propagavam á velocidade da luz. Tal feito acabou por unificar o as áreas do Eletromagnetismo (união surgida a partir do experimento de Oersted) e da Óptica, até então tratadas independentemente (LABDID, 2007).

Em 1887, Heinrich Hertz executou em seu laboratório uma série de experimentos que culminaram na geração e recepção de ondas eletromagnéticas em frequências que se encontram na faixa de rádio, segundo a classificação hoje vigente. Como consequência, desenvolveu-se o telégrafo e o rádio. Os experimentos efetuados por Hertz permitiram explicar a reflexão, a refração, a polarização, a interferência e a velocidade de ondas eletromagnéticas. E também permitiram detecção do efeito fotoelétrico, primeiramente observado por Becquerel em 1839 (Gutmann, 2002).

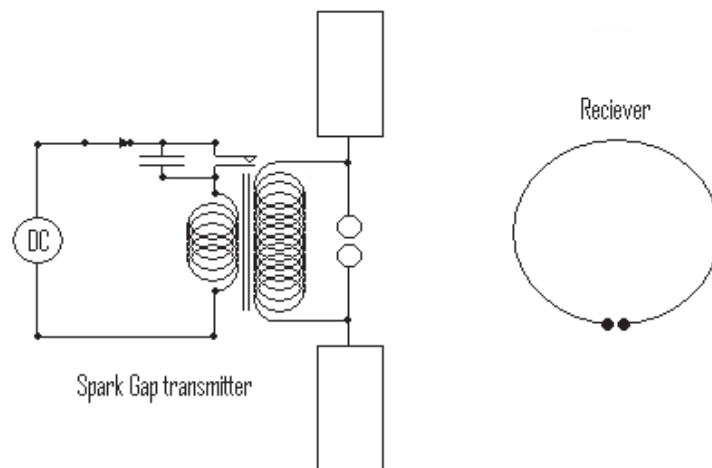


Figura 2.1: Oscilador a centelhador usado por Hertz em seus experimentos.

O aparato usado nestes experimentos se encontra na figura 2.1, e consistia de um oscilador baseado em um centelhador a ar de alta potência. O centelhador em si, opera como

uma antena dipolar, emitindo radiação visível, confirmando o envio de um pulso. Como receptor, um anel com uma pequena abertura, que devido á indução causada pelo campo emitido pelo transmissor, acabava também por centelhar.

Ao efetuar estes experimentos, Hertz verificou outro efeito. A centelha emitida no anel receptor era mais intensa quando a abertura do anel era diretamente iluminada pela centelha do circuito emissor. Tal resultado foi publicado em 1887, em um artigo intitulado “*On an effect of Ultraviolet Ligth upon the Electric Discharge*” (Sobre um efeito da Luz Ultravioleta na Descarga Elétrica).

A produção destas ondas hertzianas, então serviu como comprovação experimental dos trabalhos de Maxwell, contudo o fenômeno induzido pela luz ultravioleta na descarga elétrica permaneceu sem explicação. Em 1889, Wilhelm Hallwachs mostrou que partículas de carga negativa eram ejetadas de superfícies metálicas, como zinco, potássio e sódio, quando iluminadas com luz ultravioleta, e em 1902, von Lenard, colega de Hertz, mediu a razão carga/massa das partículas assim emitidas, concluindo que se tratavam de elétrons. Isso explicou o porquê do aumento de intensidade das centelhas observadas, já que o centelhamento do anel de recepção era reforçado pela emissão de elétrons induzida pela radiação ultravioleta. Com isso, a ejeção de elétrons de uma superfície metálica devido á incidência de luz se tornou conhecida como efeito fotoelétrico.

2.2 O Efeito Fotoelétrico

Por mais interessante que fosse a observação do efeito fotoelétrico, sua existência não é algo extremamente surpreendente, já que toda forma de radiação eletromagnética porta energia e não é difícil de imaginar que esta energia seja usada para ejetar pequenas partículas carregadas como os elétrons de uma dada superfície, ainda mais de superfícies metálicas, já que nestas, eles estão fracamente ligados á estrutura cristalina. Contudo, a era da Física Moderna é permeada de descobertas inesperadas e inexplicáveis. A análise dos resultados dos experimentos efetuados com a emissão de elétrons sob efeito de luz incidente não eram compatíveis com a teoria então vigente do eletromagnetismo, sendo somente melhor explicados com o advento da Mecânica Quântica em 1925 (Elert, 2011).

De acordo com a teoria clássica, esperava-se que o efeito fotoelétrico apresentasse as seguintes características:

- I) A energia cinética dos elétrons ejetados deveria ser proporcional á intensidade da onda incidente;
- II) A ejeção dos elétrons tem um atraso com relação ao tempo de incidência da radiação eletromagnética, sendo proporcional a mesma;
- III) A resposta em freqüência da energia cinética deveria ser contínua com o espectro de luz.

Contudo, as observações feitas não seguiram estas proposições, sendo que as respectivas observações experimentais foram:

- I) A energia cinética dos elétrons independe da intensidade da radiação incidente;
- II) Não há atraso perceptível entre a incidência de radiação e a ejeção de elétrons;
- III) Não se observa o efeito fotoelétrico para radiações de baixa freqüência.

Tais diferenças surgem do fato que as equações de Maxwell partem do pressuposto de que o sistema de trabalho seja contínuo. Logo, deveria ter sido previstas dificuldades de aplicação em um universo em que a matéria estava quantizada, como já era aceito ao final do século XIX em função dos trabalhos de Thomson, que a descrevia como granular. Tais dificuldades também surgiram em outros fenômenos como o espalhamento luminoso e outros (Elert, 2011).

Um problema encontrado era na descrição matemática usada na propagação de ondas eletromagnéticas, que falhava ao descrever interação com a matéria. Conforme levantado por Rayleigh: “*Como descrever o espalhamento de radiação por um alvo cuja dimensão é muito menor que o comprimento de onda da radiação incidente?*”. Tal questão é pertinente já que a luz tem comprimentos de onda compreendidos na faixa de 10^{-6} e 10^{-7} m, e o raio do átomo de Thomson é da ordem de 10^{-10} m.

A solução foi apresentada em 1905 por Einstein. Baseando-se no trabalho de Planck, ele também quantizou a energia portada pelas ondas, e o impacto dessa consideração levou á ruptura das teorias clássicas. As previsões de Einstein para o efeito fotoelétrico foram confirmadas em 1915 por Robert Millikan.

2.2.1 Conceitos

Banda de Energia: O princípio de exclusão de Pauli afirma que dois elétrons em um material de estado sólido podem assumir o mesmo nível de energia. Por isso, os elétrons em um átomo se organizam em forma de camadas eletrônicas, onde cada elétron assume um estado distinto e único. Para uma substância que contenha bilhões e bilhões de elétrons em que nenhum deles possa assumir níveis iguais de energia, acaba fazendo que as diversas camadas discretas ocupem níveis próximos de energia, assumindo um comportamento muito próximo de uma distribuição contínua, dada a grande quantidade de elementos envolvidos. O agrupamento destes níveis de energia é denominado banda de energia.

Banda de Valência: a banda com maior nível de energia em uma substância, cujos elétrons ainda se encontrem atrelados ao núcleo atômico é denominada banda de valência.

Banda de Condução: a banda com menor nível de energia em uma substância, ocupada por elétrons livres é denominada de banda de condução.

Nível ou Energia de Fermi: é o limiar entre a banda de valência e a banda de condução para uma dada substância quando esta se encontra a 0 K.

Função Trabalho: energia mínima para levar um elétron da banda de valência para a banda de condução.

Banda Proibida: faixa de energia entre a banda de valência e a banda de condução cujos valores de energia não permitem que um elétron se mantenha estável. Caso a energia de um elétron esteja na banda proibida, este deverá absorver energia do meio em que se encontra, e se tornar um elétron livre, ou emitir energia, entrando na banda de valência.

Em metais, as bandas de valência e de condução se sobrepõem, o que explica sua facilidade de conduzir corrente elétrica, já que seus elétrons podem facilmente transitar entre bandas. Para semicondutores e isolantes, há uma banda proibida entre as bandas de condução e de valência, sendo que para semicondutores, tem-se em média um intervalo de 1 eV entre bandas e para isolantes, intervalos superiores a 5 eV.

2.3 Materiais e Técnicas de Manufatura

As medidas efetuadas em 1916 por Millikan faziam uso de um aparato que consistia em uma placa metálica dentro de um tubo de vácuo, como o da Figura 2.2, fazendo às vezes de catodo, e um eletrodo posicionado como anodo (Partein, 1995). O vidro do invólucro é transparente à luz, e esta válvula está ligada a um voltímetro e a um amperímetro, seguidos de uma fonte de tensão ajustável, tal qual na figura 2.3.



Figura 2.2: Válvula fotoelétrica.

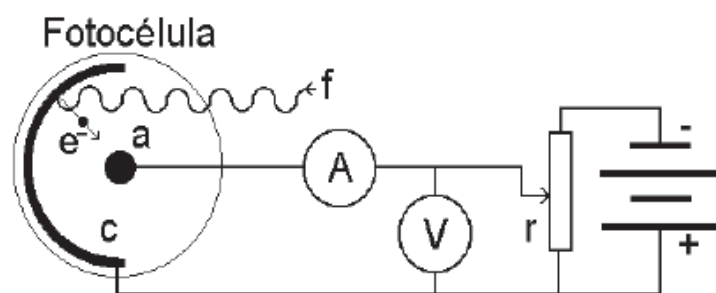


Figura 2.3: Esquema do experimento de Millikan sobre o efeito fotoelétrico.

Tal equipamento apesar de permitir diversas aferições de propriedades inerentes ao fenômeno da foto eletricidade, não permitia captação significativa de energia, sendo que somente com o advento da eletrônica de estado sólido que o desenvolvimento de células fotovoltaicas tomou fôlego.

A primeira observação do efeito fotoelétrico foi feita por Edmond Becquerel, que detectou uma pequena diferença de potencial em placas de prata e platina quando mergulhadas em eletrólito.

Em 1887, W. G. Adams e R. E. Day fizeram uso das propriedades fotocondutoras do Selênio para desenvolver o primeiro dispositivo em estado sólido capaz de gerar eletricidade a partir da luz. O dispositivo consistia de um filme de Selênio depositado em um substrato de

ferro, usando um filme de Ouro semitransparente como contato frontal. A eficiência de conversão era da ordem de 0,5%, sendo comercializadas por Werner Siemens como fotômetros para máquinas fotográficas (Partein, 1995).

A história das células solares modernas começa em 1953, quando Calvin Fuller, trabalhando em uma unidade da Bell Labs desenvolveu um processo de difusão para a introdução de impurezas em cristais de Silício, processo hoje conhecido como dopagem. O objetivo da dopagem é que a inserção controlada de impurezas no cristal de Silício permitia ajustar as características elétricas do cristal. A barra produzida tinha sido dopada com Gálio, constituindo um material “tipo p” (semicondutor cujas cargas móveis são positivas). Sob as instruções de Fuller, Gerald Pearson banhou tal barra em lítio, criando uma dopagem “tipo n” (semicondutor cujas cargas móveis são negativas). O ponto em que a junção dos materiais ocorre acaba então submetido a um campo elétrico permanente. Durante a caracterização elétrica deste material (tal junção p-n é facilmente reconhecida hoje como um diodo), Pearson verificou que esta produzia corrente quando exposta à luz. A Figura 2.4 ilustra a tecnologia usada.

Após tal averiguação, Pearson foi falar com Daryl Chapin, que estudava opções para a substituição de baterias nos sistemas de redes telefônicas. Até então, Chapin havia trabalhado com células de Selênio mencionadas anteriormente. Ao ensaiar o material proposto por Fuller, foi encontrada uma eficiência de 4% (Universidade de Lisboa, 2006).

Maior avanço foi conseguido quando se substituiu o Gálio por Fósforo na dopagem do Silício. Essa mudança permitiu que as células fossem facilmente soldadas entre si, além de bater os 6% de eficiência. A primeira aplicação destas células foi feita em Americus, Georgia, EUA, para alimentar uma rede telefônica local. 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 2.5 ilustra tal utilização.

O alto custo de produção das células solares simplesmente a tornava um produto inviável para qualquer aplicação prática à época. Contudo, o advento da corrida espacial mudaria este panorama e fomentaria a indústria de painéis até que esta pudesse se desenvolver a ponto de atingir níveis de custo mais atrativos.

Em 1957 os soviéticos lançaram o *Sputnik I*, alimentado por uma bateria química que durou 22 dias. Como tecnologia disponível, havia também as pilhas de fissão nuclear, ainda hoje usadas em missões para o espaço profundo. Painéis solares eram então meras curiosidades, mas em 1958 foram incorporados ao design do satélite norte-americano *Vanguard I*, como back-up da bateria. Curiosamente, a bateria química falhou e o painel de

0,1 W com quase 100 cm² assumiu a função de fonte de energia se mantendo operacional por 8 anos. Dois meses depois, o *Sputnik III* também adotaria painéis solares, sendo adotados como sistema primário de energia, por permitir autonomia com baixo acréscimo de massa, fatores muito mais críticos que o custo em uma missão espacial.

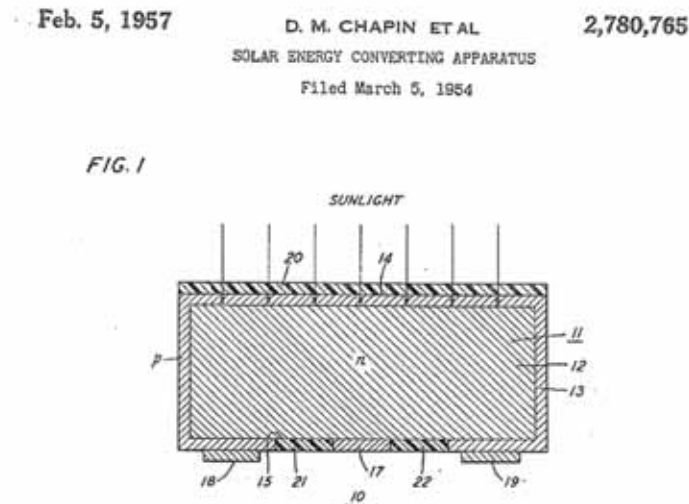


Figura 2.4: Excerto da patente da célula fotoelétrica de Chapin, Fuller e Pearson (PARTEIN, 1995)



Figura 2.5: Painel solar com a tecnologia de Fuller. Aplicação na rede de telefonia de Americus, Georgia, EUA em 1955. (PARTEIN, 1995)

As aplicações espaciais acabaram por puxar o desenvolvimento da tecnologia de células solares ao longo das décadas seguintes. Por exemplo, em 1960, o contato frontal que era composto de uma película única, foi trocado por uma trama fina, espalhada pela superfície

antes completamente coberta, aumentando a eficiência das células. Até então, o substrato utilizado pelos EUA era exclusivamente de material tipo n, enquanto os soviéticos usavam substratos tipo p, de menor custo. Posteriormente, se descobriu que substratos tipo p degradam menos sob a exposição do Sol, o que levou a produção de ambos os substratos nos EUA (PARTEIN, 1995).

Outro avanço importante na eficiência foi conquistado pela COMSAT Laboratories, ao usar uma deposição de material tipo n significativamente mais fina, eliminando zonas inativas na superfície das células, permitindo melhor aproveitamento na faixa azul-violeta do espectro solar. Tal célula bateu o recorde de eficiência até então estabelecido, com 13,5%. Outras técnicas incorporadas foram à texturização da superfície para evitar perdas por reflexão e a incorporação de um campo elétrico na superfície da célula (o BSF – *Back Surface Field*), aumentando a resposta na faixa do vermelho.

Como visto, estes avanços aumentaram rapidamente a eficiência dos painéis, mas não afetaram o seu custo. Até então, a única aplicação em terra que justificava a aplicação de energia solar era a alimentação elétrica de sistemas de comunicação remotos, ou como explorado pela SOLAREX, bóias de navegação. Com o primeiro choque do petróleo, em 1973, e a quadruplicação de seu preço, criou-se uma onda de pânico que incentivou diversos programas para a substituição do óleo como fonte de energia, sendo a energia fotovoltaica uma das áreas contempladas. As novas pesquisas buscaram o uso de novos materiais, em especial o Silício policristalino e amorfo depositado em fitas. A deposição em fitas reduz custos já elimina desperdícios inerentes aos cortes dos cristais de Silício. Outra inovação importante na redução de custos foi a introdução de técnicas de serigrafia no lugar de fotolitografia e deposição por evaporação em vácuo. A soma destes resultados levou a uma queda de custo da casa de 80,00 US\$/Wp para 12,00 US\$/Wp em menos de uma década. No quesito eficiência, chegou-se a casa dos 20% para Silício monocristalino, feito obtido na Universidade de Nova Gales do Sul, Austrália, e 25% de eficiência quando se usava concentradores de luz.

A partir dos anos 80 há um aumento significativo no número de políticas para lançar uma economia de escala para células solares, alavancada por preocupações com independência energética e pelo crescimento da consciência da ameaça oferecida pelas mudanças climáticas. Em 1982, a primeira central fotovoltaica de grande envergadura (com 1 MWp) é posta em operação na Califórnia. Programas de telhados solares começaram na Alemanha e no Japão no início dos anos 90, incentivando o mercado de painéis. Em 1999 superou-se a marca de 1 GW de potência instalada.

Em 1998 atingiu-se 24,7% de eficiência para silício monocristalino, e em 2003 se atingiu eficiências superiores a 20% para Silício policristalino. Células solares com constituição mais complexa, compostas pela sobreposição de diversas células semicondutoras em que cada uma delas está otimizada para aproveitar certa faixa do espectro, atingindo eficiências superiores a 34% (Partein, 1995). A evolução das tecnologias fotovoltaicas é apresentada pela figura 2.6.

2.3.1 Células de Silício Monocristalino (c-Si)

Fotocélulas baseadas em Silício já haviam sido descritas no início da década de 1940 por Russel Ohl em seus trabalhos pela Bell Laboratories, sendo que a primeira célula cristalina foi aquela desenvolvida por Chapein nos anos 50. Estas células sofreram rápida evolução até o formato que dominou durante a década de 1960, que além da junção p-n, já incluía tratamento com uma camada anti-reflexo e reduzida área de contato metálico para redução da área de sombra na célula. Até idos de 1970, este foi o padrão de manufatura de células solares. Neste momento, percebeu-se que o uso de Alumínio sinterizado na parte traseira da célula melhorava a performance provavelmente pela geração de uma interface altamente dopada conhecida como *back surface field* (BSF). A BSF atua suprimindo a recombinação de portadores minoritários na parte posterior da célula, melhorando a tensão e a corrente desenvolvidas pela célula (Partein, 1995).

