

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA:
FUNDAMENTOS E APLICAÇÕES

Rio de Janeiro, RJ – Brasil
Novembro de 2008

ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA: FUNDAMENTOS E APLICAÇÕES

Renata Pereira Braga

PROJETO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSARIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO ELETRICISTA.

Aprovado por:

Jorge Luiz do Nascimento, D.Eng.
(Orientador)

José Luiz da Silva Neto, Ph.D.

Sergio Sami Hazan, Ph.D.

Rio de Janeiro, RJ - Brasil
Novembro de 2008

Para meus queridos pais.

AGRADECIMENTOS

Ao Pai, por todas as oportunidades a mim concedidas.

À minha família, especialmente aos meus pais, pelo amor infinito e apoio incondicional.

Aos amigos que fiz na UFRJ.

Agradeço ao professor Jorge Luiz pela valorosa orientação e dedicação a mim dispensada ao longo da graduação.

Agradeço à Rosane, ex-secretária do DEE, pela enorme paciência e boa vontade em todos os momentos.

E, por fim, agradeço a todos os professores e colaboradores do departamento que, de alguma maneira, contribuíram para a concretização desse sonho.

“Liberdade sem sabedoria é poder sem direção”.

Ramatís

RESUMO

Dado o atual panorama mundial faz-se cada vez mais necessário o estudo, aplicação e disseminação das mais diversas fontes alternativas de energia, uma vez que inúmeros setores da sociedade clamam por soluções e tecnologias limpas e que se enquadrem dentro do que é entendido como Desenvolvimento Sustentável.

Esse trabalho tem, portanto, a finalidade de discutir diferentes e amplos aspectos da Energia Solar Fotovoltaica, desde princípios teóricos e aplicações, até a importância estratégica que esta forma de geração de energia exerce no mundo atual.

Palavras-chave: Energia renovável, Sistema solar fotovoltaico, Geração de energia elétrica.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	A ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA.....	2
2.1	Efeito Fotovoltaico	5
2.2	Energia Solar Fotovoltaica no Brasil.....	8
2.3	Comparação entre a geração de energia elétrica através de módulos solares fotovoltaicos e outras fontes	15
2.4	Vantagens e Desvantagens	18
3	A CÉLULA FOTOVOLTAICA.....	20
3.1	Silício Monocristalino	20
3.2	Silício Policristalino	22
3.3	Silício Amorfo	23
4	SISTEMA FOTOVOLTAICO	25
4.1	Módulo Fotovoltaico	25
4.1.1	Associação em Paralelo	25
4.1.2	Associação em Série.....	26
4.1.3	Características Elétricas dos Módulos Fotovoltaicos	27
4.1.4	Fatores que afetam as características elétricas dos Módulos Fotovoltaicos.....	29
4.2	Baterias	31
4.2.1	Baterias de Chumbo-Ácido	32
4.2.2	Bateria de Níquel-Cádmio.....	35
4.2.3	Características ideais para uso em sistemas fotovoltaicos.....	35
4.3	Reguladores (Controladores) de Carga.....	36

4.3.1	Características ideais dos controladores de carga.....	37
4.4	Inversores	38
4.5	Outros Componentes	39
4.6	Configurações de um sistema fotovoltaico.....	39
4.6.1	Sistemas Isolados.....	39
4.6.2	Sistemas Híbridos	42
4.6.3	Sistemas Interligados à Rede.....	43
4.7	Campos de Utilização.....	45
4.7.1	Bombeamento de água.....	45
4.7.2	Eletrificação Rural.....	49
4.7.3	Refrigeração de Vacinas.....	51
4.7.4	Estação remota para monitoramento	54
4.7.5	Proteção catódica de estruturas metálicas enterradas, tais como: torres de transmissão, oleodutos e gasodutos.....	55
4.7.6	Suprimento de energia para estações remotas de telecomunicações e telemetria.....	56
5	DIMENSIONAMENTO.....	57
5.1	Escolha dos Painéis	58
5.2	Dimensionamento das Baterias	59
6	CONCLUSÃO.....	60
7	BIBLIOGRAFIA	62

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Faixas de Energia	5
Figura 2: Corte transversal de uma célula fotovoltaica	6
Figura 3: Efeito fotovoltaico na junção PN	7
Figura 4: Estrutura de participação das fontes de energia no Brasil (Fonte: EPE, 2007)	15
Figura 5: Célula de silício monocristalino.....	21
Figura 6: Célula de silício policristalino.....	22
Figura 7: Célula de silício amorfo	23
Figura 8: Conexão de células em paralelo	26
Figura 9: Conexão de células em série	26
Figura 10: Curva característica IxV típica de uma célula de silício monocristalino	28
Figura 11: Curva típica PxV para célula de silício monocristalino	28
Figura 12: Parâmetros de potência máxima.....	29
Figura 13: Efeito causado pela variação de intensidade luminosa da luz na curva característica IxV para um módulo fotovoltaico	30
Figura 14: Efeito causado pela temperatura na célula na curva característica IxV (para 1000 W/m ²) em um módulo fotovoltaico de silício cristalino.....	31
Figura 15: Estrutura de uma bateria de chumbo-ácido selada (Fonte: Catálogo Baterias Moura)	33
Figura 16: Gráfico da relação entre a profundidade média de descarga diária durante um ciclo e o número de ciclos.	34
Figura 17: Circuito elétrico básico de controladores de carga tipo paralelo	37
Figura 18: Circuito elétrico básico de controladores de carga tipo série.....	37

Figura 19: Sistema isolado com carga CC sem armazenamento.....	40
Figura 20: Sistema isolado com armazenamento e cargas CC.....	41
Figura 21: Sistema isolado sem armazenamento para alimentação de cargas CA.....	41
Figura 22: Sistema isolado com armazenamento e seguidor do ponto de máxima potência.....	42
Figura 23: Exemplo de configuração de sistema híbrido.	43
Figura 24: Sistema integrado à rede.	44
Figura 25: Sistema fotovoltaico conectado à rede (Fonte: Rütther).....	44
Figura 26: Sistema fotovoltaico em Sumba, Indonésia, capaz de fornecer água potável para 4000 pessoas.	47
Figura 27: Eletrificação rural na Tunísia.....	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Distribuição de sistemas e de potências nas fases do PRODEEM	14
Tabela 2: Características de sistemas de bombeamento d'água com bombas CC.....	46

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

APAEB – Associação dos Pequenos Agricultores de Município de Valente

BEN – Balanço Energético Nacional

CELPE – Companhia Energética de Pernambuco

CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais

CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

CESP – Companhia Energética de São Paulo

CHESF – Companhia Hidro Elétrica do São Francisco

COELCE – Companhia Energética do Ceará

COPEL – Companhia Paranaense de Energia

CRESESB – Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito

ELETRONORTE – Centrais Elétricas do Norte do Brasil

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

FAE – Fontes Alternativas de Energia

MME – Ministério de Minas e Energia

NAPER – Núcleo de Apoio a Projetos de Energias Renováveis

NREL – *National Renewable Energy Laboratory*

ONG – Organização Não Governamental

ONU – Organização das Nações Unidas

PNUD – Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento

PRODEEM – Programa de Desenvolvimento Energético dos Estados e Municípios

PROINFA – Programa de Incentivo às Fontes de Energia Elétrica

UFPE – Universidade Federal de Pernambuco

UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro

USP – Universidade de São Paulo

1 INTRODUÇÃO

O crescimento contínuo da população e do consumo de energia à escala mundial, associado à natureza finita dos combustíveis fósseis e à poluição gerada pela sua queima, questiona o atual modelo energético. A procura de um modelo baseado no desenvolvimento sustentável a longo prazo tem motivado interesse crescente por formas de energia mais limpas e renováveis, de modo a permitir a satisfação das necessidades energéticas, sem alterar de maneira acentuada as condições de vida no planeta. É nesse contexto que se insere a energia solar fotovoltaica, que é uma forma de geração de energia capaz de suprir, com inúmeras vantagens sobre as formas tradicionais de geração, determinadas necessidades.