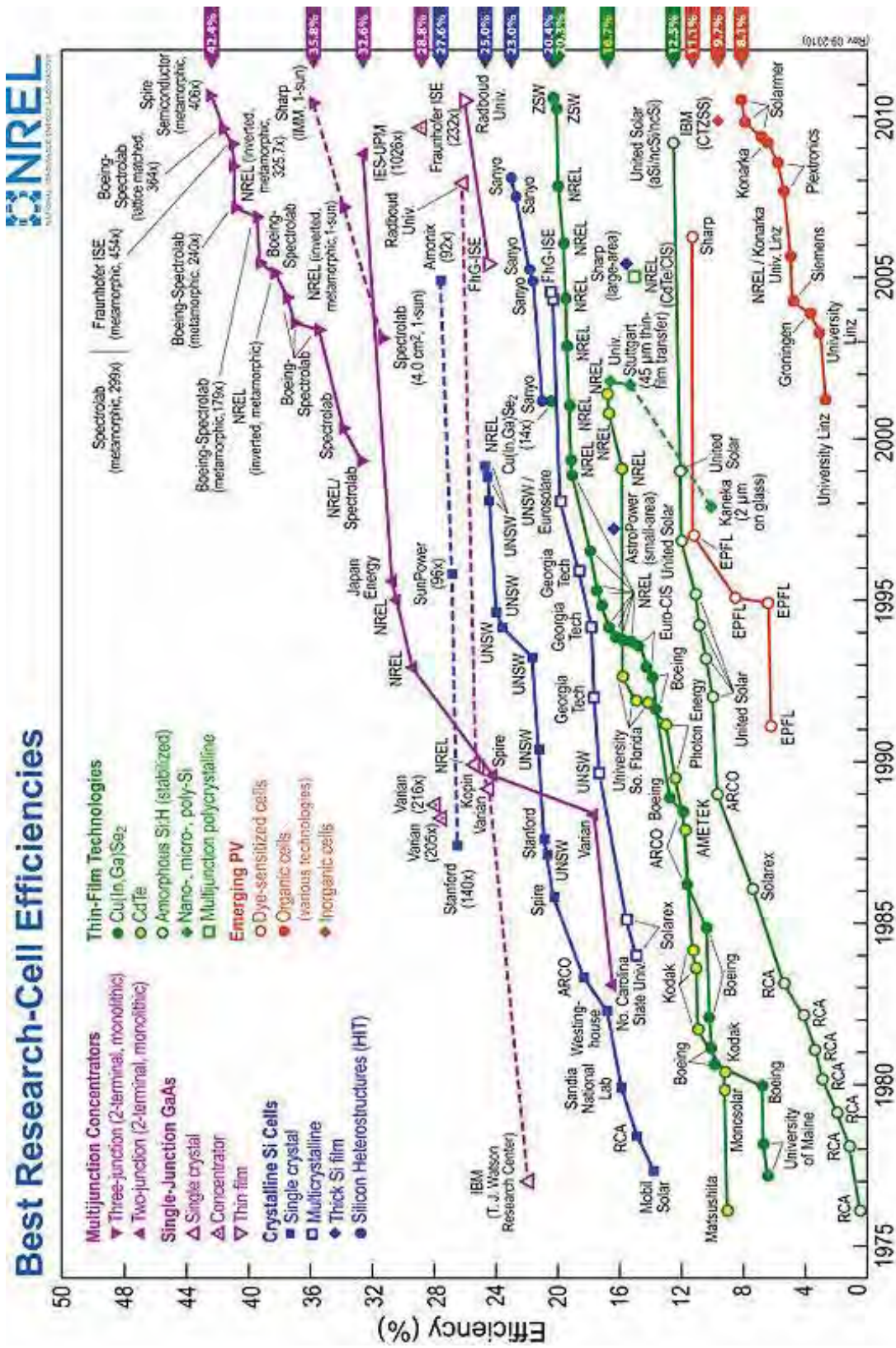


Figura 2.6: Evolução das eficiências dos painéis solares de diversas tecnologias. (WIKIPEDIA, 2011)

Outras melhorias foram provenientes da COMSAT Laboratories ao fazer uso de fotolitografia para depositar nervuras metálicas mais finas e menos espaçadas sobre a superfície do cristal de Silício, reduzindo a dopagem de Fósforo na camada tipo-n e eliminando zonas inativas, melhorando a resposta a luz azul. Melhores tecnologias anti-reflexo também auxiliaram neste incremento. Por volta de 1974 a adoção de superfícies texturizadas através de causticações anisotrópicas que criam diversas estruturas de forma piramidal para reduzir o coeficiente de reflexão. O aspecto de veludo negro acabou por gerar a denominação desta composição como “*Black Cell*” ou célula negra, em tradução livre. O uso desta estrutura com nervuras multicamada de Titânio, Paládio e Prata permitiram eficiências de 17% em laboratório. O aspecto destas tecnologias é ilustrado na Figura 2.7

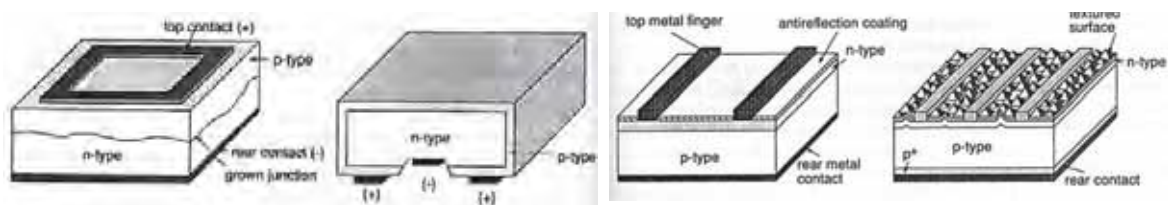


Figura 2.7: Evolução da manufatura das células de silício.

A produção de Silício em grau solar em escala comercial se dá por dois processos: o processo Czochralski (CZ) e através da fusão por zonas. A fusão por zonas (FZ), ilustrado na Figura 2.8, trabalha com um lingote de Silício policristalino, suspenso de tal forma que o corpo do lingote possa ser percorrido por uma espira que opera em radiofrequência. Enquanto o lingote se desloca e rotaciona, a espira provoca a fusão do material que recristaliza na forma de um só cristal de alta pureza. O método Czochralski, ilustrado pela Figura 2.9, consiste no uso de uma semente cristalina imersa em Silício fundido, que é lentamente emergida enquanto sofre rotação. O preciso controle do gradiente de temperatura e das velocidades de tração e giro do lingote controlam seu crescimento. O resultado é uma barra cilíndrica monocristalina. Um refinamento recente nesta técnica de crescimento de cristais está no uso de confinamento magnético (MCZ), através do uso de potentes imãs para controle da convecção do material fundido, melhorando as condições de cristalização.

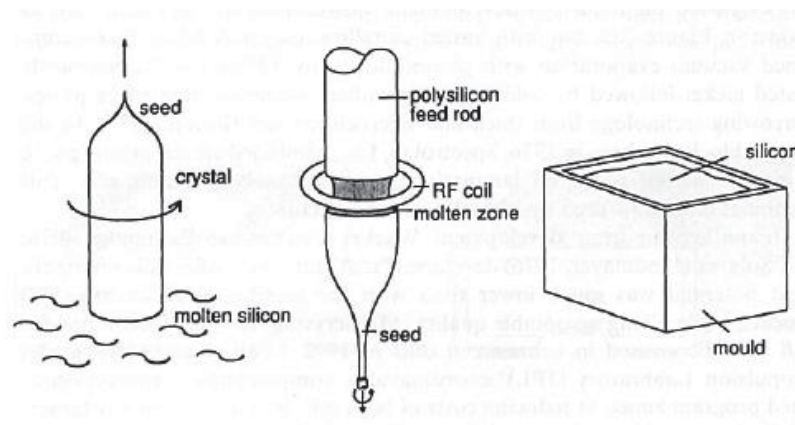


Figura 2.8: Método da fusão por zonas de crescimento de lingotes.

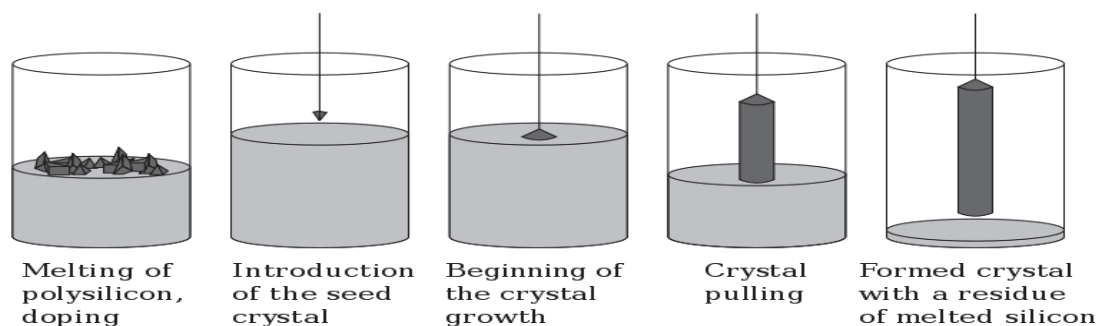


Figura 2.9: Método Czochralski de crescimento de lingotes.

As pastilhas de Silício são obtidas pelo corte dos lingotes por lâminas metálicas com bordas de diamante ou com fios estreitos em conjunto com lodo abrasivo. Após o corte, as rebarbas são removidas com um ataque químico de NaOH, também usado para preparar uma textura adequada ao processo de deposição química. Em geral, as pastilhas são dopadas com Boro, para sofrerem posterior difusão de Fósforo para a criação de uma camada tipo-n, em geral usando gás fosfina (PH_3) no processo. Feito isso, os contatos são impressos na pastilha.

Para os contatos da superfície anterior da célula (região que capta a luz), uma cola de Prata em pó em conjunto com um compósito vítreo (*frit*) e ligantes orgânicos. As conexões traseiras consistem numa cola de Alumínio para dopar a região tipo-p em p^+ e construir a BSF. A secagem destas pastas se faz com temperaturas em torno de 350°C - 400°C . O processo de metalização é concluído a 700°C , para se obter boa resistividade dos contatos. A camada anti-reflexo é então aplicada, sendo em geral feita por deposição química por spray de Dióxido de titânio. Após a limpeza dos excessos as células são testadas e soldadas em módulos.

O aspecto físico de uma célula monocristalina pode ser visto na Figura 2.10.

2.3.2 Células de Silício Policristalino (p-Si)

Por não haver a restrição de crescer o lingote em um cristal único, as células resultantes desta tecnologia têm um custo mais baixo, assim como eficiências mais baixas. Silício previamente purificado a grau solar (quantidade de impurezas entre $10^{-3}\%$ e $10^{-5}\%$ (Inovação Tecnológica, 2011)) é fundido e posto para solidificar em moldes, onde se cristaliza (Partein, 1995). O processamento de Silício policristalino se dá de modo similar ao monocristalino, sofrendo pouca diferença em seu tratamento. Em especial, infundi-se Hidrogênio na estrutura cristalina para reduzir atividade nas fronteiras dos grãos cristalinos e obter melhor eficiência. A Figura 2.10 também mostra o aspecto de uma célula policristalina.

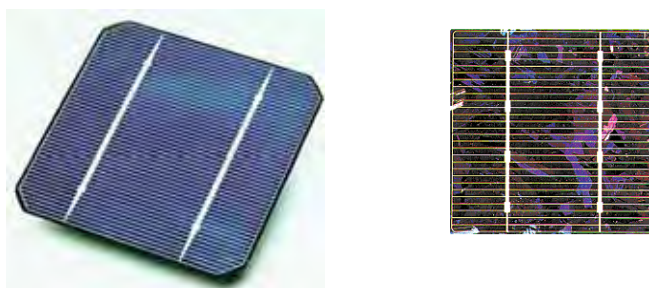


Figura 2.10: Células de silício cristalino. À direita, célula monocristalina. À esquerda, célula policristalina.

2.3.3 Tecnologias de Filmes Finos

Tecnologia hoje principalmente aplicada em produtos com baixo consumo de energia, em especial as células de silício amorfo, alimentando calculadoras, relógios dentre outros produtos. Dada sua resposta ao espectro luminoso, se mostram eficientes sob iluminação artificial, com iluminação fluorescente. A produção destas células é feita em substratos de baixo custo, como vidros, aço, inox, e alguns tipos de plástico.

Há no mercado painéis flexíveis, inquebráveis, semitransparentes, curvos, mais leves que os painéis de silício cristalino, e por esta versatilidade, ampliando os nichos de mercado atingíveis pela tecnologia fotovoltaica. Dado seu apelo estético, têm encontrado aplicações arquitetônicas diversas, substituindo telhados e fachadas na construção civil. Em geral, tais células possuem uma eficiência menor do que as células em silício cristalino.

3.3.3.1 Células de Silício Amorfo (a-Si)

As primeiras células solares com esta tecnologia eram de junção p/i/n, obtidas a partir da decomposição por descarga elétrica do gás silano (SiH_4), cuja eficiência era muito baixa. De modo geral a eficiência de células amorfas fica abaixo de suas contrapartes cristalinas. Contudo, uma série de características fazem da tecnologia amorfa em especial o Silício hidrogenado (a-Si:H) uma tecnologia muito atrativa:

- Alto coeficiente de absorção óptica (superior à 10^5 cm^{-1}) na faixa do espectro visível, viabilizando dispositivos submicrométricos práticos e viáveis economicamente;
- Processo de deposição simples à baixa temperatura (cerca de 250°C), que permite uma cobertura uniforme de superfícies muito texturizadas com filmes extremamente finos ($100 \text{ \AA}$), em um processo facilmente adaptável para produção em lotes ou contínua;
- O processo é ambientalmente benigno, pois não cria praticamente qualquer resíduo danoso;
- Fontes de matéria prima virtualmente inesgotável;
- Dispositivos facilmente padronizáveis e suscetíveis à integração monolítica;
- Material que forma facilmente ligas com outros elementos do grupo IV-A (grupo 14), o que permite mudanças na banda óptica da célula;

Opondo-se a estas características atrativas, têm-se os seguintes contras:

- O a-Si:H tem queda em seu desempenho ao longo do tempo devido à degradação que sofre ao ser exposto à luz ou ser submetido à polarização direta. Tal efeito pode ser revertido ao se aquecer a célula em temperaturas superiores a 100°C ;
- Qualidades elétricas inferiores aos correspondentes cristalinos, mas ainda adequadas para uso em painéis solares para diversas aplicações;
- Não é possível o uso de dopagem degenerativa para a produção de filmes com alta condutividade, devido ao mecanismo com que defeitos são gerados na

estrutura amorfa, contudo resistividades na faixa de $10^2 - 10^3 \Omega\text{-cm}$ são possíveis de se atingir.

Paralelamente às células p/i/n, células baseadas no diodo Schottky foram desenvolvidas, alcançando eficiências em torno de 6%. Por volta de 1980, o uso de ligas com elementos da família IV A permitiram que se atingisse 8% de eficiência, como no caso do uso de a-SiC:H. O uso de heterojunções em conjunto com texturização da superfície das pastilhas fez com que se superasse a marca de 10%.

A primeira aplicação comercial desta classe de produtos surgiu na década de 1980, com módulos de poucos centímetros quadrados de área, em estruturas monolíticas, usados em calculadoras portáteis. Estima-se que o volume de vendas de células amorfas produzidas até o momento tenha superado o montante obtido por células cristalinas. Grandes associações de módulos foram testadas, contudo com baixa eficiência do conjunto, algo entre 3% - 4%, não sendo atrativo para a geração de grandes blocos de potência. O uso de multijunções, contudo pode permitir viabilidade comercial neste setor.

A produção de filmes amorfos exige controle de impurezas, tais como Na, O₂, C, e N₂, bem como bom controle da espessura do filme, que em geral é algo na faixa de 10 Å a 100 Å. Controle no grau de incorporação de Hidrogênio pela célula é fundamental, devido a seu papel na estabilização das características do material. As técnicas de deposição mais usadas são a deposição química de vapor intensificada por plasma (PECVD – *plasma-enhanced chemical vapor deposition*) ou por descargas elétricas (GD – *glow discharge*), ambas capazes de produzir grandes áreas de deposição. Outros métodos e variantes tem sido desenvolvidas para melhorar o controle dos processos como confinamento magnético, decomposição por fotólise, permitindo diferentes velocidades de deposição e impregnação de Hidrogênio.

Por se trabalhar com estruturas amorfas, há um relaxamento das proporções estequiométricas requeridas na produção de células viáveis, bem como desaparece a definição de fases bem definidas quando em estado sólido. Tais características são exploradas na constituição de ligas, partindo do Si₃N₄, e do Carbetto de Silício (SiC), compondo ligas da forma geral a-Si_{1-x}:C_x:H e a-Si_{1-x}:N_x, respectivamente, com $0 \leq x \leq 1$. A inserção de Nitrogênio e Carbono nas ligas de Silício confere uma banda proibida mais larga, e nas ligas com Germânio, a fabricação de dispositivos com vários intervalos de banda proibida.

A Figura 2.11 apresenta a variedade de aspectos que as células de silício amorfo podem assumir. As células transparentes, pela menor densidade de material, possuem menor rendimento.

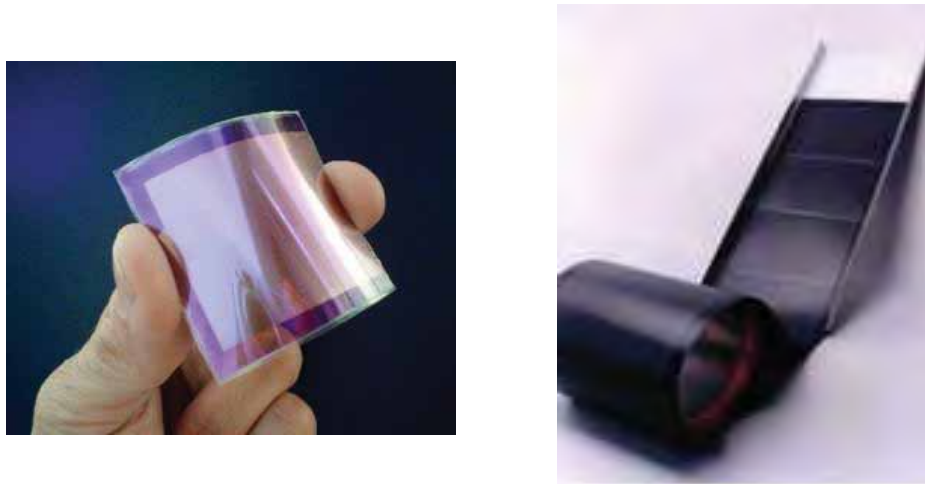


Figura 2.11: Células de silício amorfo. À direita, célula flexível. À esquerda, rolo com vários módulos para aplicações de potência.

2.3.3.2 Células de Telureto de Cádmio (CdTe)

O Telureto de Cádmio já tinha sido apontado como material promissor para aplicações fotovoltaicas no final da década de 1970. Juntamente com as células de CuInSe_2 , tem uma banda proibida próxima do pico de máximo aproveitamento do espectro solar (1,44 eV para o CdTe) e capacidade de absorver mais de 90% dos fótons incidentes em uma camada com 1 μm de espessura, exigindo pouco material para se obter absorção total, sendo que 3 μm de espessura já seriam suficientes para aplicação solar. Com esse pressuposto, e partindo que se tenha 15% de eficiência (valor já atingido para este material com as técnicas disponíveis), seriam necessários apenas 115 kg de CdTe por megawatt de potência dos módulos a serem produzidos. A Figura 2.12 apresenta um cristal de Telureto de Cádmio e seu arranjo para captação de energia.

As ligas baseadas em CdTe são manufaturadas por diferentes técnicas: deposição epitaxial de camada atômica, dispersão química, CVD (*chemical vapor deposition*), sublimação em espaço confinado, eletrodeposição, sinterização e evaporação à vácuo, dentre outros. Vários destes processos conseguem atingir eficiências superiores a 10%. Células com eficiências superiores a 15% foram obtidas ao se usar células fabricadas sobre vidro 7059 banhado em Óxido de estanho dopado com Flúor. Uma espessa camada de Sulfeto de Cádmio (CdS) com algo entre 50 nm e 80 nm, é depositada neste substrato a partir de uma solução aquosa de Acetato de cádmio, seguida de uma camada de CdTe obtida pelo método de

sublimação (passagem direta do estado sólido para o gasoso), com cerca de 3 μm a 5 μm . O contato traseiro é obtido ao se dar um tratamento cáustico da superfície de CdTe e depositando HgTe. Após a deposição, a pastilha sofre tratamento térmico sob atmosfera inerte e aplica-se MgF_2 como camada anti-reflexo.



Figura 2.12: Célula de Telureto de Cádmio. À direita, estrutura das camadas componentes de uma célula. À esquerda, cristal de CdTe.

Ligas como $\text{CdS}_x\text{Te}_{x-1}$ estão sendo trabalhadas por deposição epitaxial de camada atômica (ALE – *atomic layer epitaxy*), colocando uma camada de 250 nm deste material entre uma camada de CdS com 50 nm e outra de CdTe com 3 μm , compondo células com eficiências de 14%.

2.3.3.3 Células de Disseleneto de Cobre e Índio

Assim como o Telureto de Cádmio, o Disseleneto de Cobre e Índio (CIS – CuInSe_2) também foi apontado como promissor no final da década de 1970. Sua banda proibida, também é próxima do pico de máximo aproveitamento do espectro solar (0,95 eV) e podendo ser também produzido em filmes de 3 μm de espessura. Partindo da atual eficiência de 15% de eficiência, 124 kg seriam necessários na produção de módulos capazes de fornecer um megawatt de potência (Partein, 1995).

As ligas baseadas na tecnologia CIS também se destacam pela alta eficiência das células e dos módulos que as contem. Trabalhos feitos pela Boeing revelaram que células baseadas em CdS/CIS atingem 9,4% de eficiência. Ligas como $\text{CuIn}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{Se}_2$, tem uma

banda proibida de 1,7 eV, atingindo eficiência de 13%. As técnicas de manufatura exploradas incluem co-evaporação dos elementos componente da liga, síntese por laser, deposição química de vapores metálico-orgânicos (MOCVD – *metal-organic chemical vapor deposition*), pirólise por dispersão, eletrodeposição, sulfurização e selenização de camadas metálicas, dentre outros.

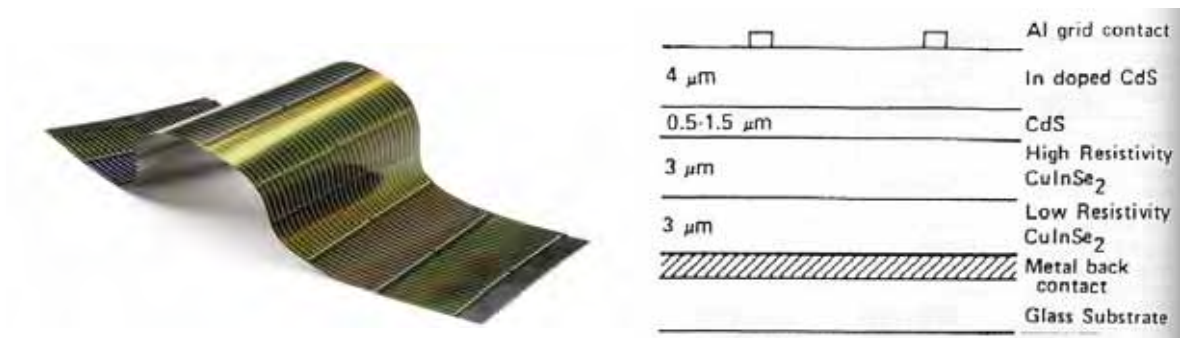


Figura 2.13: Célula CIGS flexível.

Os processos que conduziram às maiores eficiências foram os de co-evaporação e sulfurização e selenização de metais. Na co-evaporação, o substrato é levado à temperaturas de 350 ° - 550 °C. Para prevenir a perda de Selênio dos filmes, a taxa de incorporação é mantida a um nível de três vezes a taxa de evaporação. As taxas de incorporação de Índio e Cobre são então controladas para se obter a razão Cu/In desejada. Na selenização ou sulfurização são praticadas usando hidretos destes materiais (respectivamente H₂Se e H₂S) ou fontes de Se e S elementais, que são depositados por evaporação ou eletrodeposição. As propriedades eletrônicas finais são obtidas após tratamento térmico do filme produzido. As Figuras 2.14 e 2.15 representam respectivamente o processo de co-evaporação e uma célula típica de filme fino assim obtida.

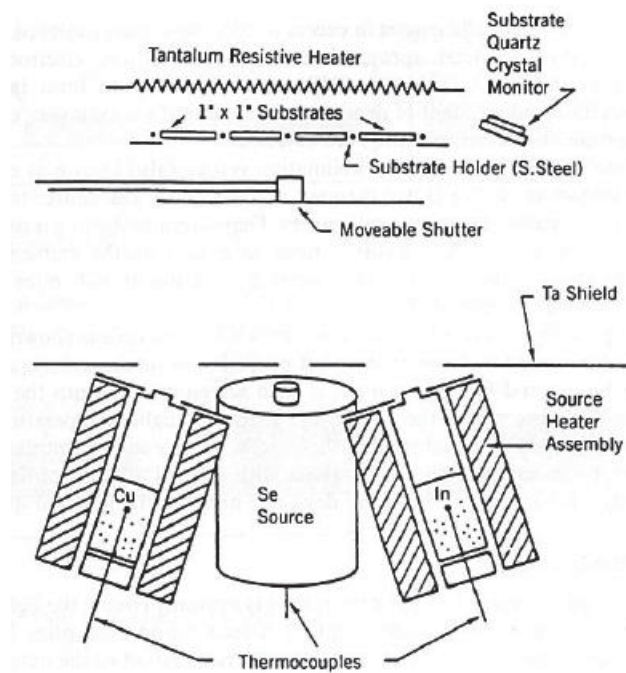


Figura 2.14: Processo de co-evaporação para uma célula CIS.

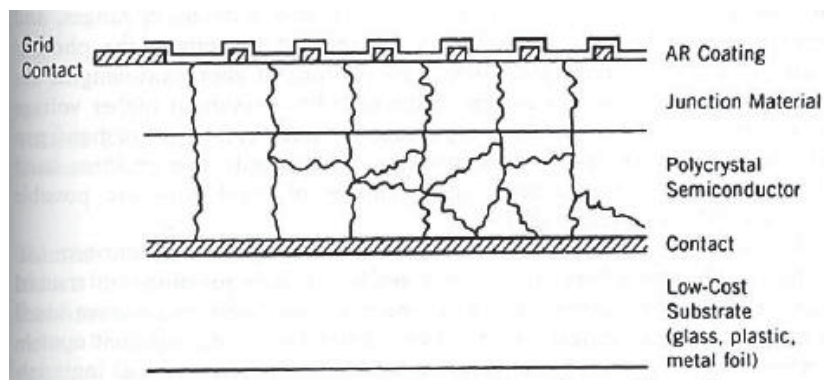


Figura 2.15: Corte de uma célula de filme fino policristalina. Estrutura típica para CdTe e CIS.

2.3.3.4 Outras ligas para filmes finos

Outros materiais também usados na composição de filmes finos estão em estudo, apesar de atualmente se encontrarem longe de atingir viabilidade econômica. Aqui se incluem o Fosfeto de Índio (InP), Fosfeto de Zinco (Zn_3P_2), Seleneto de Cobre (Cu_2Se), Disseleneto de Tungstênio (WSe_2), Arseneto de Silício e Zinco (ZnSiAs). Também se enquadram aqui

composições células CdS/I-III-IV₂ e Arseneto de Gálio (GaAs), que apesar de eficientes (15,2% para CuIn(Se_{0.75}S_{0.25}) e 25,8% para GaAs), têm alto custo.

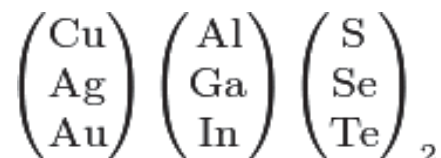


Figura 2.16: Elementos usados na composição de uma célula CdS/I-III-IV.

2.3.4 Células baseadas em pigmentos sintéticos

Desenvolvidas em 1991, por Michael Grätzel, também, são conhecidas pelo nome de seu criador. Seu funcionamento se baseia na construção de um sistema semiconductor que é composto por um anodo fotossensível e um eletrólito, sendo então uma célula fotoeletroquímica. Os materiais necessários na confecção destas células são de baixo custo, e o processo de manufatura não requer equipamentos sofisticados, o que faz esta tecnologia ser atrativa. As células podem ser desenvolvidas na forma de lâminas flexíveis e robustas, podendo suportar granizo e impactos moderados por si só.

Apesar destas vantagens, sua eficiência é muito baixa comparada á outras tecnologias como as de filmes finos. Em tese, sua produção por área-custo, medida em kW/(m²-ano-dólar), deveria ser suficientemente alta para competir em pé de igualdade com a energia gerada por combustíveis fósseis. Seu desenvolvimento comercial se encontra estacionado devido a instabilidades químicas em alguns dos materiais usados.

Atualmente bases de Dióxido de titânio (TiO₂) usadas como semiconductor e o corante Ru-2,2'-bipyridin-4,4'dicarboxylic-acid(-(CN)Ru(CN)-2,2'-bipyridine) é usado nesta células. Como corantes alternativos, têm-se outros compostos a base de Rutênio (Ru) e Ósmio (Os), porfirinas, cianetos e ftalocianetos podem ser usados. Outros óxidos metálicos também se mostram como bases viáveis para estas células. A Figura 2.17 ilustra algumas células com esta tecnologia.



Figura 2.17: Aspecto visual de células Grätzel.

2.3.5 Células Poliméricas/Orgânicas

Outra classe de células solares flexíveis, podem vir em diversas formas, tais como: células orgânicas (também ditas células plásticas) ou células químico-orgânicas. Esta tecnologia é relativamente nova e é intensamente pesquisada em universidades e indústrias por todo o mundo.

Células poliméricas são leves, potencialmente descartáveis, e de baixo custo de fabricação. Flexíveis, e personalizáveis a nível molecular, possuem baixo potencial pra impactos ambientais negativos. As desvantagens são: a eficiência é cerca de 1/3 das células baseadas em silício, e são relativamente suscetíveis á degradação fotoquímica. Seu aspecto é mostrado na Figura 2.18.

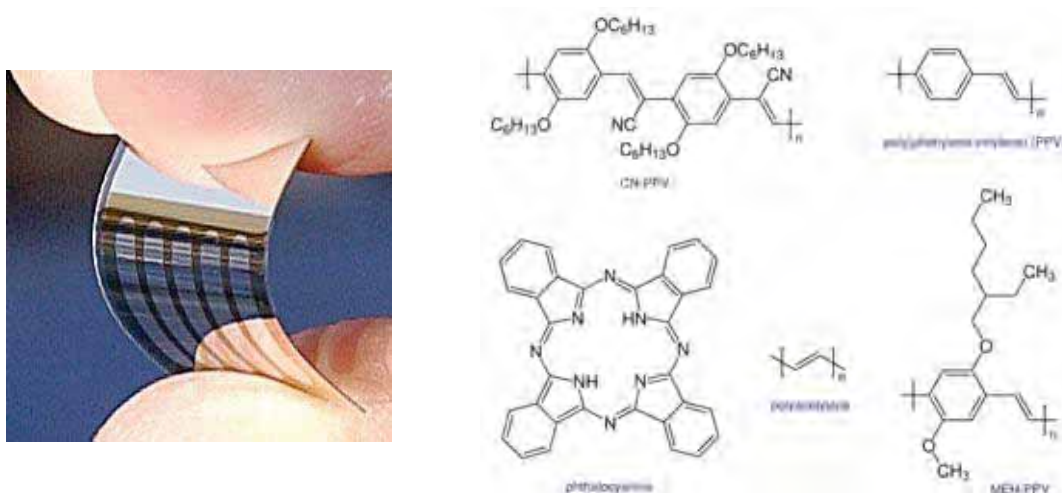


Figura 2.18: Célula orgânica. À esquerda: aspecto visual de uma célula plástica. À direita: alguns polímeros que exibem atividade fotoelétrica.

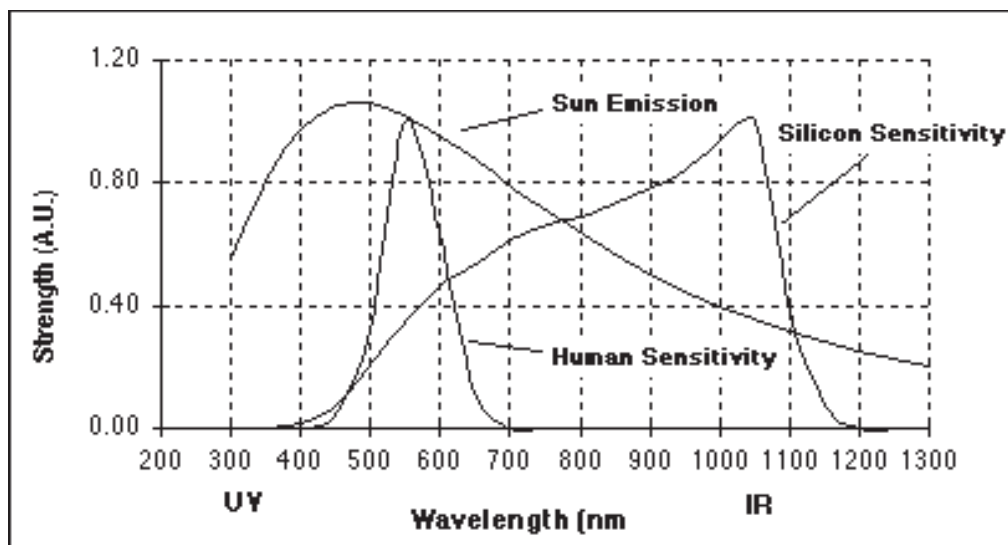
2.3.6 Células Multijunção

Uma das mais altas eficiências atingidas por células de unijunção é a de GaAs, com 28%, valor próximo do limite máximo teórico de 37%. Em geral as eficiências máximas de células unijunção deverão ficar em torno de 30%, limitadas pelo grau de aproveitamento permissível pelo espectro solar. Sob luz monocromática de 8.500 Å, ou seja, fótons com energia de 1,45 eV, estas células desenvolvem uma tensão em seus terminais de 1,1V. Como possuem um fator de preenchimento (FF – *fill factor*) de 0,85, tem-se o seguinte rendimento:

$$\eta = FF \frac{V}{E} \Rightarrow \eta = 0,85 \frac{1,1}{1,45} = 64\% \quad (3.1)$$

O melhor aproveitamento do espectro solar permitira eficiências muito superiores às atualmente obtidas. Como cada junção semicondutora tem uma banda proibida característica, e com isso picos diferentes de absorção, a combinação de mais de uma junção é uma técnica promissora para se atingir maiores rendimentos. Cálculos teóricos impõem como limites superiores eficiências de 42,5% para células com duas junções e de 50% para três junções. No limite para um grande número de junções, equivalendo a absorções monocromáticas, a eficiência chega a 60%. A distribuição espectral do Sol e a sensibilidade humana e do silício são mostradas na Figura 2.19. Notar como a resposta do Silício é muito mais elevada na região do infravermelho.

2.19:



Figura

Sensibilidade do olho humano e de junções de Silício contrastadas contra o espectro solar.

A figura 2.20 mostra os espectros usados na avaliação de painéis solares. O padrão AM0 indica que o espectro corresponde a zero massa atmosférica, logo no limiar do espaço. O espectro AM1 (não mostrado) corresponde ao espectro sofrendo incidência de uma massa atmosférica, ou seja, incidência direta da luz ao meio dia. O espectro AM1.5 representa uma média de ar percorrida pela luz “normalizada” ao longo do dia, sendo usada como padrão de avaliação.

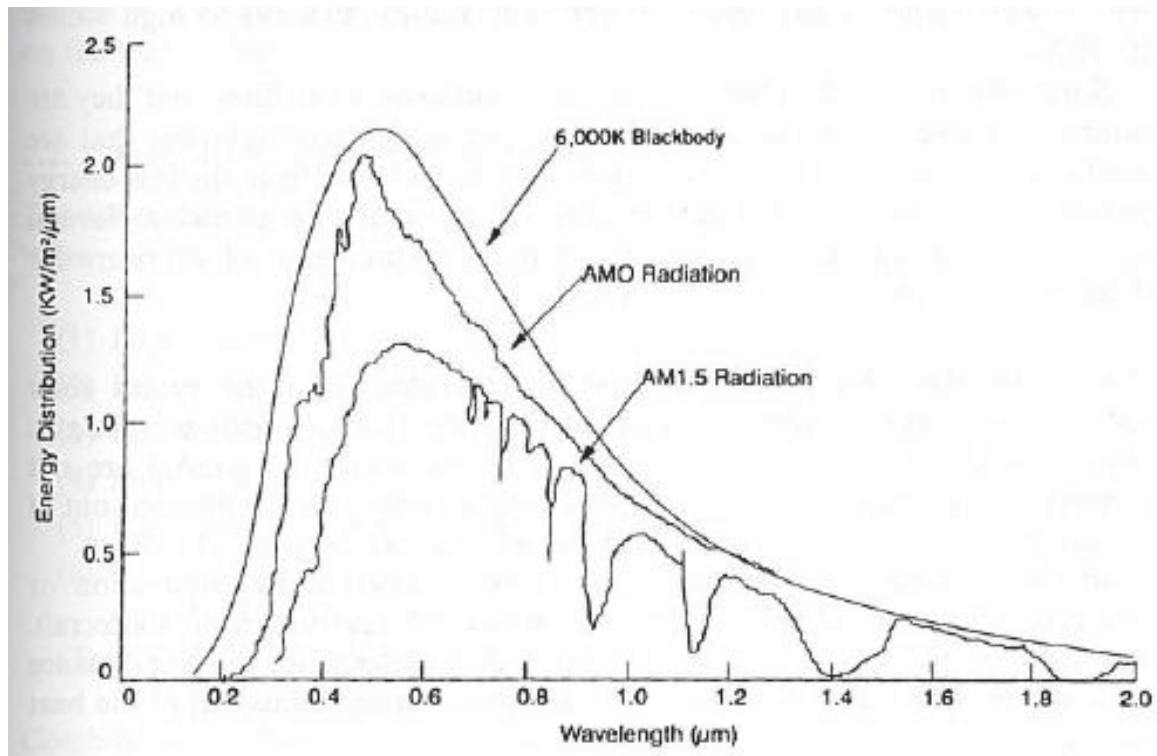


Figura 2.20: Variação do espectro solar conforme a luz atravessa a atmosfera.

As ligas de semicondutores III-V (formados por elementos das famílias III A (13) e V A (15)) produzem grande variedade de energias de banda proibida, indo de valores menores que 0,5 eV à valores superiores à 2,0 eV, obtidos por compostos binários bem caracterizados, como o GaAs, o InP e o GaSb. Compostos ternários e quaternários como AlGaAs, GaInP₂, GaAsP, GaInAs e GaAsSb atingiram eficiências superiores a 30%, mas com diversos problemas como mal casamento das matrizes cristalinas, controle da composição ternária, pureza de materiais, dentre outros.

A dupla junção de GaAs e GaSb foi proposta em 1987, com energias de 1,42 eV e 0,72eV, respectivamente, caindo em um dois picos de eficiência em aplicações terrestres, com máximo local de 41% previsto. Em laboratório, atingiram 35% de eficiência. Até 1992, as seguintes junções também superaram a marca da unijunção de GaAs: AlGaAs/GaAs,

GaInP₂/GaAs, GaAs/Si, GaAs/CuInSe₂ e InP/GaInAs₂. As duas primeiras estão mais distantes da eficiência máxima, pois a dupla junção não privilegia bem a absorção da faixa do infravermelho, sendo as células de InP/GaInAs₂ e de GaAs/GaSb as mais promissoras (Partein, 1995).

Tais células admitem duas configurações: junções monolíticas e empilhamento mecânico das células conjuntas. Estruturas monolíticas em geral são criadas com o uso do processo MOCVD. Entre cada junção há um diodo túnel, conectando-as em série. No caso de uma célula monolítica de GaInP₂/GaAs, a célula de GaInP₂ (camada tipo-n sobre camada tipo-p) foi depositada sobre uma junção túnel de GaAs (camadas finas, p⁺ sobre n⁺), que por sua vez recobre uma célula de GaAs (n sobre p). No topo de cada célula, ainda se tem uma camada que atua como janela, AlGaAs para a célula inferior e AlInP₂ para a célula superior. O resultado final é uma célula monolítica de dois terminais, depositada numa só pastilha, em que se usaram três ligas ternárias, cinco elementos, fora os dopantes e o tratamento anti-reflexo. Por estarem ligadas em série, é importante que a corrente gerada por ambas as células seja igual, senão a junção menos efetiva será limitante e derrubará a eficiência do conjunto. Tal fator é controlado pela espessura das camadas e da composição da célula de GaInP₂. Como dito, o fato de ser um dispositivo de dois terminais é o maior atrativo desta configuração.

Em termos de manipulação de materiais, a configuração por empilhamento mecânico é mais simples. Ela faz uso de dois chips retangulares, cuja área de iluminação não é centrada. Neste caso, a célula superior, de GaAs, possui uma distribuição dos contatos metálicos em padrões que não a recobrem totalmente tanto em sua superfície superior quanto na inferior, para permitir que luz infravermelha a atravessasse para iluminar a célula de GaSb. Os chips são montados a 90° um do outro e colados com um adesivo transparente, conforme a Figura 2.21. O resultado é um dispositivo de quatro terminais, cujas junções podem ser separadamente acessadas. Outra vantagem desta configuração é que as células podem ser manufaturadas através de um simples processo de difusão, eliminando o uso de gases tóxicos do processo. Contudo, como desvantagens têm-se a necessidade de mais espaço e da maior complexidade para se efetuar conexão entre as células e o uso de duas ao invés de uma única pastilha.

Além do maior número de terminais a serem conectados, há outro empecilho em células empilhadas: o casamento de tensão entre as células. Para a célula de GaAs/GaSb, há uma relação de cerca 1:3 nas tensões desenvolvidas pelas célula superior e inferior. Tal problema foi contornado fazendo as estruturas justapostas serem agrupadas de três em três, com as células superiores ligadas em paralelo, as células inferiores em série e depois em

paralelo com o resto do arranjo, que pode ser acomodado em fitas TAB (*tape automated bonding*), apresentado na Figura 2.22. Uma associação de três células é exibida na Figura 2.23.

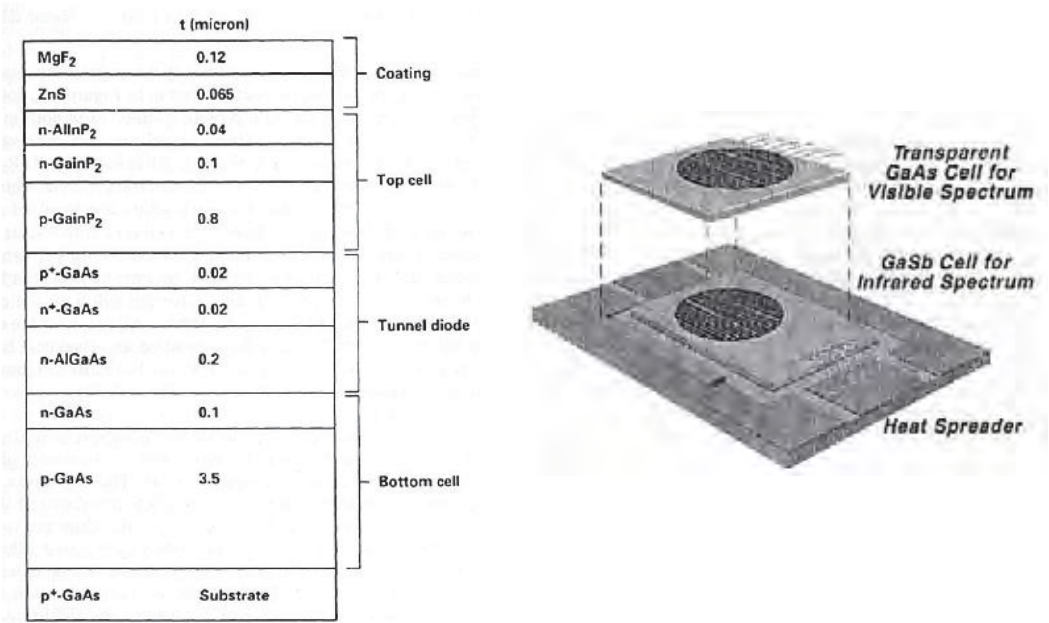


Figura 2.21: Estrutura de uma célula em pilha de GaAs/GaSb .