O presente Projeto justifica-se pelo interesse que as fontes renováveis de energia como um todo tem despertado em toda sociedade, em todos os cantos do planeta, posto que o crescimento desenfreado da do número de habitantes do planeta, hoje estimado em quase sete bilhões, e o consumo intensivo de recursos fósseis evidenciam, cada vez mais, a natureza finita dos mesmos. Se, por um lado, tal fato causa certa preocupação acerca do futuro da Terra, que a muitos parece nebuloso, por outro tem servido como fonte inspiradora para que sejam buscados novos meios de geração e produção de energia que exerçam pouca ou nenhuma agressão ao meio-ambiente.

Este Projeto de Graduação tem por objetivo, portanto, fornecer uma visão ampla e concisa acerca de características e aplicações de sistemas de energia solar fotovoltaica, e sua importância estratégica no contexto social e econômico global, servindo, também, como fonte de consulta para alunos do curso de graduação em Engenharia Elétrica.

2 A ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

A energia solar fotovoltaica é obtida através da conversão da radiação solar em eletricidade por intermédio de materiais semicondutores. Esse fenômeno é conhecido como Efeito Fotovoltaico.

O Efeito Fotovoltaico foi observado pela primeira vez em 1839 pelo físico francês Edmund Becquerel, numa solução de selênio. Becquerel notou o aparecimento de uma tensão entre os eletrodos de solução condutora, quando esta era iluminada pela luz solar. Mais tarde, por volta do ano de 1870, o efeito fotovoltaico foi estudado em sólidos, tal como o selênio e, por volta de 1880, a primeira célula fotovoltaica foi construída utilizando-se o selênio. A eficiência desta célula era na faixa de 2%.

Pesquisas em aplicações práticas para a tecnologia fotovoltaica foram iniciadas nos Estados Unidos da América na década de 1950. Em 1954, o Laboratório Bell produziu a primeira célula fotovoltaica de silício de junção PN. A partir de então se trabalhou na obtenção de um sistema realizável e de longa duração para sistemas de alimentação de satélites.

Com a crise mundial de energia de 1973/74, a preocupação em estudar novas formas de produção de energia fez com que a utilização de células fotovoltaicas não se restringisse somente à programas espaciais, mas que fosse intensamente estudada e utilizada no meio terrestre para suprir o fornecimento de energia.

Existem hoje muitos materiais semicondutores apropriados para a conversão fotovoltaica. Entre o silício cristalino e o silício amorfo hidrogenado, que são os mais comumente usados, há diferenças de estrutura. No primeiro, os átomos ocupam posições regulares no espaço, formando uma rede perfeitamente periódica (cristal). No segundo, que é de utilização mais recente e mais promissora do ponto de vista econômico, essa periodicidade

não é respeitada. Alguns dos defeitos que acompanham a estrutura imperfeita são compensados com átomos de hidrogênio. Filmes muito finos de silício amorfo hidrogenados são suficientes para a fabricação de células solares relativamente eficientes. Outros materiais como arseneto de gálio e filmes finos de CdS-Cu₂S, e CdS-InP estão sendo pesquisados. Estes filmes finos não têm sido fabricados com células discretas, mas são depositados diretamente em um substrato, tal como uma lâmina de vidro ou metal, sendo relativamente mais baratos que as pastilhas de silício.

Os principais eventos na história do desenvolvimento dos equipamentos de conversão de energia solar fotovoltaica são descritos abaixo:

- (1839) Efeito Fotovoltaico (Becquerel);
- (1870) Efeito Fotovoltaico estudado em sólidos;
- (1880) Construção da primeira célula fotovoltaica;
- (1950) Início das pesquisas para aplicações práticas;
- (1954) Primeira célula fotovoltaica de silício;
- (1973) Estudo de novas aplicações.

Em laboratório, é possível a fabricação de células solares de silício cristalino com até 27% de eficiência de conversão; as produzidas industrialmente apresentam uma eficiência da ordem de 15 a 18 %. No caso do silício amorfo hidrogenado, obtêm-se de 10 a 12 % de eficiência em laboratório, e de 7 a 8 % nos módulos produzidos maciçamente. Porém seu custo de fabricação é menor que o das células de silício cristalino. Muitos laboratórios no mundo estão empenhados em desenvolver tecnologias que otimizem os parâmetros de custo e eficiência.

A eletricidade solar fotovoltaica é considerada uma tecnologia energética promissora. As células solares convertem diretamente a energia solar - a mais abundante fonte de energia renovável - em eletricidade. O processo de geração, executado por dispositivos semicondutores, não tem partes móveis, não produz cinzas nem outros resíduos e, por não liberar calor residual, não altera o equilíbrio da biosfera. Como não envolve queima de combustíveis, evita por completo o efeito estufa.

Uma vez que os sistemas são modulares, a eletricidade solar fotovoltaica tem múltiplas aplicações: os módulos necessários à geração da potência requerida podem ser rapidamente instalados. A ampliação da potência é obtida pela simples adição de módulos. Os sistemas são freqüentemente usados nas telecomunicações, como em repetidoras de microondas. Nos países em desenvolvimento as aplicações ideais encontram-se nas áreas isoladas ou distantes das redes de distribuição de energia elétrica: comunicações, bombeamento de água, processamento de alimentos, sistemas de refrigeração, sinalização automática ou eletrificação de cercas.

A geração de grandes potências, da ordem de dez megawatts, tem sido empreendida com sucesso nos EUA. Na Europa e no Japão, centrais menores alimentam as redes comerciais, permitindo economia de combustíveis fósseis. Até o momento, o quilowatt-hora de origem solar custa de dois a quatro vezes mais que o produzido por métodos convencionais. Porém, à medida que as tecnologias evoluem, esses custos tendem a diminuir e espera-se, que num futuro próximo, possam competir com os de geração de eletricidade pela queima de combustíveis fósseis ou nucleares, o que permitirá a expansão de suas aplicações. A descoberta de novos materiais e tecnologias além da adoção de escalas maciças de produção poderá fazer da conversão fotovoltaica uma das fontes energéticas mais convenientes para a humanidade.

2.1 Efeito Fotovoltaico

O efeito fotovoltaico dá-se em materiais da natureza denominados semicondutores, que são materiais que conduzem eletricidade de forma mais efetiva que os isolantes e menos do que os condutores. Eles se caracterizam pela presença de faixas de energia onde é permitida a presença de elétrons (faixa de valência) e de outra onde totalmente "vazia" (faixa de condução). Entre estas duas faixas se encontra a faixa proibida ou hiato energético. É a largura da faixa proibida que determina se o material é semicondutor. Enquanto materiais isolantes têm uma faixa proibida larga, da ordem de 6 eV, os semicondutores apresentam faixa proibida média, da ordem de 1 eV. Logo fótons, na faixa da luz visível, com energia superior ao hiato de energia (*gap*) do material podem excitar elétrons da faixa de valência para a faixa de condução. Na Figura 1 são representadas as faixas de energia, bem como a faixa proibida.



Figura 1: Faixas de Energia
(Fonte: <http://novaeletronica.net/curso/cap17.htm>, em 12/11/2008)

Entre os semicondutores, o mais usado para a aplicação fotovoltaica é o silício. Seus átomos se caracterizam por possuírem quatro elétrons que se ligam aos vizinhos, formando uma rede cristalina. Se adicionarmos, a esta rede, átomos com cinco elétrons de ligação, como o fósforo, haverá um elétron em excesso, fracamente ligado ao átomo. Logo, com pouca

energia, pode-se deslocá-lo para a faixa de condução. Diz-se que o fósforo é um dopante doador de elétrons e denomina-se dopante N ou impureza N.

Se, por outro lado, forem introduzidos átomos com apenas três elétrons de ligação, como é o caso do boro, haverá uma falta de um elétron para satisfazer as ligações com os átomos de silício da rede. Esta falta de elétron é denominada buraco ou lacuna e ocorre que, com pouca energia térmica, um elétron de um sítio vizinho pode passar a esta posição, fazendo com que o buraco se desloque. Diz-se, portanto, que o boro é um dopante receptor (aceitador) de elétrons e denomina-se dopante P ou impureza P.

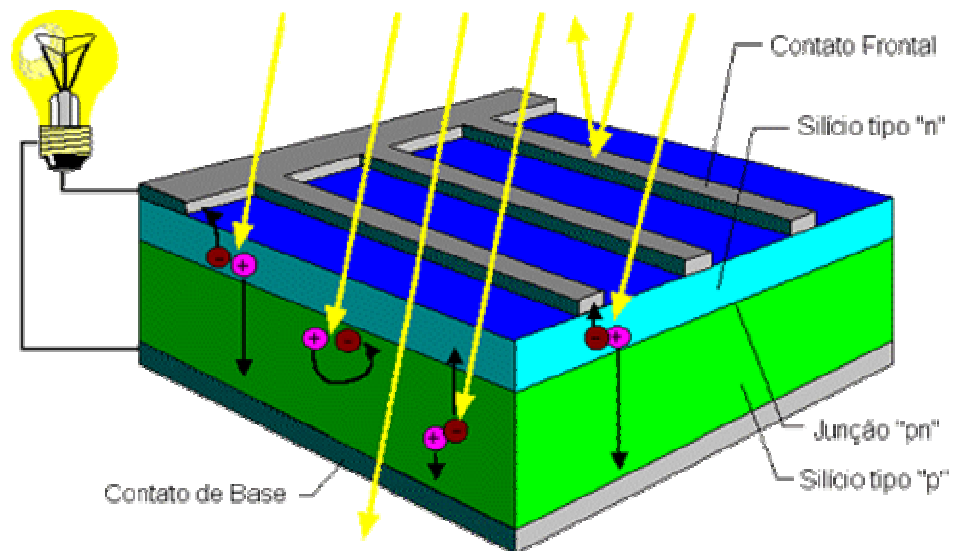


Figura 2: Corte transversal de uma célula fotovoltaica
(Fonte: <http://www.cresesb.cepel.br/tutorial/solar/images/Image89.gif>, em 12/11/2008)

Partindo de um silício puro e introduzindo-se em uma face átomos de boro e, em outra, átomos de fósforo, forma-se uma junção PN. O que ocorre nesta junção é que elétrons livres do lado N passam ao lado P onde encontram os buracos que os capturam. Isto faz com que haja um acúmulo de elétrons no lado P, tornando-o negativamente carregado e uma

redução de elétrons do lado N, que o torna eletricamente positivo. Estas cargas aprisionadas dão origem a um campo elétrico permanente que dificulta a passagem de mais elétrons do lado N para o lado P. Este processo alcança um equilíbrio quando o campo elétrico forma uma barreira capaz de barrar os elétrons livres remanescentes no lado N.

Se a junção PN for exposta a fótons com energia maior que o *gap* (faixa proibida), ocorrerá uma geração de pares elétrons-lacuna. Se isto acontecer na região onde o campo elétrico é diferente de zero, as cargas serão aceleradas, gerando assim, uma corrente através da junção. Este deslocamento de cargas dá origem a uma diferença de potencial (efeito fotoelétrico). Se as duas extremidades do "pedaço" de silício forem conectadas por um fio, haverá uma circulação de elétrons. Esta é a base do funcionamento das células fotovoltaicas.

A Figura 3 exibe a representação gráfica de como o efeito fotovoltaico se dá dentro de uma célula fotovoltaica, desde a movimentação inicial de elétrons, até a geração de corrente.

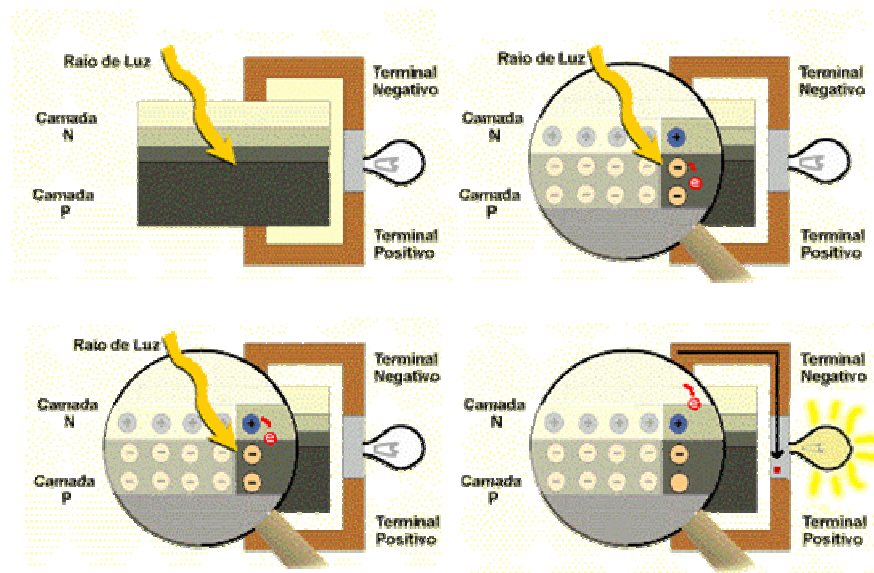


Figura 3: Efeito fotovoltaico na junção PN

(Fonte: <http://www.vivercidades.org.br/publicue222>, acesso em 12/11/2008)

2.2 Energia Solar Fotovoltaica no Brasil

O Brasil possui um ótimo índice de radiação solar, principalmente o Nordeste. Na região do semi-árido estão os melhores índices, com valores típicos de 1.752 a 2.190 kWh/m² por ano de radiação incidente. Essa característica coloca o país em vantagem com relação aos países industrializados no que tange à utilização da energia solar fotovoltaica.

O Brasil é um dos países de maior índice de radiação solar do mundo, conforme pode ser observado no Anexo I. Os baixos rendimentos das tecnologias para sua conversão em calor ou eletricidade e os elevados investimentos iniciais constituem, no entanto, obstáculos importantes para seu aproveitamento aqui no país. Em alguns casos, porém, em particular no meio rural, se atingem as condições de viabilidade econômica para sua utilização na secagem de produtos agrícolas, no bombeamento de água e na geração de eletricidade em pequena escala.