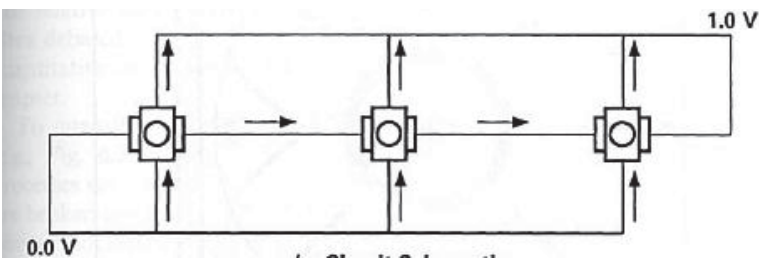


Figura 2.22: Células empilhadas associadas para casar suas tensões.

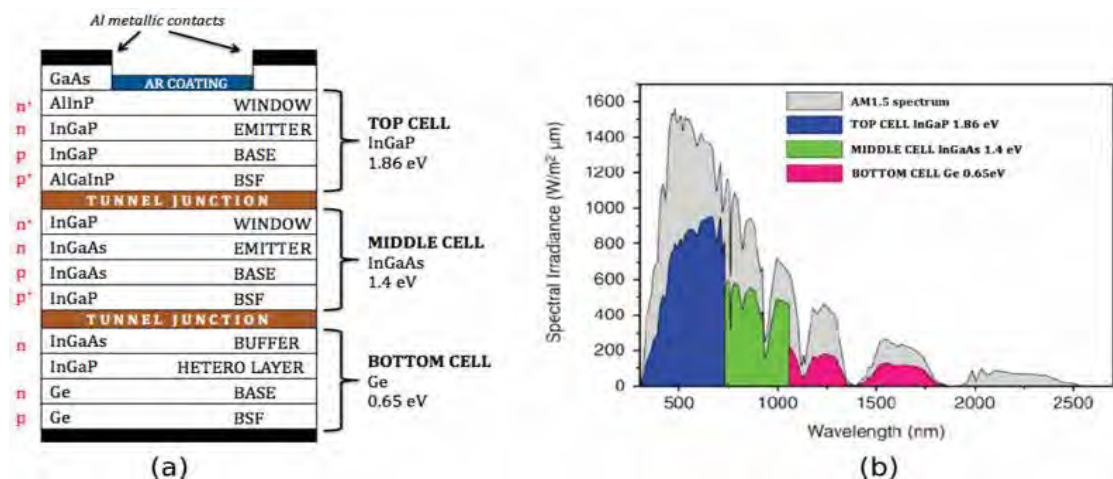


Figura 2.23: Célula com três junções. (a): Estrutura da célula; (b): Aproveitamento do espectro AM1.5.

2.4 Módulos Fotovoltaicos

O módulo ou painel fotovoltaico é a menor estrutura capaz de aproveitamento de luz manuseável por um usuário. A adoção de estruturas modulares permite grande versatilidade, já que interconexões série e paralelo podem ser feitas conforme as necessidades de tensão e corrente das cargas atendidas. Tais estruturas, por ficarem expostas às intempéries, precisam ser confiáveis para se atingir a vida útil desejada. Hoje, costuma-se encontrar garantias de 20 anos ou mais para painéis solares (Parteín, 1995).

As atuais técnicas de fabricação de painéis são derivadas dos esforços do Departamento de Energia dos Estados Unidos, em um programa ativo no início da década de 1980 e administrado pelo JPL (*Jet Propulsion Laboratory*), cuja meta era trabalhar na resolução de problemas relativos à manufatura de sistemas fotovoltaicos. Atividades em outros países, ainda que independentes, atingiram resultados parecidos, sendo que para células em Silício, o método é praticamente o mesmo.

Uma vez produzidas as células solares, estas são conectadas entre si, de modo a configurarem as características de tensão e corrente do módulo. Inicialmente, as células eram postas entre duas camadas de vidro, que eram presas por uma cola de silicone. A cura desta cola demorava dias, além de ser um processo caro e sujo. Hoje o silicone foi trocado por folhas de PVB (Polivinil Butiral) ou o que é mais comum em aplicações comerciais, EVA

(Etil Vinil Acetato), mais barato, de mais fácil armazenamento, causa menos esforços mecânicos nas células, menos permeável à umidade e mais estável que o PVB. A base de montagem de vidro foi substituída por lâminas metálicas ou de plástico, como PVF (Polifluoreto de Vinila), enquanto a cobertura exposta à luz usa vidro temperado com baixo teor de Ferro. O PVB ou EVA é curado a 150 °C, sob vácuo de 500 mTorr (66,66 Pa ou 6,8 atm). Um sistema de agitação garante que o plástico se infunda por todas as frestas. O resultado é mostrado na Figura 2.24

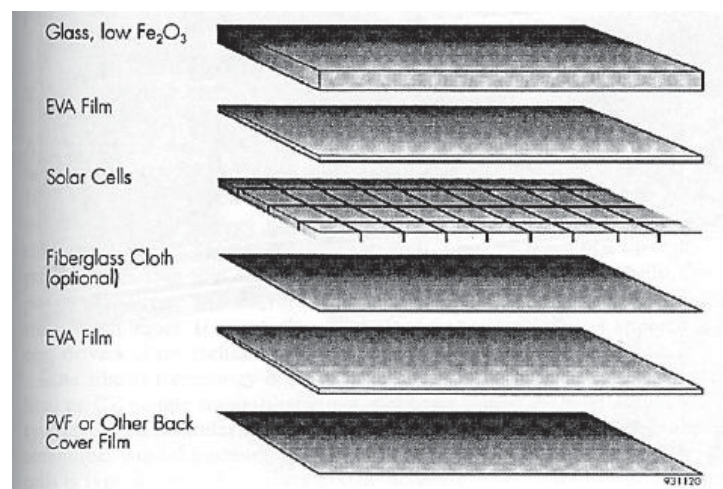


Figura 2.24: Estrutura de um módulo fotovoltaico.

2.4.1 Módulos com concentradores

O uso de concentradores é um meio direto de se obter viabilização econômica da energia solar em curto prazo. A idéia é substituir o custo, para uma dada área de painéis, das células por um custo menor, o dos concentradores, que compensam a menor quantidade de células com maior incidência de fótons nas células disponíveis.

Duas abordagens foram feitas, uma com um sistema óptico refletor, como heliostatos e pratos parabólicos e outra com sistema óptico refrator, como lentes acrílicas. Os sistemas refratores levam vantagem sobre os refletores em termos de custo do acrílico em relação ao custo de espelhos de vidro, melhor eficiência óptica, pois a luz percorre apenas uma vez superfícies expostas ao tempo, à sujeira e à geometria, permitindo maior margem de erro ao rastrear o Sol. O uso de óptica refratora pode ser feito com lentes curvas ou lentes de Fresnel,

largamente adotadas em função do custo. Tais lentes em geral são seguidas de uma segunda óptica refletora, para ampliar a margem de erro de rastreo do Sol e para uniformizar o fluxo luminoso. Devido aos altos níveis de concentração, podendo chegar à 1000x, há necessidade de se evitar o excessivo aquecimento das células já que isso diminui seu rendimento. Dissipadores são acoplados aos módulos para garantir uma boa refrigeração. Esta composição é retratada na Figura 2.25.

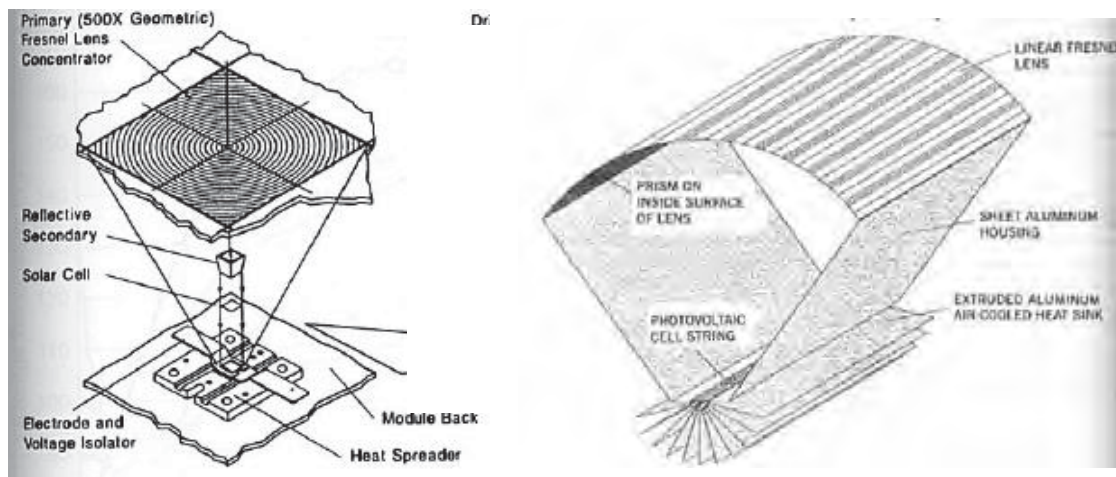


Figura 2.25: Módulos com concentradores. À esquerda: Módulos que usam lentes com ponto focal. À direita, módulos com lentes com linha focal.

Dois tipos de lentes são comumente usados: lentes com ponto focal e lentes com linha focal. As primeiras, devido ao foco bem definido, exigem que se faça rastreamento em dois eixos do Sol, para atuar com eficiência, enquanto as últimas permitem rastreo em apenas um eixo, barateando o sistema, contudo não alcançam taxas muito altas de concentração de luz.

2.4.2 Módulos de células de filmes finos

Módulos de células de filmes finos podem ser produzidos pelo mesmo processo que se usa para outros tipos de célula, como as de silício cristalino. Contudo, para melhor explorar outras propriedades oferecidas pelos filmes finos, variações do processo foram desenvolvidas.

2.4.2.1 Células Translúcidas/Semitransparentes

Estas células podem ao mesmo tempo prover energia elétrica e iluminação natural, havendo dois tipos, conforme a opacidade do material usado. O primeiro, se o material for transparente, é uma célula depositada em substrato também transparente, permitindo a passagem de luz. O segundo, caso o semiconductor seja muito opaco, é uma estrutura depositada em vidro, cheia de pequenas aberturas sem deposição que permitem a passagem de luz, conforme a Figura 2.26.

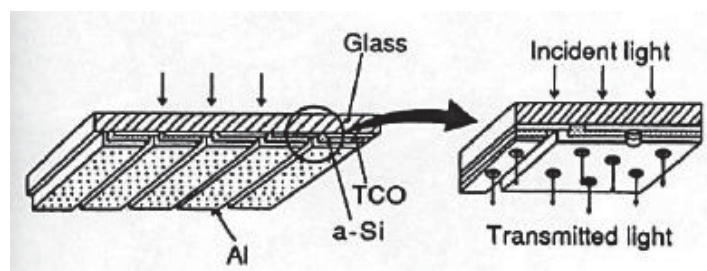


Figura 2.26: Célula translúcida de filme fino.

2.4.2.2 Células Flexíveis/Ultra Leves

Usando a-Si:H em um substrato plástico flexível e de baixo peso. Tais células solares possuem uma capacidade de geração de 0.27 W/g, superior à capacidade de células GaAs, que ficam em 0.25 W/g para aplicações espaciais. Contudo, devido a menor eficiência, uma área maior é necessária para a mesma uma mesma potência. Muitas destas células acabam sendo integradas em elementos arquitetônicos, principalmente grandes superfícies com telhas ou paredes de edifícios.

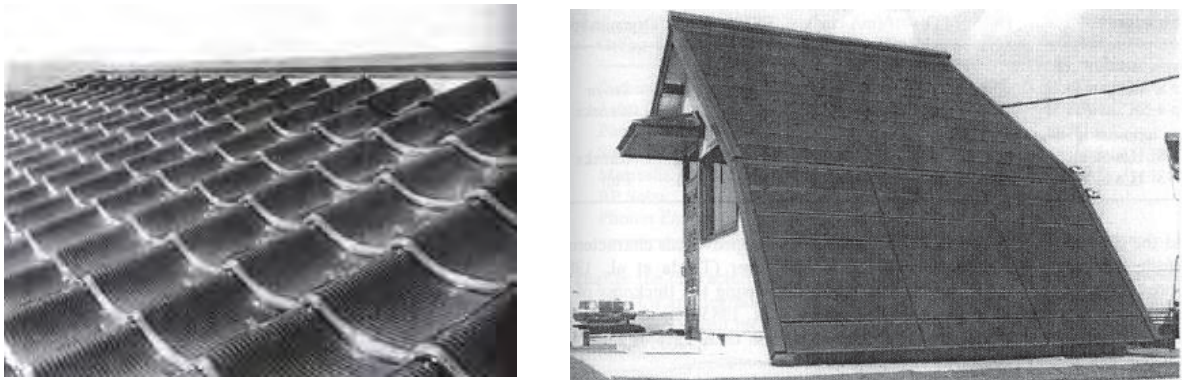


Figura 2.27: Integração arquitetônica de módulos fotovoltaicos.

2.4.3 Diodos de Proteção

Na constituição de um painel solar, as células são interconectadas entre si, compondo cordões em série para se atingir uma dada tensão e em paralelo para se obter a corrente de serviço. Durante sua operação, seja por erros de rastreio, por desalinhamento da óptica usada ou por presença de sombras, uma das células ou cordão de células reduz sua tensão de trabalho, ou mesmo pára de produzir potencia, podendo chegar a ser reversamente polarizada pelas demais células, concorrendo para um curto circuito catastrófico. Como método de proteção, diodos devem ser incluídos ao longo da distribuição das células para prevenir incidentes desta ordem. Em geral, estes diodos *shunt* são postos em paralelo com cada cordão de células, permitindo sua operação em caso de sombra ou falha de uma das células, limitando a corrente sobre aquele cordão.

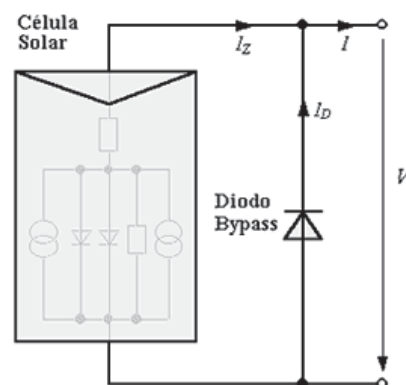


Figura 2.28: Diodo Bypass. O objetivo de sua inclusão no circuito é proteger o sistema de falha catastrófica induzida por sombras ou células defeituosas (CRESESB, 2011).

3 TOPOLOGIAS DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA

3.1 Definição de Sistema Fotovoltaico e suas Aplicações

Sistema de geração fotovoltaico é o conjunto destinado a extrair energia da luz solar, composto por pelo menos um painel solar, pelas estruturas de sustentação física dos painéis, o sistema de armazenamento de energia (se desejado), um inversor de frequência (para atender cargas AC), dispositivos de controle e proteção.

Os sistemas na escala de megawatts ainda não são totalmente competitivos com as gerações convencionais de energia, mas sua penetração no mercado tem se desenvolvido nesta direção. O grosso do mercado atual de energia solar visa atender um constante crescimento em aplicações ilhadas, como na área de eletrificação rural ou de pequenos sistemas elétricos como repetidores de sinal em telefonia móvel. Tipicamente estes sistemas consomem no máximo algumas dezenas de quilowatts, acompanhados de baterias para reserva de energia e em geral não rastreiam o Sol, oferecendo melhor relação custo-benefício que outras opções, como a conexão à rede de distribuição, e grupos geradores.

3.2 Sistemas Isolados

Sistemas isolados, em geral, utilizam-se alguma forma de armazenamento de energia. Este armazenamento pode ser feito através de baterias, quando se deseja utilizar aparelhos elétricos ou em forma de energia gravitacional ao se bombear água para tanques em sistemas de abastecimento. Há sistemas que fazem uso de armazenamento pneumático de energia. Alguns sistemas isolados não necessitam de armazenamento, o que é o caso da irrigação onde toda a água bombeada é diretamente consumida ou estocada em reservatórios (Ter-Gazarian, 1994).

Em sistemas que necessitam de armazenamento de energia em baterias, usa-se um dispositivo para controlar a carga e a descarga da mesma. O controlador de carga tem como principal função não deixar que haja danos na bateria por sobrecarga ou descarga profunda. O controlador de carga é usado em sistemas pequenos onde os aparelhos utilizados são de baixa tensão e corrente contínua (CC).

Para alimentação de equipamentos de corrente alternada (CA) é necessário um inversor. Este dispositivo geralmente incorpora um seguidor de ponto de máxima potência necessário para otimização da potência final produzida. Este sistema é usado quando se deseja mais conforto na utilização de eletrodomésticos. O conjunto de associações possíveis está ilustrado na Figura 3.1. Nesta figura, além de ligações com eletrônica de controle, também são apresentadas ligações diretas do painel com as cargas, opção muito pouco utilizada em função da dificuldade de se encontrar painéis solares cujas características elétricas são totalmente casadas com as da carga.

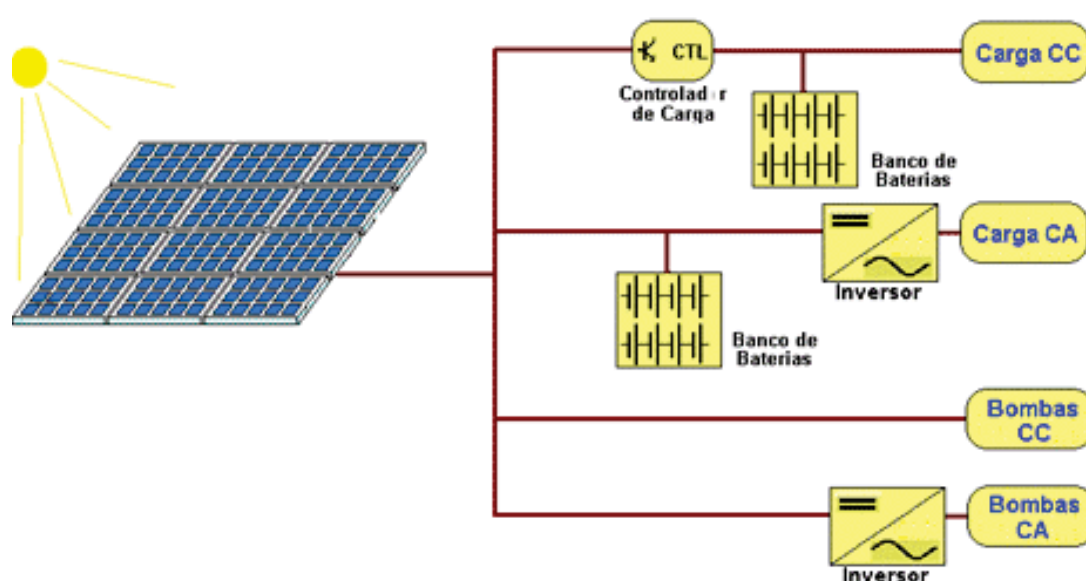


Figura 3.1: Sistema de geração isolado.

3.3 Sistemas Híbridos

Esta é a denominação dada para qualquer sistema que integra mais de uma forma de se obter energia. O uso de um gerador a diesel no sistema é uma opção híbrida. Também ganhando espaço estão as híbridas térmicas que também provêem água quente para abastecimento.

3.4 Sistemas Centralizados

Os sistemas centralizados conectados à rede executam a função de estações centralizadas de energia. A fonte de alimentação por tal sistema não é associada com um cliente particular da eletricidade. Estes sistemas são tipicamente instalados em a certa distância do ponto de consumo. A Figura 3.2 ilustra um parque desta modalidade feito pela Alemanha.



Figura 3.2: Complexo Waldpolenz, Brandis, Alemanha. A capacidade instalada na ocasião da foto é de 6MW. (Energias Renováveis,2009)

3.5 Sistemas Distribuídos

Em contraste com os métodos de geração centralizados, comumente vistos hoje por aproveitar fatores de economia de escala, mas presos à necessidade de transmitir energia por longas distâncias, a adoção de um sistema modular de energia fotovoltaica permite o uso de outro paradigma no fornecimento de energia – a geração distribuída. Uma série de pequenos blocos geradores, por exemplo, integrados à zona urbana, passaria a gerar localmente parte da energia necessária à manutenção local, *em paralelo com a rede*. Conforme as condições vigentes, caso haja um excesso de potência gerada, esta será entregue à malha de energia, contabilizando créditos para aquele fornecedor. Durante períodos de baixa insolação ou no

decorrer de picos de demanda, a rede centralizada se mantém como fonte para as cargas locais.