O Brasil é o mais avançado país da América do Sul, no que diz respeito ao desenvolvimento das energias renováveis. Foi o primeiro país do Terceiro Mundo a fabricar comercialmente a célula fotovoltaica, a partir do silício monocristalino, não se limitando à simples montagem dos painéis solares. Em 1979, surgiu a primeira fábrica de módulos fotovoltaicos no país, como consequência da crise do petróleo, iniciada em 1973. A Fone-Mat, uma empresa da área de telecomunicações, sediada na cidade de São Paulo, começou a montar módulos fotovoltaicos utilizando células fotovoltaicas importadas da Solarex, com o objetivo de atender ao mercado de telecomunicações. (TOLMASQUIM)

Em Março de 1980, a empresa Heliodinâmica se instalou em Vargem Grande Paulista, a 35 km da cidade de São Paulo, junto à Rodovia Raposo Tavares, em uma área de 124.000 m², sendo que suas instalações ocupavam uma área de 4.000 m² (HELIODINÂMICA, 2008).

Inicialmente, esta empresa fabricava coletores solares planos para aquecimento de água de uso residencial e industrial. Em 1982, a Heliodinâmica começou a produzir tarugos cilíndricos e lâminas de Silício monocristalino, de 5 polegadas de diâmetro. Em 1985, tinha uma capacidade instalada de produção de módulos fotovoltaicos de 1 MWp/ano, escala de produção típica de fábricas instaladas no exterior e um capital de US\$ 10 milhões, empregando 100 pessoas. Além de fabricar células e módulos fotovoltaicos a Heliodinâmica desenvolveu componentes para sistemas de eletrificação rural, como por exemplo, motores de corrente contínua para sistemas de bombeamento de águas superficiais e profundas, sistemas de telecomunicações e cercas elétricas.

Na época de sua criação, a Heliodinâmica foi favorecida pela Lei da Informática, que proibiu a importação de equipamentos fotovoltaicos por cerca de 10 anos. Porém, as barreiras à importação começaram a ser retiradas em Outubro de 1992 e, com o seu fim, a Heliodinâmica não conseguiu competir com as empresas existentes no mercado internacional e atualmente encontra-se com suas atividades praticamente paralisadas (TOLMASQUIM).

Atualmente, o mercado nacional é inteiramente atendido por empresas multinacionais. Na verdade, não existe propriamente um mercado, mas alguns compradores, como o programa de eletrificação rural “Luz para Todos”, o mercado de telecomunicações, concentrado em poucas empresas e outros compradores, como a Petrobras e alguns usuários particulares, que são responsáveis por uma pequena parcela do mercado (TOLMASQUIM).

A energia solar é a solução ideal para áreas afastadas e ainda não eletrificadas, especialmente num país como o Brasil onde se encontram bons índices de insolação em quaisquer partes do território. Soma características vantajosamente positivas para nosso sistema ambiental, pois o Sol, trabalhando como um imenso reator à fusão, irradia na terra todos os dias um potencial energético extremamente elevado e incomparável a qualquer outro

sistema de energia, sendo a fonte básica e indispensável para praticamente todas as fontes energéticas utilizadas pelo homem.

Atualmente há vários projetos, em curso ou em operação, para o aproveitamento da energia solar no Brasil, particularmente por meio de sistemas fotovoltaicos de geração de eletricidade, visando ao atendimento de comunidades isoladas da rede de energia elétrica e ao desenvolvimento regional.

Além do apoio técnico, científico e financeiro recebido de diversos órgãos e instituições brasileiras (MME, Eletrobrás/CEPEL e universidades, entre outros), esses projetos têm tido o suporte de organismos internacionais, particularmente a Agência Alemã de Cooperação Técnica – GTZ e do Laboratório de Energia Renovável dos Estados Unidos (*National Renewable Energy Laboratory*) – NREL/DOE. Também a área de aproveitamento da energia solar para aquecimento de água tem adquirido importância nas regiões Sul e Sudeste do País, onde uma parcela expressiva do consumo de energia elétrica é destinada para esse fim, principalmente no setor residencial.

O Programa Luz no Campo, lançado em 1999, pretendia eletrificar um milhão de domicílios rurais, em quatro anos, metade dos quais na região Nordeste, através da extensão de rede convencional. Com a interferência da Winrock, organização não governamental, foi incluído no programa um componente de eletrificação fotovoltaica, para o Estado da Bahia, com uma dotação de 10 milhões de dólares.

Essa política pública de eletrificação fotovoltaica na zona rural é resultado de um processo iniciado nos anos 80, com as primeiras aplicações de tecnologia fotovoltaica. Desde então, esse nicho do mercado das energias renováveis já vem sendo disputado pelas empresas produtoras de módulos e componentes fotovoltaicos, a nacional representada pela Heliodinâmica, e as internacionais como a Siemens, Solarex, *New World Power* e *Golden Photon*.

A cooperação financeira das instituições internacionais GTZ e NROE promoveram a difusão das aplicações da tecnologia fotovoltaica através de projetos pilotos, tais como o Projeto Eldorado e o Projeto de Cooperação CEPEL-NREL.

O Projeto Eldorado envolveu a GTZ alemã e a Companhia Energética do Ceará – COELCE, num projeto piloto com sistemas de bombeamento fotovoltaico; com a Companhia Energética de Minas Gerais – CEMIG, o projeto da fazenda eólica e, posteriormente, abrangeu outros projetos de bombeamento e eletrificação fotovoltaicos, em parcerias com as concessionárias dos Estados de Pernambuco (Companhia Energética de Pernambuco - CELPE), São Paulo (Companhia Energética de São Paulo - CESP) e Paraná (Companhia Paranaense de Energia - COPEL).

Os projetos demonstrativos da cooperação CEPEL-NREL, em conjunto com as concessionárias estaduais, empregaram a tecnologia fotovoltaica na iluminação de domicílios e escolas, em vilas dos Estados de Pernambuco e Ceará. Na segunda fase, priorizou, na Bahia, os usos comunitários e produtivos da tecnologia fotovoltaica; em Minas Gerais, introduziu os aerogeradores para o bombeamento e, no Amazonas e no Pará, sistemas híbridos solar, eólico e diesel.

A cooperação internacional abrange também os projetos fotovoltaicos financiados pelas ONG's (Organizações Não-Governamentais), que apoiaram diferentes experiências em várias regiões do Brasil. A mais ilustrativa é o projeto piloto das cercas eletrificadas para a criação de caprinos, desenvolvido pela Associação de Pequenos Agricultores do Município de Valente (APAEB), em cooperação com a ONG belga SOS PG. O êxito dessa experiência motivou a criação de um fundo comunitário, que possibilitou a eletrificação de domicílios dos associados.

Nos anos 90, outras aplicações fotovoltaicas, não vinculadas a projetos de cooperação, mas à programas sociais das concessionárias, foram desenvolvidas em alguns estados. Na

Bahia, o Projeto Sertanejo aplicou o bombeamento fotovoltaico para irrigação. No estado de São Paulo, foram eletrificados 11 Centros Comunitários de uma estação ecológica e criado o Projeto ECOWATT, para a eletrificação de 120 domicílios no Vale do Ribeira. No Paraná, foi lançado o Programa Lig Luz Solar, para atender turistas e comunidades de pescadores, e ainda foram desenvolvidas várias experiências com a tecnologia fotovoltaica, tais como o centro de carga de baterias, a fábrica de raspas de gelo e o *freezer* fotovoltaico (SERPA).

No âmbito das universidades públicas, federais e estaduais, os projetos de pesquisas objetivaram o aprimoramento de componentes do sistema fotovoltaico, como os controladores de carga e as baterias eletroquímicas. Também foram criados, em algumas universidades, os laboratórios demonstrativos - as casas solares, como recurso pedagógico visando a divulgação da tecnologia. Alguns programas interdisciplinares de pós-graduação em energia incluíram nos currículos de formação as atividades práticas de desenvolvimento de projetos pilotos, com aplicações da tecnologia junto às comunidades rurais.

Neste contexto, são importantes os projetos desenvolvidos no sertão pernambucano pelo Núcleo de Apoio a Projetos de Energias Renováveis – NAPER, da Universidade Federal de Pernambuco, e as diferentes pesquisas e projetos desenvolvidos pelo Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos do Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo-LSF-IEE/USP, em comunidades caiçaras do Vale do Ribeira, no Estado de São Paulo, e nas comunidades caboclas do Alto Rio Solimões, no Amazonas.

Nas concessionárias de energia, ainda sob as mudanças do processo de privatização, as iniciativas de difusão da tecnologia fotovoltaica são quase ausentes, com exceção da CEMIG, que mantém um programa de pré-eletrificação em comunidades do Vale do Jequitinhonha, até que seja possível a extensão de rede convencional.

Uma significativa parcela dos sistemas fotovoltaicos existentes no País foi instalada no âmbito do Programa de Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios – PRODEEM,

instituído por decreto presidencial, em dezembro de 1994, no âmbito da Secretaria de Energia do Ministério de Minas e Energia – MME. Desde a sua criação, foram destinados US\$ 37,25 milhões para 8.956 projetos e 5.112 kWp de potência.

Como indicado na Tabela 1, esses projetos incluem bombeamento de água, iluminação pública e sistemas energéticos coletivos. A implementação do PRODEEM foi dividida em 5 fases, afim de facilitar o processo de instalação dos sistemas. Cada fase engloba eventos e atividades que apresentam similaridades no que diz respeito aos objetivos, ambiência de realização (nível federal, regional, estadual e local) e organizações responsáveis (coordenação nacional do PRODEEM, coordenações regionais, estaduais e locais, etc.).

A Fase I, denominada Alinhamento Institucional e Formação dos Multiplicadores, é caracterizada pelos seguintes fatores:

- Realização de atividades conduzidas pela Coordenação Nacional do PRODEEM;
- Realização de eventos de articulação e alinhamento conceitual e metodológico com as empresas regionais (ELETRONORTE, CHESF, FURNAS e ELETROSUL);
- Realização de eventos de formação de multiplicadores da revitalização e capacitação do PRODEEM, no âmbito de atuação das empresas regionais.

A Fase II, denominada Atividades Preparatórias Para Revitalização e Capacitação, engloba atividades que acontecem em âmbito estadual.

A Fase III – Atividades de Revitalização e Capacitação nas Comunidades, contempla o conjunto de atividades que serão desenvolvidas pela equipe de revitalização em campo. Ela acontece na própria comunidade e é de responsabilidade da organização executora.

Na Fase IV – Procedimentos Pós-Revitalização, estão agrupadas atividades desenvolvidas após o processo de revitalização dos sistemas e capacitação da comunidade. São atividades que buscam garantir a sustentabilidade do processo de revitalização.

A Fase V, que teve início em 2002, por sua vez, consiste apenas na energização de escolas rurais.

A maioria dos sistemas do PRODEEM são sistemas energéticos e instalados em escolas rurais. Na Fase V todos os 3.000 sistemas destinados a energizar escolas são iguais, capazes de fornecer diariamente cerca de 1.820 Wh, com a seguinte composição: seis painéis de 120 Wp (total de 720 Wp); oito baterias de 150 Ah (total de 1.200 Ah); e um inversor de 900 Watts (110 ou 220 V) (MME).

Tabela 1: Distribuição de sistemas e de potências nas fases do PRODEEM

Fase		I	II	III	Bomb.	IV	V	Total
Sistemas de geração de energia	Qtd.	190	387	677	-	1660	3000	5914
	kWp	87	200	419	-	972	2172	3850
Sistemas de bombeamento d'água	Qtd.	54	179	176	800	1240	-	2449
	kWp	78	211	135	235	696	-	1355
Sistemas de iluminação pública	Qtd.	137	242	-	-	-	-	379
	kWp	7,5	17	-	-	-	-	24,5

Fonte: MME

Mesmo o Brasil já tendo dado início ao incentivo às fontes renováveis de energia e tendo um vasto potencial para a aplicação dessas, a energia solar fotovoltaica não tem sido contemplada pela legislação. O que acontece é que, atualmente, somente a hidroeletricidade e a biomassa estão contribuindo significativamente para o suprimento energético do país. A

Figura 4 mostra a Matriz Energética Brasileira e o claro predomínio da biomassa e da hidroeletricidade sobre as demais fontes de energia renovável.

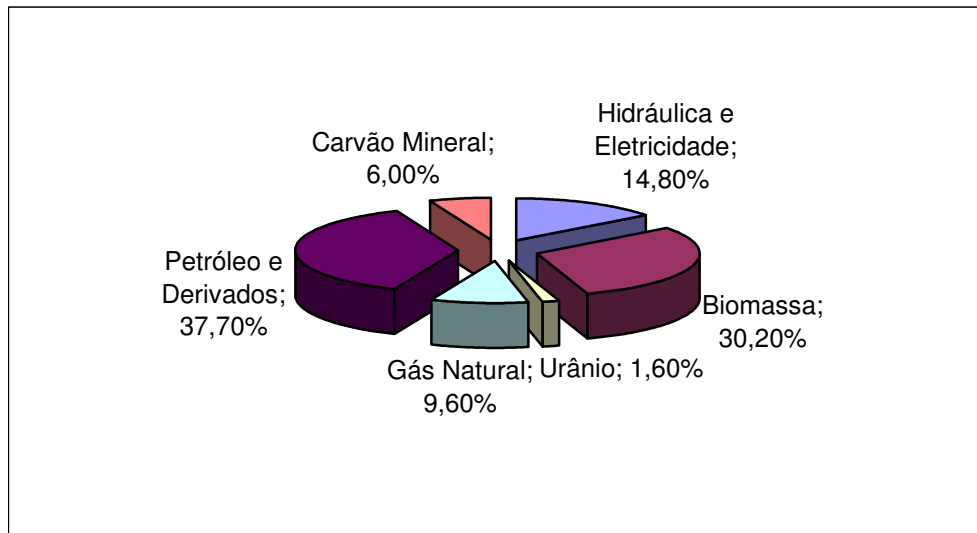


Figura 4: Estrutura de participação das fontes de energia no Brasil (Fonte: EPE, 2007)

Uma visão geográfica mais detalhada da distribuição dos sistemas fotovoltaicos instalados por todo o País é dificultada pelos seguintes fatores: a natureza desses projetos; a sua localização, espalhados por pequenas e remotas localidades no território nacional; e a multiplicidade de empresas e instituições envolvidas na sua implantação e operação (ANEEL).

De acordo com SERPA, a capacidade total instalada de sistemas fotovoltaicos no Brasil é estimada em mais de 12 MWp.

2.3 Comparação entre a geração de energia elétrica através de módulos solares fotovoltaicos e outras fontes

As fontes de energia podem ser classificadas em:

- Fósseis, incluindo petróleo, carvão e gás natural;

- Nucleares;
- Solares, incluindo os raios solares e a energia conseqüente deles, tais como ondas e ventos, força hidráulica e materiais de origem vegetal, os quais são produzidos pelo Sol através da fotossíntese, como a biomassa.

A utilização de máquinas rotativas, tais como turbina e gerador, necessitam de uma rotina de manutenção mais complexa, devido ao desgaste natural das peças móveis, além de gerar poluição sonora durante o seu funcionamento. A queima, em uma caldeira, de combustível fóssil emite gases nocivos ao meio ambiente. A necessidade de diversos componentes associados ao processo aumentam a possibilidade de falhas na geração de energia.