Diversos países já permitem a integração de redes domésticas à malha principal através de medidores de energia especiais, principalmente na Europa (Partein, 1995). Muitas residências com grande área instalada de painéis são auto-suficientes ou mesmo credoras de concessionárias. Um dos fatores que limita a velocidade de expansão deste meio de geração são os custos do medidor, os limites de tolerância que tem que ser impostos ao consumidor que optar por interligar sua geração local à rede, para que a operação seja feita de modo seguro e com qualidade e principalmente o *lobby* de concessionárias de energia que podem perder fatia significativa de consumidores, e mesmo acabar como credora deles, embora haja o interesse tanto do governo, tanto quanto da sociedade para se atender ao crescimento da demanda de energia.

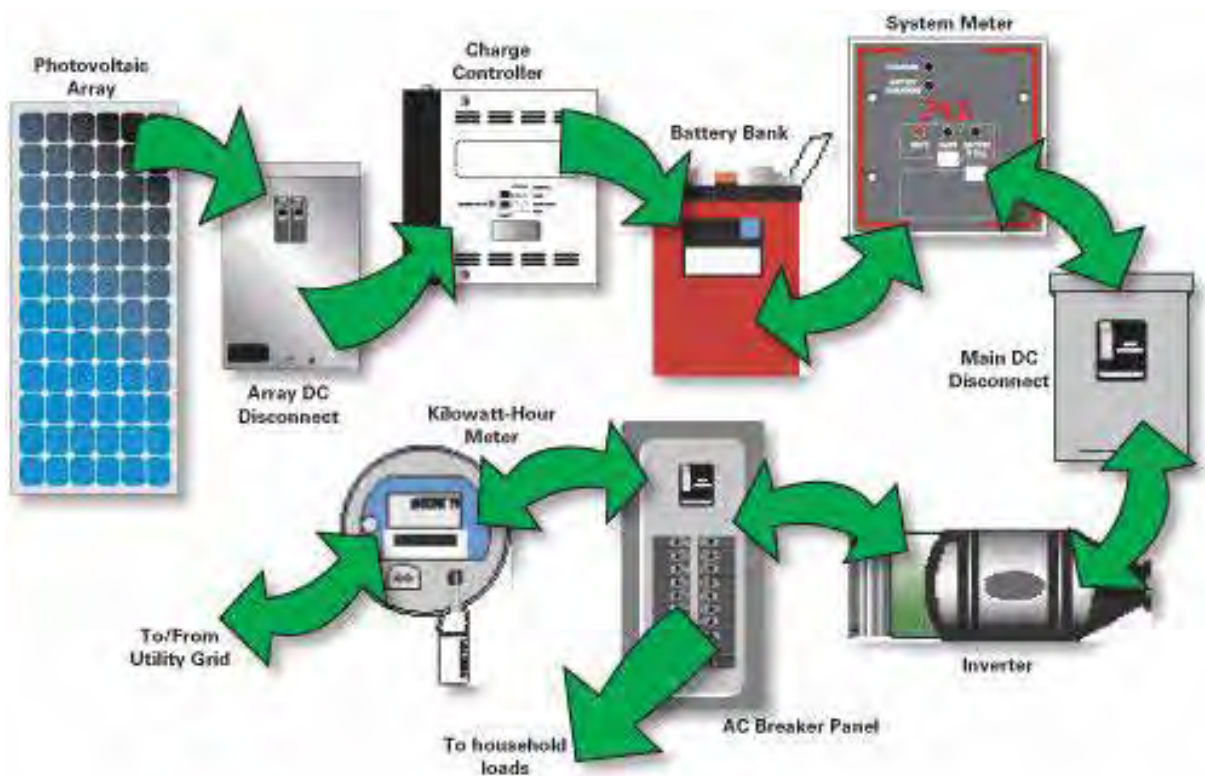


Figura 3.3: Equipamentos típicos de um sistema interligado á rede de distribuição (Nevada Wind and Solar, 2011).

Os equipamentos necessários ao funcionamento de um sistema ligado à rede estão na Figura 3.3. O medidor de potência deve ser capaz de sincronizar a geração à rede, bem como identificar fluxo de ativo e reativo em ambos os sentidos. A implantação desse sistema

também implica em um regime diferenciado de tarifação, onde distorções na qualidade de energia também são avaliadas.

4 CONDICIONAMENTO DE ENERGIA

Para se atender de maneira apropriada as cargas a serem conectadas a um sistema alternativo de energia, como se propõe fazer com a energia solar, é necessário entender como a fonte de energia opera e que equipamentos podem ser usados para condicioná-la de modo a atender o usuário. Este capítulo apresenta o equipamento necessário para tal: a modelagem de um painel solar, conversores DC/DC, cujo objetivo é levar a tensão obtida para os níveis desejados, sistemas inversores para fornecer tensão e corrente alternadas e as chaves de transferência, um sistema capaz de comutar entre a fonte alternativa e a rede.

4.1 Características e Modelo Elétrico de um Painel Solar

Um painel solar é caracterizado como um gerador não ideal, com características não lineares em sua tensão e corrente. Tomando a tensão como base, um painel apresentará curvas como a da Figura 4.1 (Marques, 2009).

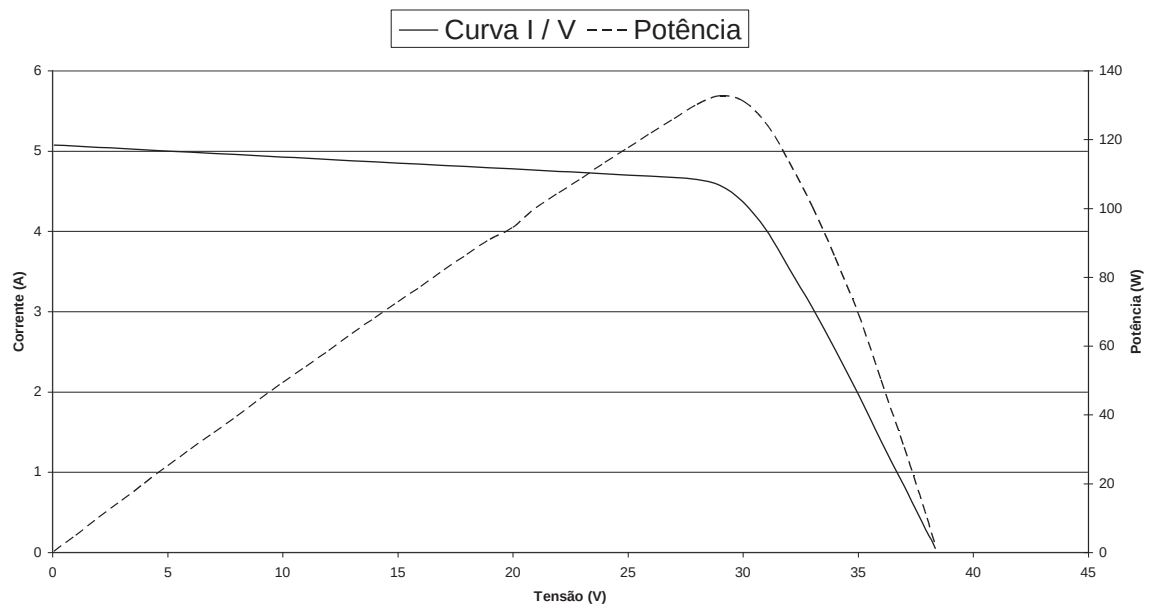


Figura 4.1: Curvas características de um painel solar. Em linha contínua, tem-se a dependência da corrente com a tensão nos terminais do painel. Em tracejado, a potência em função da tensão nos terminais do painel.

O painel ideal consiste em uma fonte de corrente contínua em paralelo com um diodo. Tal associação é conectada à carga. O valor da corrente que o painel é capaz de prover é função da radiação que incide sobre sua área, enquanto a corrente que é desviada pelo diodo reflete o comportamento das junções que compõem as células do painel. O modelo real compreende resistências equivalentes a fatores de perdas no módulo, como fugas e conexões elétricas internas, representados por resistores em paralelo com o diodo e em série com os terminais, conforme Figura 4.2.

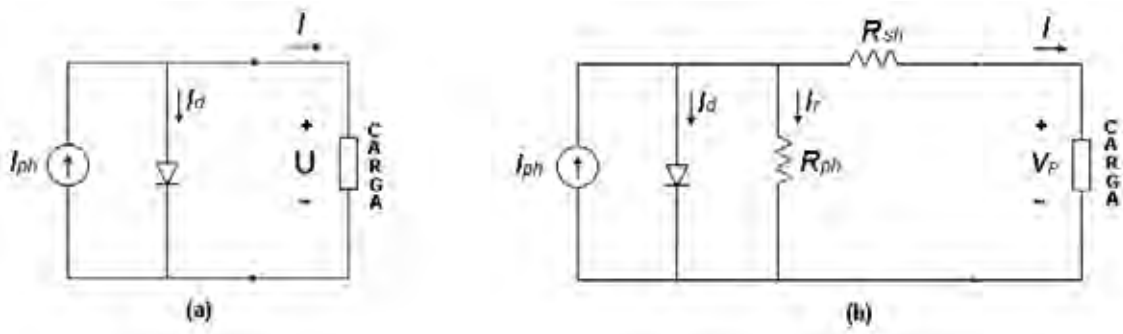


Figura 4.2: Circuitos equivalentes de uma célula solar. (a) Circuito sem perdas; (b) Circuito com perdas.

O circuito apresentado é regido pelas seguintes relações:

$$I = I_{ph} - I_d - I_r \quad (4.1)$$

A corrente desenvolvida por um painel é função da radiação incidente, bem como de sua temperatura de trabalho. Na equação 6.2, T é a temperatura, T_{ref} a temperatura de referência, J_0 o coeficiente de temperatura do painel, S a potência incidente, em w/m^2 , e S_{ref} a irradiação de referência.

$$I_{ph} = (I_{SC} + J_0[T - T_{ref}]) \frac{S}{S_{ref}} \quad (4.2)$$

$$I_d = I_0 \left(e^{\frac{q[IR_{sh} + V]}{N_s n K T}} - 1 \right) \quad (4.3)$$

$$I_0 = I_{DO} \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^3 e^{\frac{qE_g}{nK} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right)} \quad (4.4)$$

$$I_{DO} = \frac{I_{SC}}{e^{\left(\frac{qV_{OC}}{N_S n K T} - 1\right)}} \quad (4.5)$$

Onde I_d é a corrente no diodo, I_0 a corrente reversa do diodo, I_{DO} uma constante dependente das características fixas do painel, I_{SC} que é a corrente de curto circuito, e V_{OC} , tensão do painel sem carga. E_g é a banda de energia do semicondutor.

As resistências encontradas no modelo real são determinadas por 4.6 e 4.7, Onde V_{MPPT} é a tensão de máxima potência e I_{MPPT} a corrente de máxima potência.

$$R_{sh} = \frac{V_{OC} - V_{MPPT}}{I_{MPPT}} \quad (4.6)$$

$$R_{ph} = \frac{V_{OC}}{I_{SC} - I_{MPPT}} \quad (4.7)$$

Comercialmente, os painéis solares são especificados por sua potência de pico, tensão em aberto e corrente de curto-circuito, sob temperatura ambiente e um espectro AM1.5, conforme indicado na figura 2.20. As características das curvas de tensão e corrente sofrem variações com a temperatura, insolação e ângulo de incidência. A última variação é proporcional ao cosseno do ângulo com a normal do painel, e equivale a uma redução na área útil do mesmo. As demais alterações são regidas pelas expressões 4.2 à 4.5, sendo detalhadas graficamente pela figura 4.3.

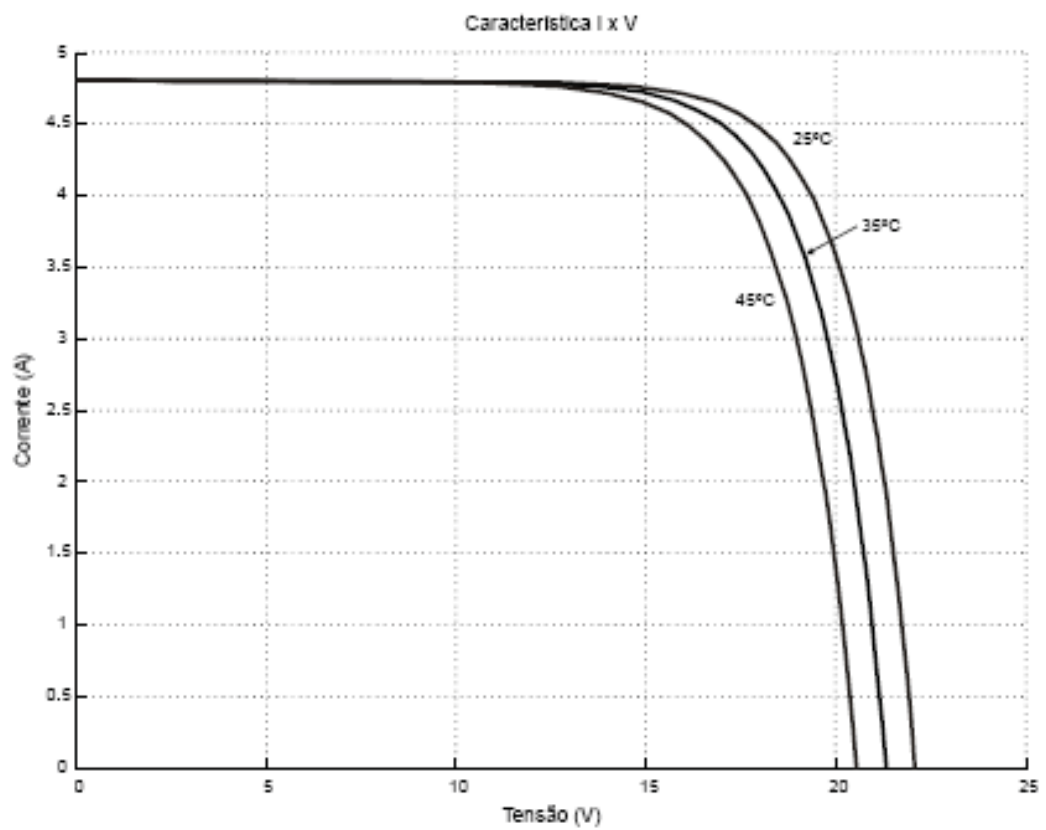
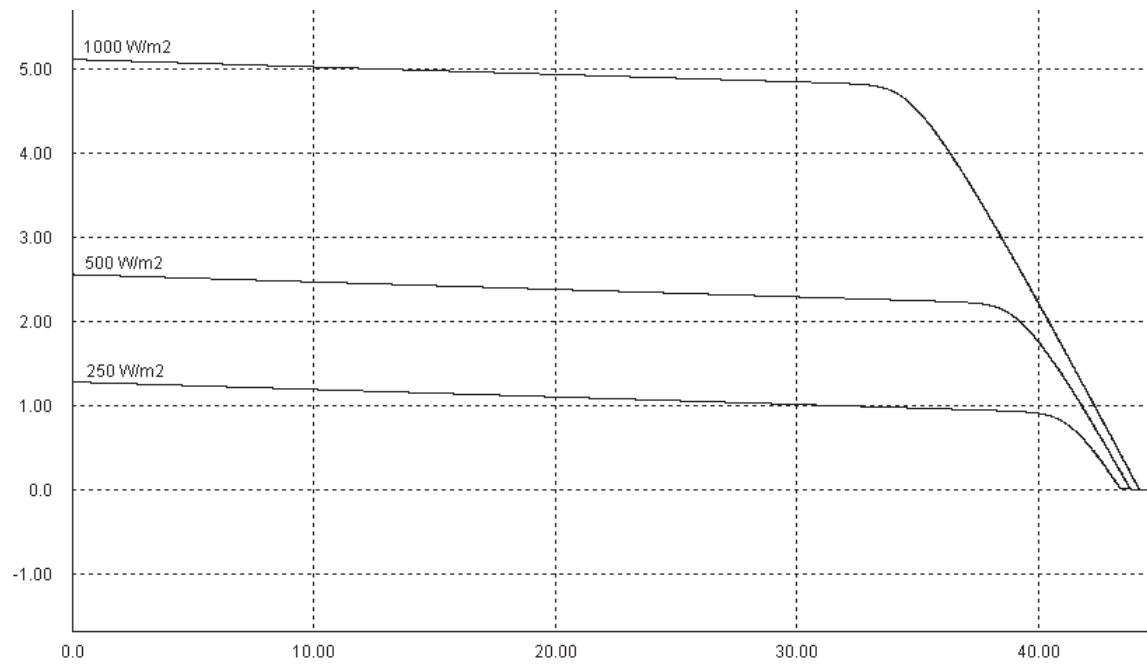


Figura 4.3: Variação nas curvas características de um painel em função da insolação e da temperatura.

4.2 Conversores DC/DC

Nem sempre a tensão de trabalho de um painel será adequada para alimentar a carga, seja porque o painel não é capaz de atingi-la, ou porque sua tensão seja superior á desejada, ou mesmo pela ocorrência de sombras. O ajuste das características elétricas do painel pode ser feito através do uso de *choppers* ou fontes chaveadas. As topologias básicas capazes de cumprir esta tarefa são apresentadas a seguir:

4.2.1 Conversores Step-Down ou Buck

Topologia de circuito que permite a redução da tensão de entrada. Seu funcionamento se baseia no Teorema da Média, que afirma que o valor médio de uma função é dado pela área desta função dividida pelo intervalo de interesse. Com isso, ao se chavear uma tensão contínua de maneira periódica, o seu valor médio cai, já que em média, o circuito conduz por menos tempo que quando não está sendo chaveado. Isso é mostrado pela figura 4.4 (Nassabay, 2011).

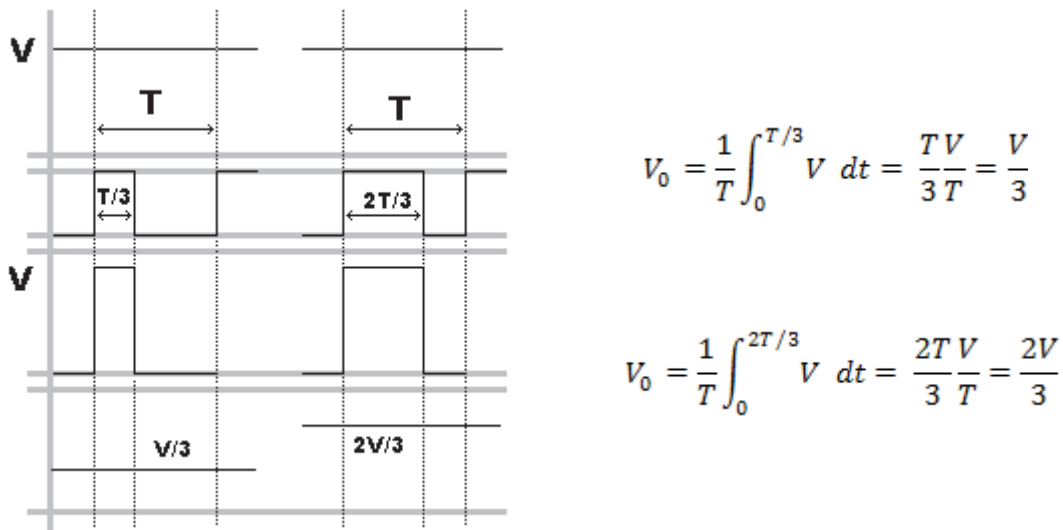


Figura 4.4: Funcionamento de um conversor Buck.

Define-se a razão entre o tempo de condução e o período total como o ciclo de trabalho ou “*duty cycle*” da fonte, sendo representado por δ .

Um meio de se chavear uma entrada DC e obter uma saída reduzida é o uso do circuito da figura 6.5, que também apresenta as formas de onda de tensão e corrente típicas para a

topologia. Quando o transistor conduz, a tensão sobre o diodo da Figura 4.6 é $V_E - V_{CEsat}$, sendo que o diodo está reversamente polarizado, circulando corrente pelo transistor e pelo indutor. A corrente no indutor cresce de um valor inicial não nulo até um valor superior, repondo a energia perdida durante o período em que o transistor esteve cortado (corrente de magnetização). Admitindo-se que a tensão de saída é constante, as correntes no indutor são lineares e, portanto, a variação de corrente no período é dada por:

$$\Delta I_L = I_{mg} \cong \frac{(V_E - V_S)T_{ON}}{L} = \frac{V_e \delta (1 - \delta)}{Lf} \quad (4.8)$$

Quando o transistor entra em corte, para não haver interrupção na corrente pelo circuito, o indutor força a condução do diodo (conhecido como diodo de retorno, pois tem a função de prover caminho de corrente para o indutor durante o período de corte do transistor), fazendo a tensão no diodo fixar-se em -0,6 Volts. Neste intervalo a corrente no indutor decresce fornecendo energia à carga de saída (corrente de desmagnetização). A variação de corrente é dada por:

$$\Delta I_L = I_{dmg} \cong \frac{V_E T_{OFF}}{L} = \frac{V_s (1 - \delta)}{Lf} \quad (4.9)$$

Tais correntes dependem apenas da tensão de entrada e da tensão de saída, sendo completamente independentes da corrente média no indutor ou corrente de carga de saída, portanto, a ondulação de corrente no indutor não depende da corrente de carga de saída. Ao se reduzir a corrente de carga, a corrente média no indutor deverá cair, mas a ondulação de corrente no indutor não deverá se alterar.