Já a energia fotovoltaica possui apenas células solares, responsáveis pela geração de energia, e de um conversor CC-CA para estabelecer a tensão e frequência para os valores nominais dos aparelhos. Este processo é mais simples, sem emissão de gases poluentes ou ruídos e com uma necessidade mínima de manutenção.

Os recursos fósseis precisam, intrinsecamente, serem extraídos dos locais onde estão concentrados, transportados para as refinarias onde são preparados para a queima, movidos novamente para as usinas e, após a geração de eletricidade, esta deve ser transmitida através de linhas de alta tensão para o consumidor, enquanto que os resíduos devem ser eliminados. A energia solar, por outro lado, não necessita ser extraída, refinada e nem transportada para o local da geração, o qual é próximo à carga, evitando os custos com a transmissão em alta tensão.

Algumas externalidades ambientais, as quais não são agregadas adequadamente ao custo da energia convencional devido ao grau de consciência ainda imaturo da sociedade,

especialmente nas décadas passadas, período em que diversas usinas foram construídas, são (SCHEER):

- a) Emissão de gases poluentes para a atmosfera;
- b) Desastres ecológicos durante o transporte de petróleo;
- c) Contaminação da água utilizada durante o refino do carvão;
- d) Inundação de ecossistemas e parques arqueológicos para a construção de usinas hidrelétricas;
- e) Aumento da temperatura da água do mar, ocasionado por usinas nucleares, afetando peixes e demais seres marinhos;
- f) Risco de acidentes nucleares. Os danos causados pelo acidente de Chernobyl foram avaliados em mais de 350 bilhões de dólares.

Externalidades políticas também existem, as quais são difíceis de serem mensuradas, porém afetam diretamente a economia dos países envolvidos, tais como os conflitos armados para controlar países ricos em petróleo, podendo citar como exemplo a Guerra do Golfo (1990-1991), a Guerra da Chechênia (1994-1996) e a Guerra do Iraque (2003).

A economia de um país dependente de petróleo fica sujeita à crise de países alheios, exportadores, o que torna a economia global susceptível a uma instabilidade generalizada.

Assim, torna-se um custo político vital ter o controle dos recursos fósseis potencialmente em perigo.

Existem também custos diretos associados ao processo de geração de energia através de fontes convencionais, os quais não são agregados ao custo final por terem sido beneficiados por subsídios, tais como: obtenção de terrenos gratuitamente, isenções fiscais durante vários anos e ajudas diretas do governo, o qual aplica dinheiro a fundo perdido para

viabilizar os empreendimentos. O PNUD (Programa das Nações Unidas Para o Desenvolvimento) menciona em seu informe *La energia después de Río*, publicado em 1996, subsídios para a energia convencional da ordem de 300 bilhões de dólares. Deste valor, estimou-se 90 bilhões de dólares para influenciar os preços da eletricidade em países em desenvolvimento (SCHEER).

2.4 Vantagens e Desvantagens

Quanto às vantagens, a energia solar fotovoltaica apresenta diversas. Trata-se de uma energia limpa, pois não gera nenhum tipo de poluição. A vida útil dos módulos é superior a 25 anos, requerendo mínima manutenção. A instalação é simples e não há consumo algum de combustível. A principal: não há conta de luz, afinal, o Sol nasce para todos, e de graça.

As vantagens fundamentais são:

- Não consome combustível;
- Não produz poluição nem contaminação ambiental;
- É silencioso;
- Tem uma vida útil superior a 25 anos;
- É resistente a condições climáticas extremas (granizo, vento, temperatura e umidade);
- Não possui peças móveis e, portanto, exige pouca manutenção (só a limpeza do painel);
- Permite aumentar a potência instalada através de incorporação de módulos adicionais;
- Gera energia mesmo em dias nublados.

As principais desvantagens:

- As células fotovoltaicas necessitam de tecnologia sofisticada para a sua fabricação;
- O custo de investimento é elevado;
- O rendimento real de conversão de um módulo é reduzido, face ao custo de investimento;
- Seu rendimento é atrelado ao índice de radiação, temperatura, quantidade de nuvens, dentre outros.

3 A CÉLULA FOTOVOLTAICA

As células fotovoltaicas são os elementos responsáveis pela conversão direta da luz solar em eletricidade. É neles que ocorre o efeito fotoelétrico. As primeiras células produzidas possuíam baixo rendimento, em torno de 2%, e custavam em média US\$ 600/W. Porém, atualmente já se pode encontrar células com rendimento acima de 10% , podendo atingir 18% dependendo do material utilizado e com custo médio de US\$ 6,00/W, tendendo a diminuir cada vez mais. Elas podem ser fabricadas usando-se diversos tipos de materiais semicondutores. Porém as mais utilizadas são as de silício, que podem ser constituídos e classificados de acordo com a sua estrutura molecular, que são os monocristalinos, policristalinos e silício amorfo.

3.1 Silício Monocristalino

A célula de silício monocristalino (Figura 5) é historicamente a mais usada e comercializada como conversor direto de energia solar em eletricidade e a tecnologia para sua fabricação é um processo básico muito bem constituído. A fabricação da célula de silício começa com a extração do cristal de dióxido de silício. Este material é desoxidado em grandes fornos, purificado e solidificado. Este processo atinge um grau de pureza entre 98 e 99% o que é razoavelmente eficiente sob o ponto de vista energético e custo. Este silício para funcionar como célula fotovoltaica necessita de outros dispositivos semicondutores e de um grau de pureza maior, devendo chegar à faixa de 99,9999%.

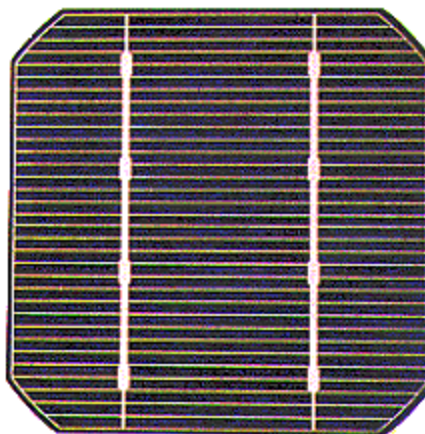


Figura 5: Célula de silício monocristalino
(Fonte: Manual de Engenharia Para Sistemas Fotovoltaicos)

Para utilizar o silício na indústria eletrônica, além do alto grau de pureza, o material deve ter a estrutura monocristalina e baixa densidade de defeitos na rede. O processo mais utilizado para chegar às qualificações desejadas é chamado "Processo Czochralski". O silício é fundido juntamente com uma pequena quantidade de dopante, normalmente o boro que é do tipo P. Com um fragmento do cristal devidamente orientado e sob rígido controle de temperatura, vai-se extraindo do material fundido um grande cilindro de silício monocristalino levemente dopado. Este cilindro obtido é cortado em fatias finas de aproximadamente $300\mu\text{m}$.

Após o corte e limpeza de impurezas das fatias, deve-se introduzir impurezas do tipo N de forma a obter a junção. Este processo é feito através da difusão controlada onde as fatias de silício são expostas a vapor de fósforo em um forno onde a temperatura varia entre 800 a 1000°C .

Dentre as células fotovoltaicas que utilizam o silício como material base, as monocristalinas são, em geral, as que apresentam as maiores eficiências. As fotocélulas comerciais obtidas com o processo descrito atingem uma eficiência de até 15% podendo chegar em 18% em células feitas em laboratórios.