Supondo que a resistência série do indutor é desprezível, tem-se que a tensão DC no resistor de carga será dada pelo valor médio da tensão de entrada.

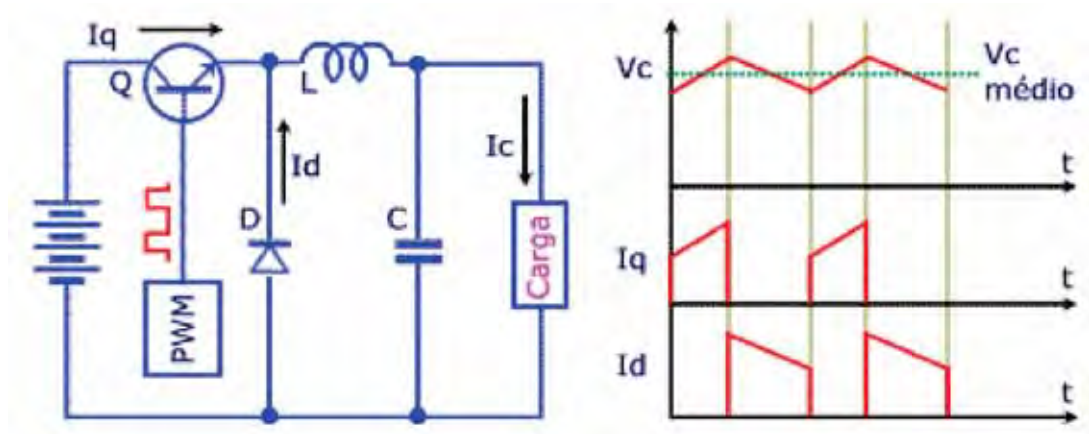


Figura 6.5: Conversor Buck – Tensões e Correntes.

Se a corrente de carga de saída for reduzida excessivamente, a corrente no indutor poderá se anular. Esta situação, que corresponde ao limiar do modo de operação contínuo, corresponde a:

$$I_{Smin} = \frac{\delta(1-\delta)V_E}{2Lf} \quad (4.10)$$

Para evitar que a corrente de saída caia abaixo de I_{Smin} ; em geral é colocado um resistor *shunt* interno à fonte, em paralelo com o capacitor. O valor do indutor que fornece I_{Smin} é dado por:

$$I_{Cmax} > 2I_{Smin} \quad (4.11)$$

A escolha do capacitor deve levar em consideração o comportamento em regime permanente e a resposta aos transientes de corrente de saída da fonte.

A ondulação de saída pode ser calculada através da integral da corrente no capacitor mostrada na figura 6.5. Assim:

$$\Delta V_C = \frac{\delta(1-\delta)V_E}{8LCf^2} \Rightarrow C = \frac{\delta_{min}(1-\delta_{min})V_{Emax}}{8L\Delta V_C f^2} \quad (4.12)$$

Expressão que permite, para um dado valor de ΔV_C , calcular o valor do capacitor a ser colocado em paralelo com a carga.

Na prática, o valor de ondulação de saída é muito maior do que o estimado pela expressão 6.12 devido ao fato dos capacitores apresentarem uma resistência série R_{eqC} que geram uma ondulação triangular adicional que acompanha a corrente de magnetização e desmagnetização do indutor. Esta ondulação é dada por:

$$\Delta V_{ReqC} = I_{mg} R_{eqC} (V_{pp}) \quad (4.13)$$

Para uma melhor resposta da fonte aos transitórios de corrente de saída, normalmente se utiliza um capacitor de valor muito maior do que o calculado pela expressão 4.12. Logo, a ondulação de saída será dada predominantemente pela resistência série do capacitor sendo seu valor máximo estimado pela seguinte equação:

$$\Delta V_{ReqC \max} = 2I_{Smin} R_{eqC} \quad (4.14)$$

Na determinação da função de transferência de conversor ($V_S = \delta V$), supõe-se que eventuais variações da corrente de saída sejam absorvidas pelo indutor e capacitor de modo a manter a tensão de saída constante. Contudo, ao se analisar o que ocorre no instante da variação da corrente de saída, observa-se pequenas perturbações na tensão de saída, conforme ilustrado na Figura 4.6.

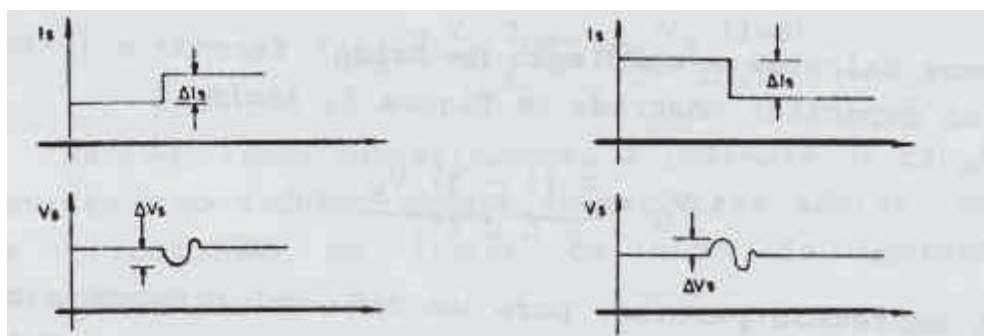


Figura 4.6: Resposta a transientes de corrente.

A subtensão ΔV_{S1} e a sobre tensão ΔV_{S2} podem ser calculadas a partir das seguintes expressões:

$$\Delta V_{S1} = \frac{\delta_{max} L \Delta I_S^2}{(1 - \delta_{max}) C V_S} \quad (4.15)$$

$$\Delta V_{S2} = \frac{L \Delta I_S^2}{C V_S} \quad (4.16)$$

Com isso se torna evidente que, para a redução da perturbação da tensão de saída, é necessário elevar a capacitância, uma vez que a indutância não pode ser reduzida abaixo do valor L_{min} (KOFUJI).

Limitando a escolha do transistor, tem-se:

I) Tensão V_{CE} máxima:

$$V_{CEO} = 1,2(V_{Emax} + V_D) \quad (6.17)$$

II) Corrente I_C :

$$I_{Cmax} > 2I_{Smax} \quad (6.18)$$

III) Potência

A potência dissipada no transistor é dada pela soma da potência dissipada no período de condução e da potência dissipada no chaveamento (comutação), dadas por:

$$P_T > P_D = P_{cond} + P_{chav} = V_{CEsat} I_S \delta + V_E I_S \frac{(t_s - t_q)}{2T} \quad (6.19)$$

Onde:

t_s = tempo de comutação do transistor para o estado saturado

t_q = tempo de comutação do transistor para o estado de corte

O transistor deverá ainda apresentar tempos de comutação reduzidos de forma a minimizar a potência dissipada na comutação.

Os diodos utilizados em conversores DC/DC devem ter duas características principais: baixa tensão direta de condução e baixo tempo de recuperação. A tensão direta de condução é um parâmetro importante na construção, pois quanto maior for V_D , maior será a potência dissipada pelo diodo e, conseqüentemente, menor o rendimento. Em geral são empregados *diodos Schottky* por apresentar tensão de condução inferior à dos diodos de silício convencionais. O tempo de recuperação t_{rr} (*reverse recovery time*) é o tempo necessário para levar um diodo da condução ao estado de corte. Se este tempo for muito elevado em relação ao tempo de subida t_s do transistor, pode-se ter o transistor e o diodo conduzindo simultaneamente, acarretando sério risco ao transistor. Em geral o tempo t_{rr} é escolhido como sendo um terço do tempo de comutação t_s do transistor (Magalhães, 2006) (Nassabay, 2011).

$$t_{rr} \leq \frac{t_s}{3} \quad (4.20)$$

A tensão máxima reversa do diodo deve ser maior do que a máxima tensão de entrada, sendo que uma margem de segurança de 20 % é aceitável.

$$V_r > 1,2V_{Emax} \quad (4.21)$$

O diodo deve ser especificado de forma a que a máxima corrente direta seja pelo menos o dobro da corrente máxima de I_S .

$$I_F \geq 2I_S \quad (4.22)$$

4.2.2 Conversores Step-Up ou Boost

Esta topologia tem por propósito fornecer uma tensão superior à disponibilizada em sua entrada, fazendo uso das propriedades físicas de um indutor submetido à uma corrente variável. A estrutura que permite tal resultado é apresentada na figura 4.7.

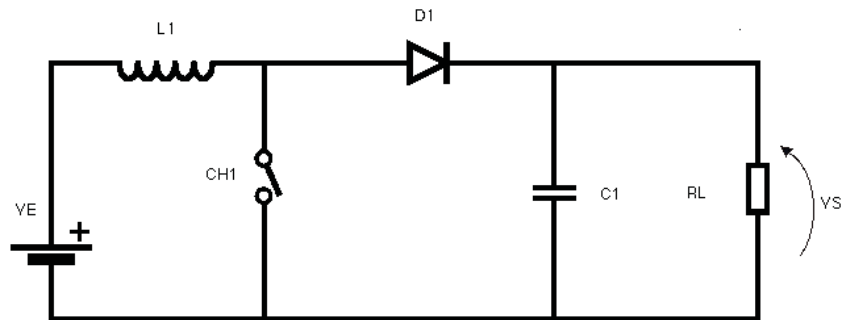


Figura 4.7: Diagrama de um conversor Boost.

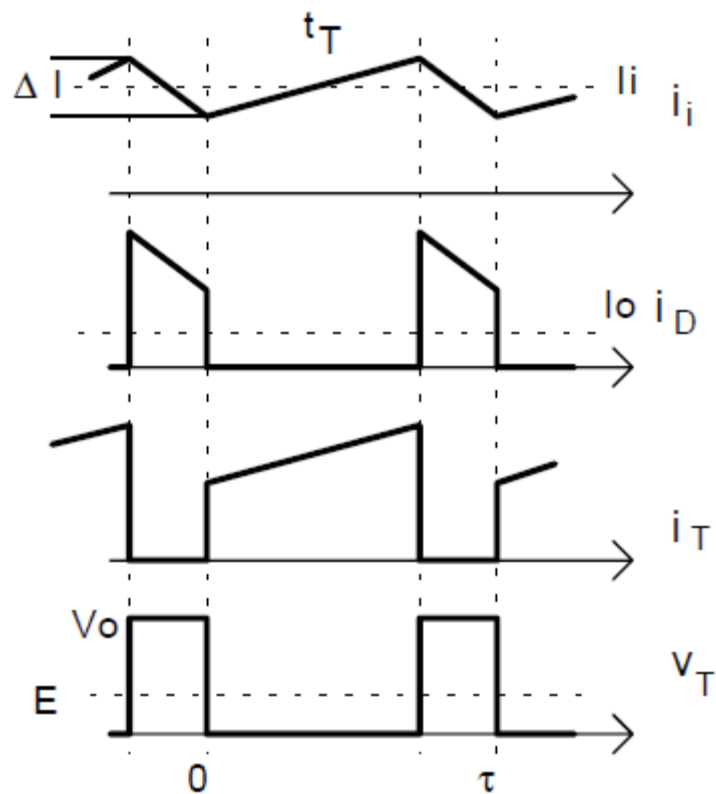


Figura 4.8: Tensões e correntes típicas de um conversor Boost.

Nas figuras 4.7 e 4.8, tem-se um circuito elevador de tensão, com suas correspondentes formas de onda de tensão e corrente. Uma vez que o transistor esteja conduzindo, o indutor se vê submetido a uma tensão V_E . Dada a configuração do circuito, neste estado, não há condução por parte do diodo. Enquanto o transistor não cortar, o indutor armazenará energia. Ocorrendo isto, tal energia acaba por ser conduzida ao capacitor, proporcionando a tensão desejada na saída.

Quando T conduz: $V_L = E$ (durante t_T)

Quando D conduz: $V_L = -(V_0 - E)$ (durante $\tau - t_T$)

$$\Delta I_L = I_{mg} \cong \frac{E \cdot t_T}{L} = \frac{(V_0 - E) T_{ON}}{L} = \frac{V_0 (1 - \delta) \delta}{Lf} \quad (4.23)$$

$$V_o = \frac{E}{1 - \delta} \quad \frac{V_o}{E} = \frac{1}{1 - \delta} \quad (4.24)$$

Quando o transistor entra em corte, o indutor força a condução do diodo. Neste intervalo a corrente no indutor decresce fornecendo energia à carga de saída. A variação de corrente é dada por:

$$\Delta I_L = I_{dmg} \cong \frac{V_0 \cdot t_T}{L} = \frac{V_0 T_{OFF}}{L} = \frac{V_0 (1 - \delta)}{Lf} \quad (4.25)$$

Do mesmo modo que no conversor *buck*, as correntes dependem apenas da tensão de entrada e da tensão de saída, sendo independentes da corrente média no indutor ou corrente de carga de saída. Novamente, a ondulação de corrente no indutor não deverá se alterar com a carga.

Supondo que a resistência série do indutor é desprezível, tem-se que a tensão DC no resistor de carga será dada pelo valor médio da tensão de entrada.

Se a corrente de carga de saída for reduzida excessivamente, a corrente no indutor poderá se anular. Esta situação, que corresponde ao limiar do modo de operação contínuo, corresponde a:

$$\Delta I_{S_{\min}} = \frac{V_0(1-\delta)\delta}{2Lf} \quad (4.26)$$

Para evitar que a corrente de saída caia abaixo de $I_{S_{\min}}$; em geral é colocado um resistor *shunt* interno à fonte, em paralelo com o capacitor. O valor do indutor que fornece $I_{S_{\min}}$ é dado por:

$$L_{\min} = \frac{V_0(1-\delta_{\min})\delta_{\min}}{2I_{S_{\min}}f} \quad (4.27)$$

A escolha do capacitor deve levar em consideração o comportamento em regime permanente e a resposta aos transientes de corrente de saída da fonte. A ondulação de saída pode ser calcular através da integral da corrente no capacitor. Assim:

$$\Delta V_0 = \frac{I_{S_{\max}}\delta\tau}{C} \Rightarrow C = \frac{I_{S_{\max}}\delta}{\Delta V_0 f} \quad (4.28)$$

Para o cálculo do capacitor deve-se considerar a forma de onda da corrente de saída. Admitindo-se a hipótese que o valor mínimo instantâneo atingido por esta corrente é maior que a corrente média de saída, I_0 , o capacitor se carrega durante a condução do diodo e fornece toda a corrente de saída durante a condução do transistor. A expressão 6.28 permite, para um dado valor de ΔV_c , calcular o valor do capacitor a ser colocado em paralelo com a carga.

Para se definir o transistor e o diodo a ser usado no circuito, procede-se à mesma maneira descrita para o conversor buck.

4.2.2.1 Controle PWM em malha fechada do Conversor Boost

Quer para o conversor elevador quer para o baixador a tensão de saída aumenta com a razão cíclica do interruptor, pelo que pode ser usado um controle igual (Baptista, 2011).

De 4.24, vem que:

$$\frac{V_0}{V_s} = \frac{1}{[1 - (D + d)]} = \frac{1}{1 - D} \cdot \left[\frac{1}{1 - \frac{d}{1 - D}} \right] \quad (4.29)$$

Onde D é o “duty cycle” e d seu incremento. Se $d \ll (1 - D)$, então pode-se aproximar e simplificar usando os dois primeiros termos do desenvolvimento binomial:

$$\frac{V_0}{V_s} = \frac{1}{[1 - (D + d)]} = \frac{1}{1 - D} \cdot \left[1 + \frac{d}{1 - D} \right] \quad (4.30)$$

Uma variação na tensão de saída ΔV_0 pode ser representada por:

$$\Delta V_0 = \frac{1}{(1 - D)^2} \cdot \frac{V_s}{S^2 + \frac{S}{RC} + \frac{1}{LC}} \quad (4.31)$$

Então a função de transferência em malha fechada será:

$$\frac{\Delta V_0(S)}{\Delta V_{ref}(S)} = \frac{G}{1 + GH}, \quad \text{onde}$$

$$G = \frac{1 + (S \cdot K_1 \cdot T_1)}{S \cdot T_1} \cdot \frac{1}{(1-D)^2} \cdot \frac{1}{S^2 + \frac{S}{RC} + \frac{1}{LC}} \quad (6.32)$$

$$H = S \cdot C \cdot K_d + \frac{1}{1 + (S \cdot T_2)}$$

4.2.2.2 Controle por multiplicador do Conversor Boost

O controle do conversor boost pode ser executado por um multiplicador analógico ao invés do uso de um PID ou PWM (Baptista, 2011). A expressão para o “*duty cycle*” para conversores *boost* é :

$$\delta = 1 - \frac{V_{IN}}{V_{OUT}} \quad (4.33)$$

que é válida para a operação contínua e pode ser implementada por um multiplicador, conforme a Figura 4.9. Para o controle funcionar, basta ajustar os valores máximos, ou a gama de valores permissível. Exemplo: o multiplicador só fornecerá 10 V à saída se ambas as suas entradas forem 10 V, sendo 10 V a tensão máxima. Caso o *duty cycle* máximo seja 0,9, isso corresponderá á 9 V, então haverá 9 V na entrada do amplificador operacional de realimentação, que corresponde ao máximo desejado. A saída do circuito será comparada então com uma rampa de zero a 10 V. ao invés de se usar V_{OUT} , usa-se um sinal proporcional à saída desejada.

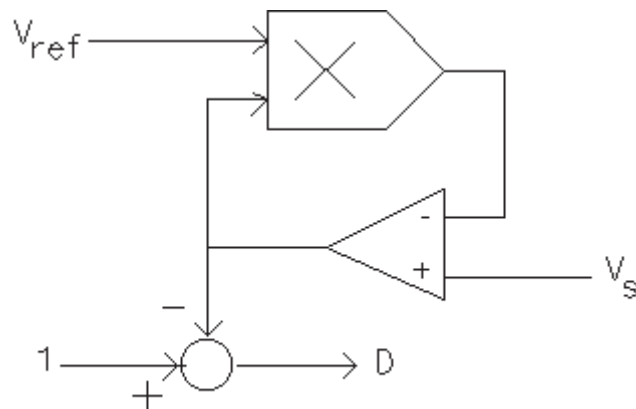


Figura 4.9: Controle Boost via multiplicador.

4.3 Inversores

O uso de geradores baseados em fontes de energia intermitentes costuma ter por saída tensões e correntes DC, seja por sua natureza ou por conversores integrados, enquanto a maioria das cargas hoje disponíveis na indústria, no comércio e nas residências exige corrente alternada em sua alimentação. Como meio de satisfazer essa condição, circuitos denominados inversores são necessários. Por meio do chaveamento de semicondutores, tensões e correntes alternadas podem ser geradas (Rashid, 1999).

O simples chaveamento, contudo, não produz uma saída senoidal, conforme a Figura 4.10. Para aplicações em baixas potências, em cargas insensíveis a harmônicos, não há necessidade de maior sofisticação. Contudo, devido ao elevado conteúdo harmônico introduzido pelo chaveamento, filtros ou mesmo outras técnicas de chaveamento se fazem necessárias para atender potências maiores, ou cargas estritamente eletrônicas. Aplicações mais comuns incluem fornos indutivos, acionamentos de motores e sistemas de energia ininterrupta.

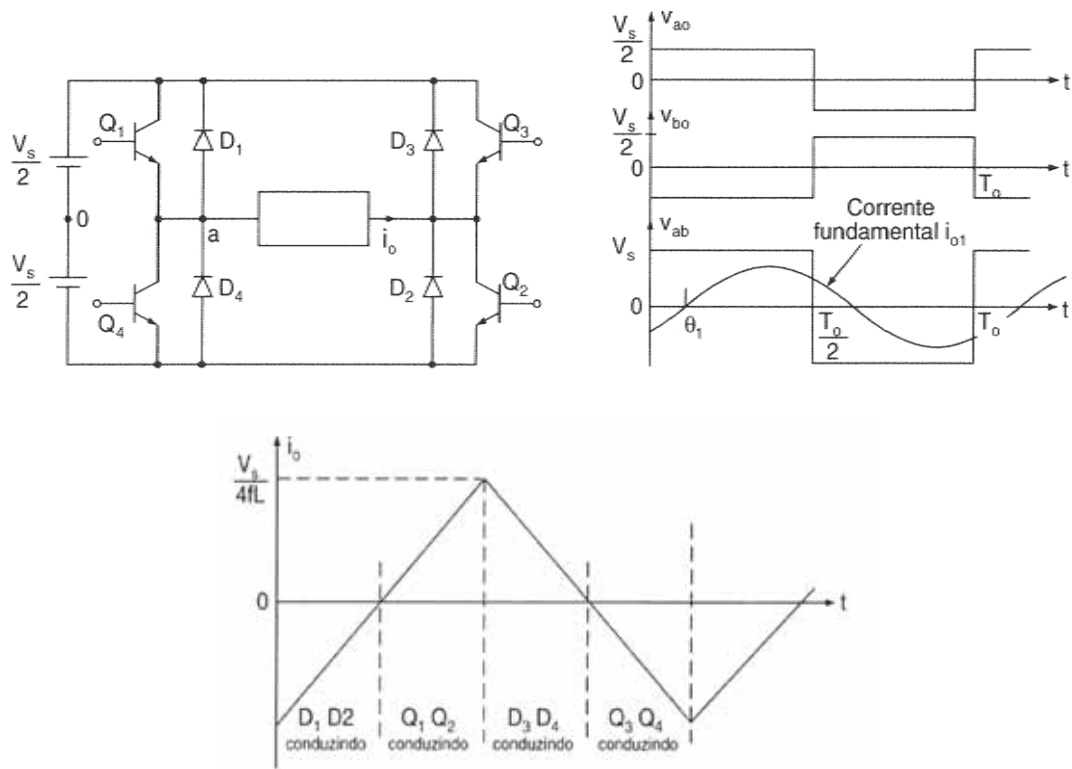


Figura 4.10: Inversor monofásico de ponte completa.

O inversor monofásico em ponte é apresentado na figura 4.10. Os quatro transistores atuam como *choppers* e atuam em pares: Q_1 e Q_2 formam o primeiro par e Q_3 e Q_4 o segundo. Se Q_1 e Q_2 conduzem, Q_3 e Q_4 se encontram em corte, e uma tensão igual á V_s é imposta á carga. Isso se passa por um semiciclo. No outro semiciclo, a situação se inverte, com Q_3 e Q_4 conduzindo e Q_1 e Q_2 cortados. Agora a tensão na carga é de $-V_s$, compondo uma onda alternada. Se o inversor estiver alimentando uma carga altamente indutiva, a corrente circulante será triangular, conforme a parte inferior da figura 6.8.

O sistema de controle dos pulsos pode ser executado por diversos tipos de modulação, sendo a modulação PWM a mais utilizada. Independente da técnica de modulação usada, ela não pode ser diretamente aplicada no circuito devido ao tempo que os transistores levam para sair do estado de condução para comutação e vice versa. Um tempo morto se faz necessário entre cada semiciclo, para garantir que a fonte não entre em curto-circuito.

4.4 Chaves de Transferência

Toda instalação que possui algum sistema de geração alternativo à rede de alimentação, necessita, obrigatoriamente, de uma chave reversora ou chave comutadora de fonte. Seu objetivo é permitir a comutação entre as fontes dos circuitos consumidores, sem a possibilidade de ligação simultânea de ambas as fontes (PERFECTUM SERVIÇOS DE ENGENHARIA, 2011).

A concepção mais simples de chave reversora é o SPDT (*Single Pole Double Throw*), utilizada em relés. Para comutações sem carga, é possível usar contatos em forma de faca. Para a maior parte das aplicações industriais, a chave de transferência é constituída por pares de contatores ou disjuntores motorizados.

A não utilização destas chaves pode causar sérios riscos, como queima de equipamentos, incêndios e energização indevida de setores da malha elétrica. As concessionárias exigem que as chaves reversoras necessariamente sejam dotadas de intertravamento mecânico, sendo que nas chaves de acionamento elétrico, os contatos auxiliares também efetuam o intertravamento elétrico. A observância à norma NBR-5410 da ABNT se faz necessária.

A conexão efetuada é a descrita pela figura 4.11.

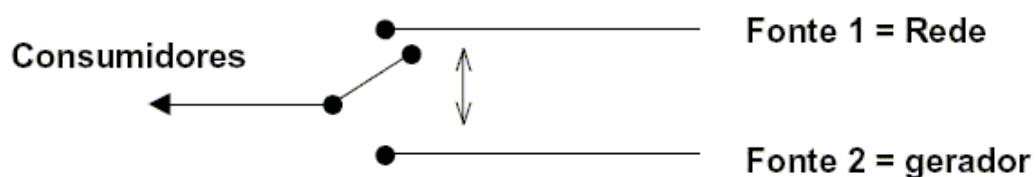


Figura 4.11: Conexão equivalente à chave de transferência.

Na maioria das aplicações, o grupo gerador é utilizado como fonte de emergência para atender cargas essenciais, caso em que há um circuito de emergência em separado dos consumidores não essenciais, conforme Figura 4.12. O circuito de transferência deve ser intertravado para impedir o paralelismo entre rede e o grupo gerador. Tal ligação está na Figura 4.13.

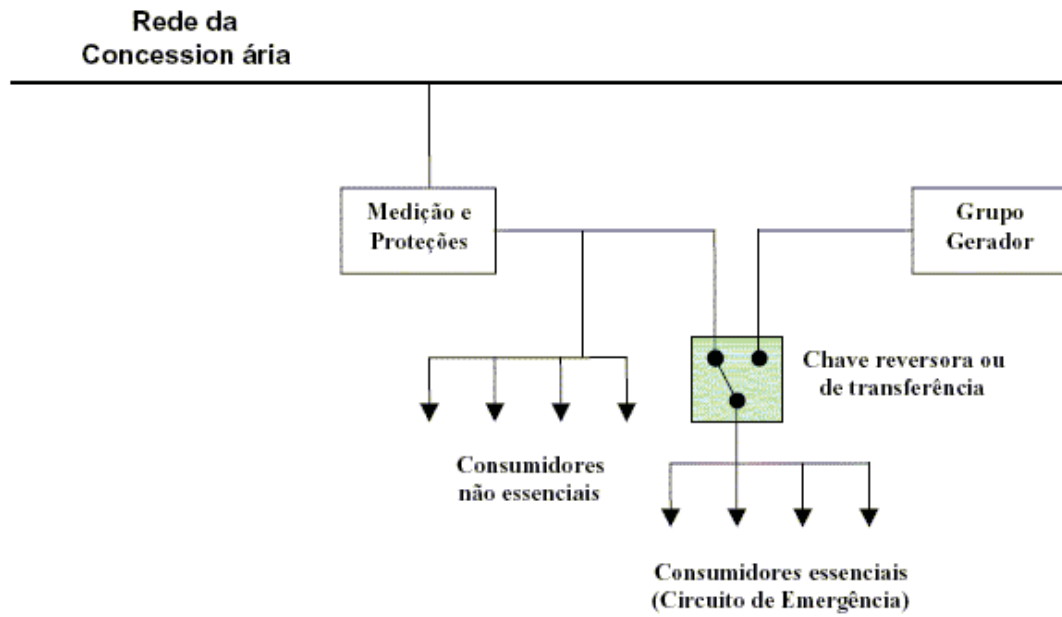


Figura 4.12: Circuito de força com chave reversora.

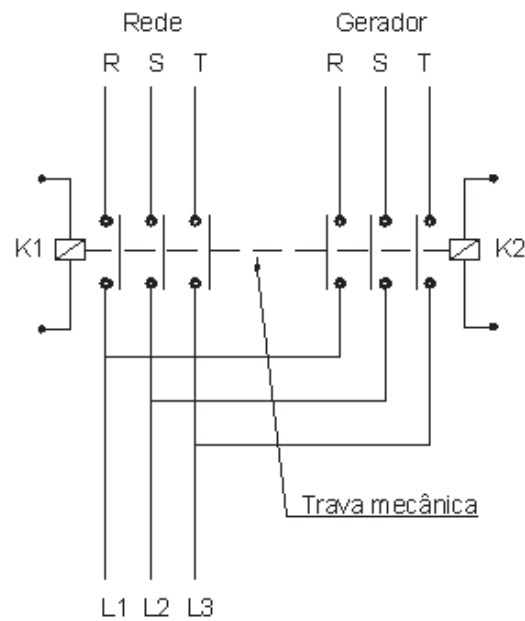


Figura 4.13: Chave reversora com contadores intertravados.

A automação da transferência de carga pode ser feita com sensores com parâmetros ajustáveis, incluindo tempo para confirmação da interrupção evitando transferências desnecessárias. Deve também monitorar a volta das condições normais e realizar a transferência no sentido inverso. Adota-se como padrão de disparo, uma subtensão equivalente a uma queda de 20% do valor nominal. Considerando a possibilidade de manutenção ou reparos no sistema de transferência, chaves de "bypass" podem ser prevista, permitindo que este seja desconectado e removido para conserto.

Quando ocorre uma falta de energia, o grupo gerador de emergência dotado de sistema de transferência automática é acionado e no intervalo médio de 10 a 15 segundos assume as cargas. Este intervalo é suficiente para que os motores em funcionamento parem de girar e todos os circuitos se desenergizem. Entretanto, quando do retorno da concessionária, o sistema aciona o desligamento do gerador e o ligamento da rede, um após o outro, num intervalo médio de 100 a 200 ms. Isto faz com que, ao ser religada a rede, os motores, por inércia, ainda estão girando praticamente na mesma rotação. O mesmo ciclo acontece nas transferências onde se utilizam grupos geradores nos horários de pico, quando no início se transfere a carga da rede para o gerador e no final, quando ocorre a transferência inversa. Os motores em movimento, sem receber energia, geram tensão que percorre o circuito em sentido inverso, no intervalo de transferência, que irá se contrapor à fornecida pela fonte que assume a carga, produzindo um surto capaz de trazer perturbações e queima de equipamentos. Quando há este tipo de problema, a solução é fazer a transferência num intervalo de tempo programado, desligando-se uma fonte e aguardando um tempo suficiente para que todos os motores parem, antes de efetuar o ligamento da fonte substituta. A isto, denomina-se transferência com transição programada.

4.4.1 Chaves Estáticas

Resultado da tecnologia dos semicondutores, atualmente são comercializadas chaves de transferência sem contatos móveis, baseadas em retificadores controlados de silício (SCR). São utilizadas, principalmente, nos sistemas UPS (*Uninterruptible Power Supplies*) ou *no-breaks* estáticos e atualmente começam a encontrar aplicações nas instalações de grupos geradores. A transferência com chave estática ocorre em transição aberta, isto é com interrupção de 2 a 4 ms. Esta interrupção é imperceptível e não detectada pelos equipamentos consumidores.

O SCR é um diodo que opera como um circuito aberto quando nenhuma corrente é aplicada ao GATE. Um sinal aplicado ao GATE fecha o circuito e faz com que ele se mantenha fechado, conduzindo do ANODO para o CATODO, enquanto permanecer o sinal. Uma vez removido o sinal, ele irá parar de conduzir quando a corrente circulante atingir o valor zero. Usando esta propriedade, é possível construir um sistema com controle eletrônico gerando o sinal para o gate e montar uma chave comutadora de fontes onde é possível determinar o momento em que uma ou outra fonte será ativada ou desativada.

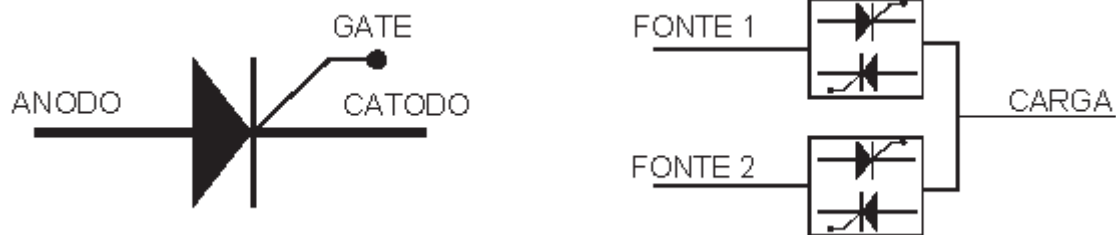


Figura 4.14: Chave de transferência estática.

Tal solução possui diversas implantações com o auxílio de sistemas microprocessados. Entretanto, neste tipo de transferência a carga é aplicada subitamente, na sua totalidade, à outra fonte.

A Figura 4.14 exibe uma versão para sistemas de alta potência e tensão reversa de trabalho fazendo uso de SCR. Se as solicitações elétricas não forem tão altas, uma versão desta chave com TRIACS é viável.

5 SISTEMA PARA ATENDIMENTO DE CARGAS PONTUAIS

5.1 Descrição do Sistema e Justificativas

A necessidade da integração de fontes de energia alternativas à corrente matriz energética varia conforme o contexto de cada local, desde o alto custo de conexão com a rede elétrica, até a grande dificuldade de se conseguir geração extra por efeito de grandes distâncias, escassez de combustível ou mesmo de aceitação por parte da população das alternativas viáveis. O último caso é freqüente na Europa, onde a recusa da opção nuclear leva diversos países a importar energia, sendo a França grande exportadora, uma vez que sua matriz majoritariamente nuclear provê a potência demandada com alta disponibilidade.

Como principais fontes alternativas despontam a biomassa, a geotérmica, a eólica e a solar. As duas primeiras têm por vantagem alta disponibilidade, e no caso da geotérmica, nenhuma sazonalidade. Tais plantas exigem grandes investimentos, já que os processos são viáveis apenas em grandes escalas. As duas últimas são de natureza intermitente, sendo que a energia eólica sofre de maior irregularidade de geração que a solar. Tal fato, aliado à grande disponibilidade de insolação no Brasil, faz com que os custos desta modalidade de geração sejam menores, fator preponderante para uma ampla implantação, motivo que levou à opção pelo uso de energia solar no presente trabalho.

Como descrito no capítulo 3, além da fonte geradora, um sistema de armazenamento de energia pode ser incluído no sistema. Todas as alternativas viáveis economicamente foram listadas no capítulo 4, sendo claramente visível que sua implantação possui um custo aceitável apenas quando aplicadas em grandes escalas. Como maior exceção a tal afirmativa é o armazenamento químico, popularizado para pequenas potências de alguns eletroeletrônicos. A opção apresentada pela patente (Marcelino, 2011) se torna atrativa em função da pequena autonomia propiciada por baterias e do custo envolvido no atendimento de eletrodomésticos com maior consumo, sendo a opção desenvolvida neste trabalho.

Citada como motivação no capítulo 1, pretende-se alimentar uma geladeira doméstica. Tal carga costuma ter uma potência de 1/3 HP, alimentada por corrente AC, o que impõe a necessidade do uso de inversores. Uma característica marcante de um refrigerador é que, se por razão de uma intermitência da alimentação, ele for desligado, as atuais características de isolamento térmica permitem que as temperaturas necessárias para conservar os alimentos se

mantêm por um intervalo de tempo razoável. Tanto que os compressores não trabalham a 100% do tempo de funcionamento deste eletrodoméstico. Então múltiplas partidas em sequência não ocorrerão, o que evita problemas de queima do compressor. O mesmo fenômeno também permite um tempo maior de chaveamento para a rede, o que simplifica o processo de transição e problemas com a possibilidade de ligação concomitante do sistema de geração com a rede.

Nota-se que em função da necessidade de luz solar para o funcionamento deste sistema, este estará ativo apenas durante o dia. Neste período, a maioria das pessoas não se encontra em casa, o que reduz muito o numero de vezes que a geladeira é aberta, e com isso, as perdas térmicas e o número de partidas necessárias pelo motor, aliviando a necessidade de se sobre dimensionar os painéis para suportar estes picos de corrente. Também já mencionada, está a necessidade de um sistema que adéqüe a tensão dos painéis às das cargas, o que exige um conversor DC/DC. O circuito de controle do sistema inversor, do conversor e do sistema de comutação não podem ser dependentes dos painéis solares, já que eles não trabalham continuamente. Uma fonte auxiliar alimentada pela rede provê a energia necessária à operação do circuito. O diagrama de blocos se encontra na Figura 1.1, novamente aqui reproduzida.

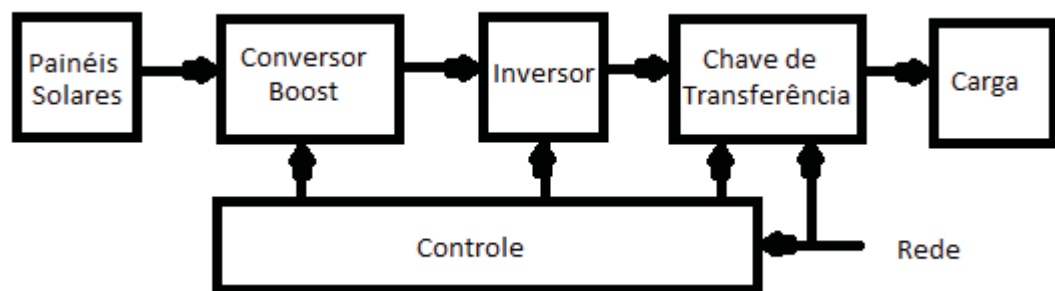


Figura 1.1: Diagrama de blocos do sistema.

5.2 Conversores Chaveados

5.2.1 Conversor Boost

É comum para painéis solares, uma saída para a potência de pico de uma tensão em torno dos 20 V. Como dito, a carga é de 1/3 HP, que em 127 V exige uma corrente de quase 2 A da fonte. Com isso, tem-se um *duty cycle* de 0,84. Admitindo uma carga mínima de 1 mA, *ripple* de tensão de 25mV com uma operação a 20 kHz, tem-se uma indutância de 420 mH e uma capacitância de 1,7 μ F. Os elementos de chaveamento usados foram o diodo MR850 e o transistor IRF 740, definidos conforme os critérios apresentados no capítulo 4. Os componentes foram conectados segundo a Figura 4.7.

5.2.2 Circuito de Controle

Optou-se pelo uso do controle por multiplicador analógico ao invés do uso de um PID/PWM, por possuir uma implementação mais simples. O CI multiplicador usado foi o AD532, por seu custo relativamente baixo.

5.3 Inversor

5.3.1 Circuito de Potência

As solicitações máximas de corrente sofridas pelo estão dentro dos limites suportados pelo IRF 740, permitindo seu uso na ponte de inversão. Como esta configuração exige a aplicação de um sistema de *bootstrap* para se gatilhar o transistor superior da ponte, incluiu-se um par de circuitos integrados IR2151, um para cada lado da ponte. Este componente permite a inserção de um capacitor e seu devido chaveamento para manter a ponte conduzindo quando solicitada. Também dispõe de um sistema de geração de tempo morto para transitar entre a condução da parte superior e inferior da ponte. Como a condução dos pares é alternada, as entradas de comando para a parte superior e inferior são invertidas em cada integrado.

5.3.2 Circuito de Controle

A aplicação de um sistema PWM foi adotada tanto para a fonte chaveada quanto para o inversor, sendo executada pelo circuito SG3524. A geração do sinal de PWM é feita ao se tomar uma referência senoidal, como a entrada da rede, e inseri-la no comparador do SG3524. A saída resultante manobra os IRF 740. Para se ter um sinal com uma conformação próxima de uma senóide deve se incluir um filtro capacitivo ou mesmo filtros LC de ordem superior na saída do inversor. A Figura 5.1 ilustra o uso do PWM, onde, na parte superior, há a comparação feita pelo SG3524. Na parte inferior está a saída do sinal que irá efetuar o disparo da ponte inversora.

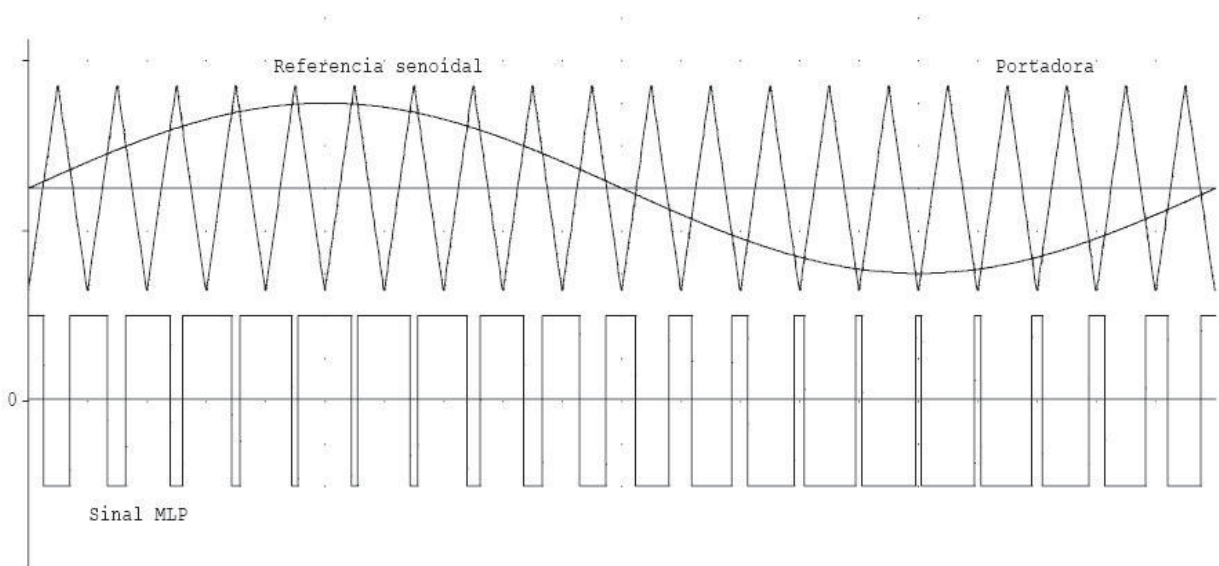


Figura 5.1: Forma de onda do sinal PWM(Andrade, 2009).