3.2 Silício Policristalino

As células de silício policristalino (também conhecido como silício multicristalino), mostradas na Figura 6, são mais baratas que as de silício monocristalino por exigirem um processo de preparação das células menos rigoroso. A eficiência, no entanto, cai um pouco em comparação às células de silício monocristalino.

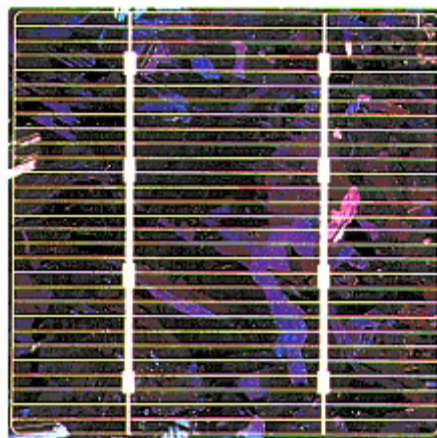


Figura 6: Célula de silício policristalino
(Fonte: Manual de Engenharia Para Sistemas Fotovoltaicos)

Podem ser preparadas pelo corte de um lingote, de fitas ou depositando um filme num substrato, tanto por transporte de vapor como por imersão. Nestes dois últimos casos somente o silício policristalino pode ser obtido. Cada técnica produz cristais com características específicas, incluindo tamanho, morfologia e concentração de impurezas. A eficiência teórica máxima do processo de conversão de luz solar em energia elétrica é de 27%, mas valores nas faixas de 15 a 18% são encontrados em produtos comerciais.

3.3 Silício Amorfo

Uma célula de silício amorfo difere das demais estruturas cristalinas por apresentar alto grau de desordem na estrutura dos átomos. A utilização de silício amorfo para uso em fotocélulas tem mostrado grandes vantagens tanto nas propriedades elétricas quanto no processo de fabricação. Por apresentar uma absorção da radiação solar na faixa do visível e podendo ser fabricado mediante deposição de diversos tipos de substratos, o silício amorfo vem se mostrando uma forte tecnologia para sistemas fotovoltaicos de baixo custo. Mesmo apresentando um custo reduzido na produção, o uso de silício amorfo apresenta duas desvantagens: a primeira é a baixa eficiência de conversão comparada às células mono e policristalinas de silício; em segundo, as células são afetadas por um processo de degradação logo nos primeiros meses de operação, reduzindo assim a eficiência ao longo da vida útil.



Figura 7: Célula de silício amorfo
(Fonte: Manual de Engenharia Para Sistemas Fotovoltaicos)

Por outro lado, o silício amorfo apresenta vantagens que compensam as deficiências acima citados, são elas:

- Processo de fabricação relativamente simples e barato;
- Possibilidade de fabricação de células com grandes áreas;
- Baixo consumo de energia na produção.

A fotografia de uma célula de silício amorfo pode ser vista na Figura 7.

4 SISTEMA FOTOVOLTAICO

Um sistema fotovoltaico de energia é composto por um ou mais módulos fotovoltaicos e por um conjunto de equipamentos complementares, como baterias, controladores de carga, inversores e outros equipamentos de proteção. Esses componentes variam de acordo com a aplicação do sistema fotovoltaico.

4.1 Módulo Fotovoltaico

Uma célula fotovoltaica possui baixa tensão e corrente de saída. Para se obter tensões e correntes de saídas adequadas para a sua utilização é feito o agrupamento de várias células formando um módulo fotovoltaico - ou painéis fotovoltaicos. O agrupamento em módulos é indispensável, visto que uma célula isolada fornece pouca energia elétrica, em uma tensão em torno de 0,4 volts no ponto de máxima potência.

O número de células conectadas em um módulo, e o tipo de arranjo – série ou paralelo – dependerá da tensão de utilização e da corrente elétrica desejada.

4.1.1 Associação em Paralelo

Células fotovoltaicas associadas em paralelo apresentam terminais do mesmo tipo ligados a um ponto em comum. Assim sendo, os terminais positivos são todos ligados a um mesmo ponto, enquanto os terminais negativos ligam-se a outro ponto.

Embora a tensão permaneça a mesma, a corrente total é a soma das correntes individuais de cada célula. A conexão de células fotovoltaicas é representada na Figura 8.

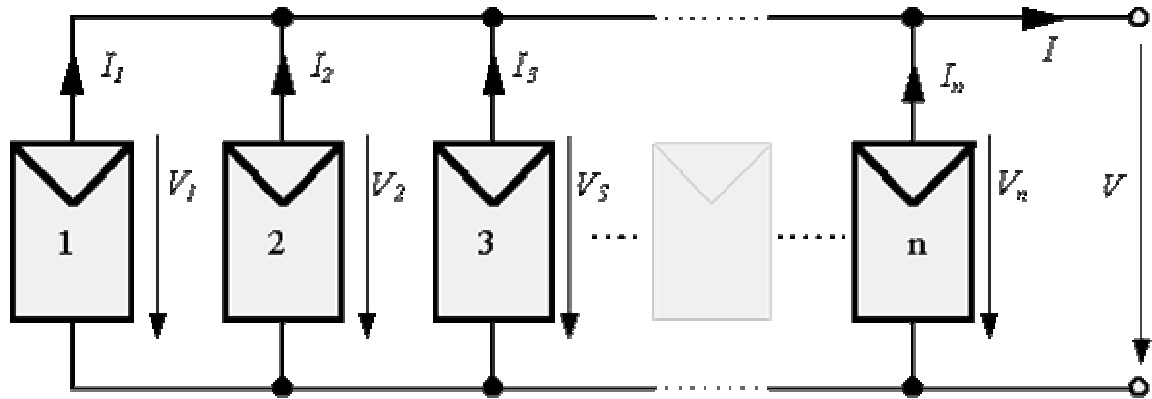


Figura 8: Conexão de células em paralelo
(Fonte: Manual de Engenharia Para Sistemas Fotovoltaicos)

4.1.2 Associação em Série

Na associação em série, cuja representação pode ser observada na Figura 9, o terminal positivo de um módulo é ligado ao terminal negativo de outro.

Neste caso a corrente será igual às correntes individuais, mas tensão total será o resultado do somatório das tensões de cada módulo.

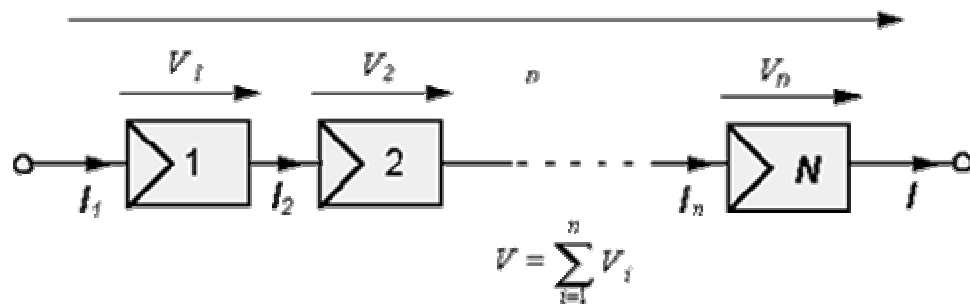


Figura 9: Conexão de células em série
(Fonte: Manual de Engenharia Para Sistemas Fotovoltaicos)

4.1.3 Características Elétricas dos Módulos Fotovoltaicos

Em geral, a potência dos módulos é dada pela potência de pico, expressa em watt pico (Wp). Entretanto, existem outras características elétricas que melhor caracterizam a funcionabilidade do módulo. As principais são (CRESESB, 2004):

- Voltagem de Circuito Aberto (V_{OC}): Máxima tensão que um dispositivo pode entregar sob condições determinadas de radiação e temperatura, correspondendo à circulação de corrente nula e, conseqüentemente, à potência nula;
- Corrente de Curto-Circuito (I_{SC}): Máxima corrente que pode entregar um dispositivo sob condições determinadas de radiação e temperatura correspondendo à tensão nula e, conseqüentemente, à potência nula;
- Potência Máxima (P_M): É o valor máximo de potência que pode entregar o dispositivo. Corresponde ao ponto da curva no qual o produto $V \times I$ é máximo;
- Voltagem de Máxima Potência (V_{MP}): É a única tensão para a qual a potência máxima poderá ser extraída;
- Corrente de Máxima Potência (I_{MP}): Corrente que o dispositivo entrega para potência máxima sob condições determinadas de radiação e temperatura.