5.4 Chave de Transferência

5.4.1 Chave Estática

Como a tensão reversa é baixa, o chaveamento entre painéis e rede não precisa ser necessariamente executado por SCRs. O presente projeto optou pelo uso de TRIACs TIC 226D. Do mesmo modo que para SCRs, os TRIACs precisarão receber disparos a cada semiciclo. Enquanto um deles estiver habilitado, o outro, necessariamente, estará desabilitado. O circuito de controle gera os pulsos para ambos os semicondutores em função da quantidade de energia que um painel é capaz de prover. A conexão física feita é mostrada na figura 5.2.

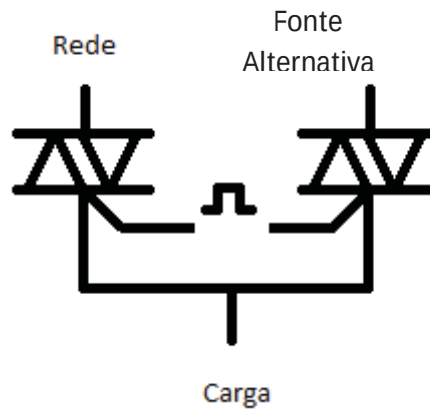


Figura 5.2: Conexão dos TRIACS.

5.4.2 Circuito de Controle

O sistema de controle dos TRIACs foi dividido em dois: uma parte responsável por controlar a comutação entre as fontes de alimentação conforme a disponibilidade de luz, e outra responsável por gerar os pulsos de disparo para os TRIACS. O primeiro amostra a tensão do painel e compara com uma referência. Se estiver abaixo do limiar, o circuito comuta para a rede, desabilitando o TRIAC alimentado pelo inversor e permitindo o envio de pulsos para o TRIAC ligado á rede. Se houver iluminação suficiente para se usar o painel, o circuito desabilita a rede e comuta para o inversor. A Figura 5.3 mostra tal intertravamento, que impede correntes de curto circuito que surgiriam caso houvesse condução concomitante. EN é uma entrada que desabilita ambos os sinais, desligando a carga.

A geração dos pulsos para os *gates* de um TRIAC é realizada pelo CI TCA785. A Figura 5.4 mostra um excerto da folha de dados deste componente em que se exemplifica o uso do mesmo como *driver* de TRIACs. O TCA 785 é um controlador de fase para os pulsos de disparo. Diferentes ângulos de disparo podem ser obtidos ao se ajustar os potenciômetros mostrados. Como se deseja que os pulsos coincidam com cada início de semiciclo, os ditos potenciômetros foram substituídos por resistores apropriados ou simplesmente eliminados. O pino 6 ao invés de ser conectado como mostrado, recebe o sinal do circuito da Figura 5.3, desabilitando os pulsos se requerido.

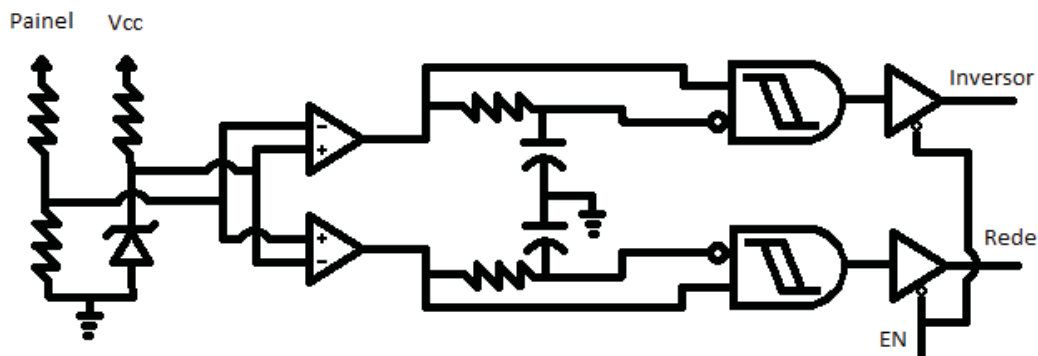


Figura 5.3: Circuito de habilitação dos TRIACS.

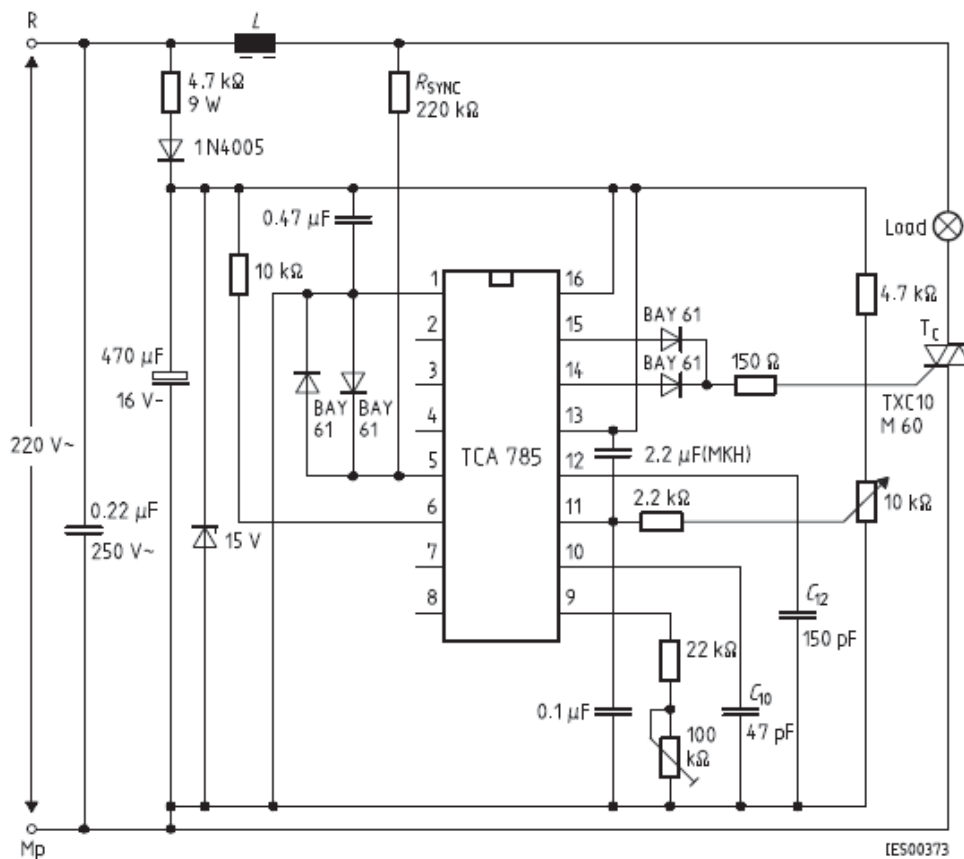


Figura 5.4: Circuito driver dos TRIACS.

5.5 Dimensionamento dos Painéis

Os painéis devem ser especificados de modo a cobrir a demanda requerida pela carga, ineficiências do circuito e condições de luminosidade locais. Mesmo em locais abertos e livres de sombras de objetos próximos, há a necessidade de se levar em conta o ângulo de instalação do painel e a incidência solar média no local. Se, como dito, um motor de geladeira possui 1/3 HP, ou aproximadamente 250 W, pelo menos 2 m² de painéis serão necessários, sem considerar as perdas. Este valor foi obtido considerando que os painéis são de silício monocristalino, conforme encontrados hoje no mercado. Em função da acelerada evolução da eficiência dos painéis, espera-se que em breve a área necessária para atender esta potência e as ineficiências do circuito se torne inferior a atual estimativa feita.

O tempo de operação do sistema também pode ser alterado aumentando o número de painéis para compensar uma menor incidência de luz. O posicionamento de painéis em ângulos diferentes do valor médio designado para a área permite melhor desempenho em determinadas épocas do ano. Para o Brasil, tem-se a distribuição de insolação dada pela Figura 5.5.

Apesar de se ter procurado diversos softwares de simulação, nenhum possuía modelos para todos os componentes usados neste projeto. Alguns destes simuladores permitem que o usuário construa um modelo, mas eles seriam pouco fiéis a realidade pelo desconhecimento de detalhes internos dos componentes. Com isso não foi possível estimar de modo adequado a eficiência do circuito. O cálculo da área total requerida é feito dividindo-se a potência do motor pela eficiência do sistema e pelo ângulo da normal do painel em relação ao ângulo médio do sol.

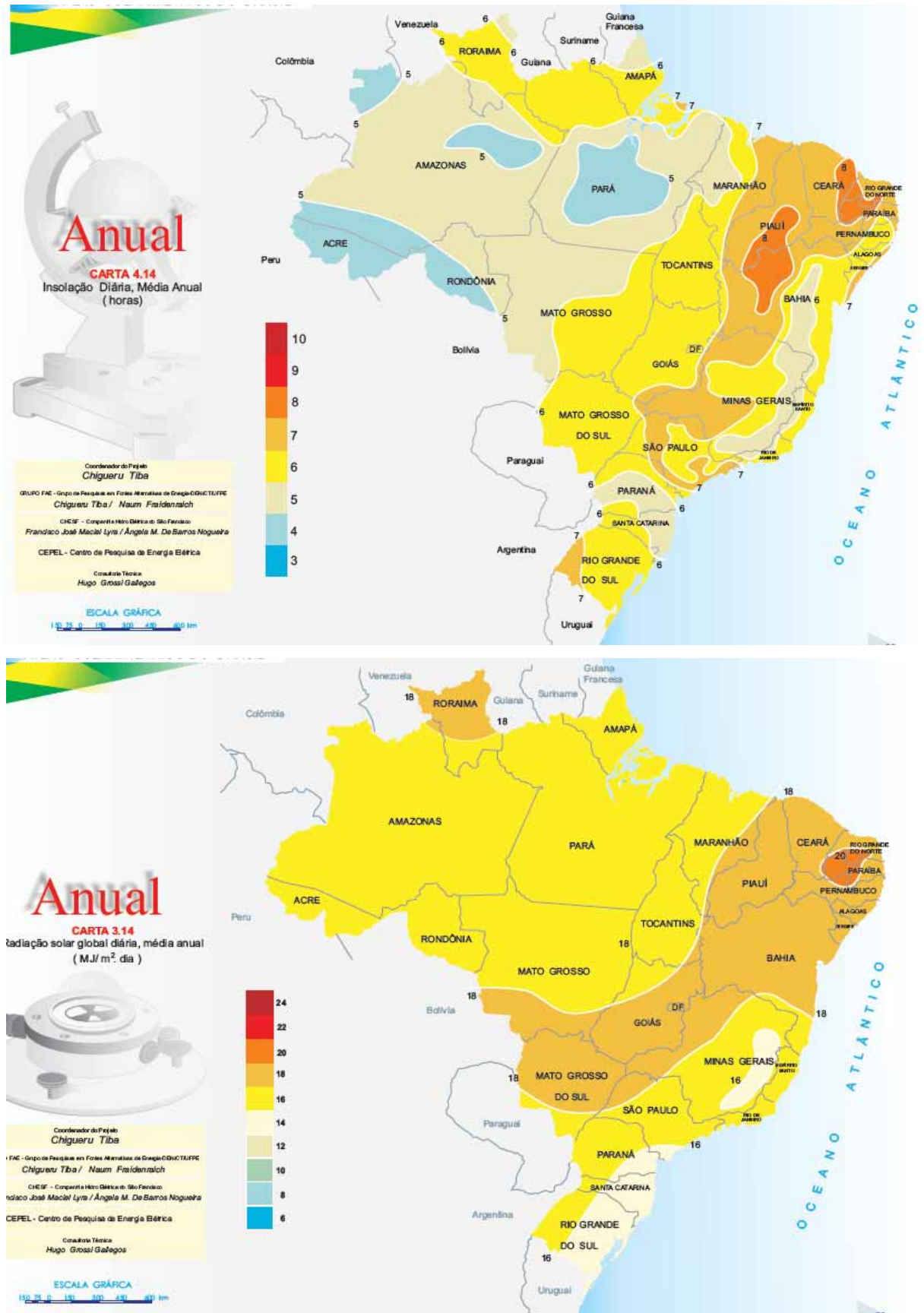


Figura 5.5: Mapas de incidência solar no Brasil. Acima, potência incidente. Abaixo, horas de insolação.

6 RESULTADOS

Uma vez projetado um circuito capaz de operar de acordo com as definições apresentadas neste trabalho, partiu-se para a construção de um protótipo e um teste em condições reais de funcionamento.

O circuito foi construído em uma matriz de contatos, conforme a figura 6.1.

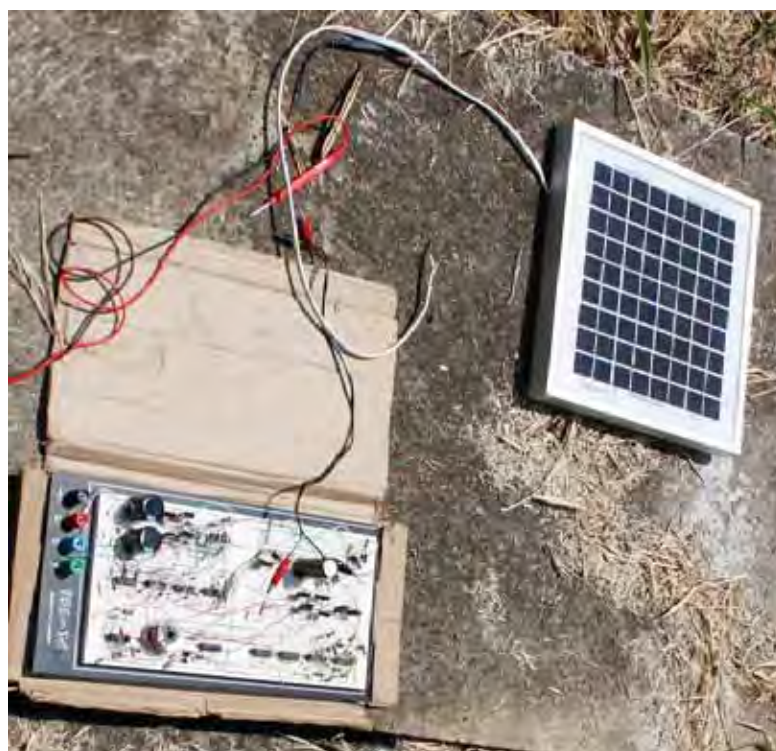


Figura 6.1: Execução do circuito proposto.

O custo dos componentes eletrônicos ficou abaixo do valor comumente encontrado para inversores comerciais. O circuito de controle exigiu mais corrente que o previsto, necessitando mais de um regulador 78XX para atender a demanda da barra de +12V. Desvios dos valores dos componentes usados no PWM (5% para resistores, 20% para capacitores) levou a um valor inferior aos 20 kHz planejados, trazendo as oscilações para a faixa de frequência audível, prática não recomendável no projeto de fontes chaveadas.

Em função do alto custo dos painéis, não foi possível testar o sistema a plena carga, sendo usado um conjunto de painéis de menor potência para suprir o circuito. Desde que se

tenha corrente suficiente para magnetizar o indutor do conversor DC/DC, o sistema opera sem problemas.

Houve a possibilidade de se usar duas tecnologias de painel solar durante o teste, ambos de silício: um painel monocristalino e um painel policristalino. O painel monocristalino possuía uma potência de pico de 4W, com uma tensão de pico de 20V. O painel policristalino possuía uma potência de pico de 5W e tensão de pico de 18V. Para a mesma insolação e inclinação, o painel monocristalino proveu mais corrente que o policristalino, conforme esperado pela diferença de rendimento entre estas tecnologias, mostrando que o tipo de painel utilizado é um importante fator de projeto.

7 CONCLUSÕES

O presente trabalho permitiu obter um conhecimento mais profundo do processo de geração de energia por meios fotovoltaicos, dos meios de fabricação, tecnologias e métodos de aproveitamento solar. Foi possível contrastar o desempenho de diferentes tecnologias de painéis solares e assim seu efeito direto sobre o desempenho do circuito. Como esperado, painéis monocristalinos obtiveram um desempenho superior. Se a área disponível for um fator crítico, esta deve ser a tecnologia a ser adotada. Se o critério mais importante for o custo, outras opções que demandem maior área instalada podem ser consideradas, por exemplo, painéis de Silício amorfo. O estado da arte em painéis solares tem rendimento em laboratório cerca de quatro vezes superior ao comercializado hoje, permitindo que se espere para um futuro próximo, atender a carga proposta com áreas muito mais reduzidas. O projeto atual permite grande número de possibilidades para desenvolvimento futuro, como a adoção de um controle digital no lugar da abordagem analógica, modificar o projeto do conversor DC/DC para operar em frequências mais altas, reduzindo o tamanho dos componentes a serem usados, o desempenho com outras tecnologias de energia solar, buscando um melhor custo/benefício.

8 BIBLIOGRAFIA

ANDRADE, A. C.. PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM NO-BREAK. 2009. 45 f. Dissertação (Graduação) - Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2009.

BAPTISTA, A. G. FONTE ELEVADORA Disponível em: <<http://pwp.net.ipl.pt/deea.isel/galhardo/epotexto/ficheiros/ch7/ch07s3/ch07s3.htm#closedloop>>. Acesso em: 18 set. 2011.

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>. Acesso em 16 nov. 2011.

ELERT, G. Photoelectric Effect. IN: __ The Physics Hypertextbook. Disponível em: <<http://physics.info/photoelectric/>>. Acesso em: 12 jul. 2011.

ENERGIAS RENOVÁVEIS. ENERGIA: ALEMANHA. Disponível em: < <http://energiasrenovaveis.wordpress.com/2007/08/22/energia-alemanha/>>. Acesso em 12 ago. 2011.

GUTMANN, Friederich; OLIVEIRA, Newton. Roteiro de Laboratório sobre Efeito Fotoelétrico. Salvador: UFBA, 2002.

INOVAÇÃO TECNOLÓGICA (Org.). Células solares têm avanço na indústria e no laboratório. Disponível em: <<http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=avancos-tecnologicos-celulas-solares&id=010115090928>>. Acesso em: 20 jul. 2011.

INPI. Instituto Nacional da Propriedade Industrial . MARCELINO, M . A.; PRADO, P. P. L. Sistema Comutador Temporizado de Energias Alternativas para Cargas Intermitentes. BR n. 020110035974, abr. 2011.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (Org.). Desafio no Setor Metalúrgico. Disponível em: < http://www.ipt.br/noticias_interna.php?id_noticia=30>. Acesso em: 12 nov. 2011.

KOFUGI, S. T. Fontes Chaveadas. IN: Apostila de Eletrônica Experimental. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

LABDID. EFEITO FOTO-ELÉTRICO. Disponível em: <<http://labdid.if.usp.br/~estrutura/fnc377/2007/Fe2007.pdf>>. LABDID, São Paulo, 2007. Acesso em: 12 jul. 2011.

LARICO, H. R. E. CONVERSOR BOOST CONTROLADO EM CORRENTE APLICADO AO RETIFICADOR MONOFÁSICO. 2007. 157 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

MAGALHÃES, R. O.. MODELAGEM, SIMULAÇÃO E RESULTADOS EXPERIMENTAIS DE UM SISTEMA DE RASTREIO DE POTÊNCIA MÁXIMA PARA GERADORES SOLARES DE SATÉLITES ARTIFICIAIS. 2006. 87 f. Dissertação (Mestrado) - Inpe, São José Dos Campos, 2006.

MARQUES, José Pedro Pinto Teixeira. Modelação e Controlo de Conversor DC/AC para a interligação de painéis fotovoltaicos à Rede. 2009. 128 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2009.

NASSABAY, A.. MAXIMIZAÇÃO ESTÁTICA OU DINÂMICA DA ENERGIA EM PAINÉIS SOLARES DE SATÉLITES ARTIFICIAIS. São José Dos Campos: Inpe, 2011.

NEVADA WIND AND SOLAR (Org.). SOLAR ELECTRICITY BASICS. Disponível em: <<http://lasvegaswindandsolar.com/solar-electricity-basics.php>>. Acesso em 16 jul. 2011.

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

PERFECTUM SERVIÇOS DE ENGENHARIA (Org.). CHAVES DE TRANSFERÊNCIA AUTOMÁTICAS - (CHAVES REVERSORAS): Sistemas de Baixa Tensão. Disponível em: <<http://perfectum.eng.br/energia/ATS.html>>. Acesso em: 06 jul. 2011.

RASHID, M. H.. Eletrônica de Potência: Circuitos, Dispositivos e Aplicações. São Paulo: Makon Books, 1999. 819 p.

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

UNIVERSIDADE DE LISBOA. MEIO SÉCULO DE HISTÓRIA FOTOTOVOLTAICA Disponível em: <<http://solar.fc.ul.pt/gazeta2006.pdf>>. Universidade de Lisboa, Lisboa, 2006. Acesso em: 13 jul. 2011.

WIKIPEDIA (Org.), SILICON CELL. Disponível em: <http://en.wikipedia.org/wiki/Silicon_cell>. Acesso em 10 dez. 2011.