4.1.3.1 Curva característica IxV

Quando se conecta uma célula fotovoltaica, medidas de tensão e corrente podem ser plotadas em gráfico. Para isso, basta que sejam variadas as condições de carga pois, desta feita, novos valores de tensão e corrente surgirão. Tais valores, quando representados num

mesmo gráfico e unidos através uma linha, dá origem ao que é chamado de Curva Característica IxV (Figura 10).

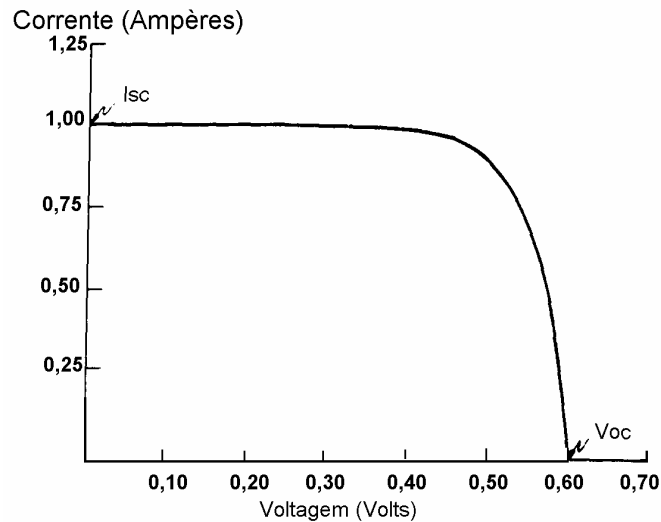


Figura 10: Curva característica IxV típica de uma célula de silício monocristalino (Fonte: Manual de Engenharia Para Sistemas Fotovoltaicos)

Para cada ponto da curva IxV o produto corrente-tensão representa a potência gerada para determinadas condições de operação. Na Figura 11 pode-se observar que para uma célula fotovoltaica há apenas uma tensão (e corrente correspondente) para qual a potência máxima pode ser extraída.

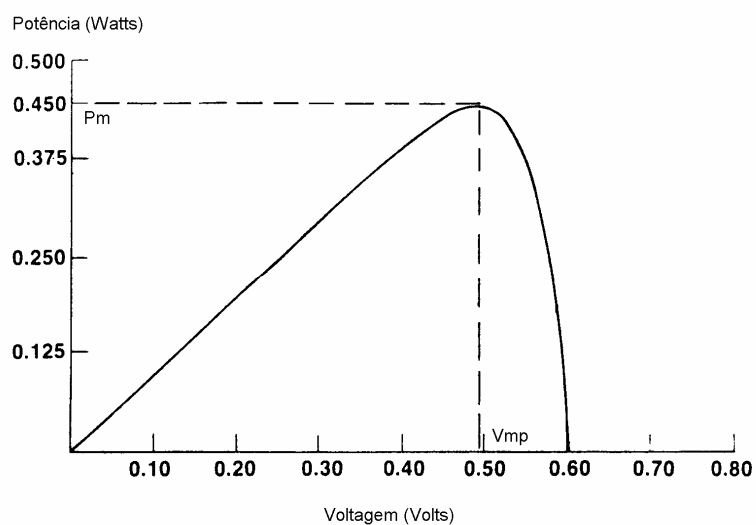


Figura 11: Curva típica PxV para célula de silício monocristalino (Fonte: Manual de Engenharia Para Sistemas Fotovoltaicos)

Já a Figura 12 mostra a curva característica $I \times V$ em superposição com a curva de potência.

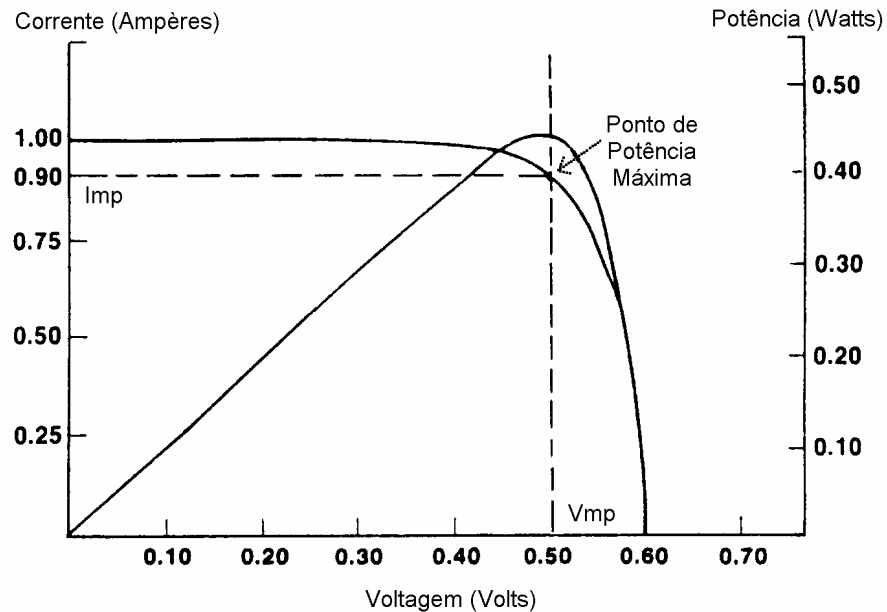


Figura 12: Parâmetros de potência máxima
(Fonte: Manual de Engenharia Para Sistemas Fotovoltaicos)

4.1.4 Fatores que afetam as características elétricas dos Módulos Fotovoltaicos

Os principais fatores que influenciam nas características elétricas de um painel são a Intensidade Luminosa e a Temperatura das Células. A corrente gerada nos módulos aumenta linearmente com o aumento da Intensidade luminosa. A condição padrão para plotagem das curvas características dos módulos é definida para uma radiação solar 1000 W/m^2 e temperatura de 25°C na célula. O aumento da temperatura na célula faz com que a eficiência do módulo caia, baixando assim os pontos de operação para potência máxima gerada.

a) Intensidade Luminosa:

O sol possui movimento aparente no céu de acordo com a hora do dia e com o dia do ano. Para receber maior intensidade luminosa é necessário fazer o acompanhamento desses movimentos. Entretanto, os módulos normalmente são instalados em posição fixa, devido ao elevado custo dos equipamentos que permitem sua movimentação (seguidores ou *trackers*). Dessa forma, é fundamental determinar a melhor inclinação para cada região em função da latitude local e das características da demanda.

A Figura 13 mostra que a corrente gerada pelo módulo aumenta linearmente com o aumento da intensidade luminosa.

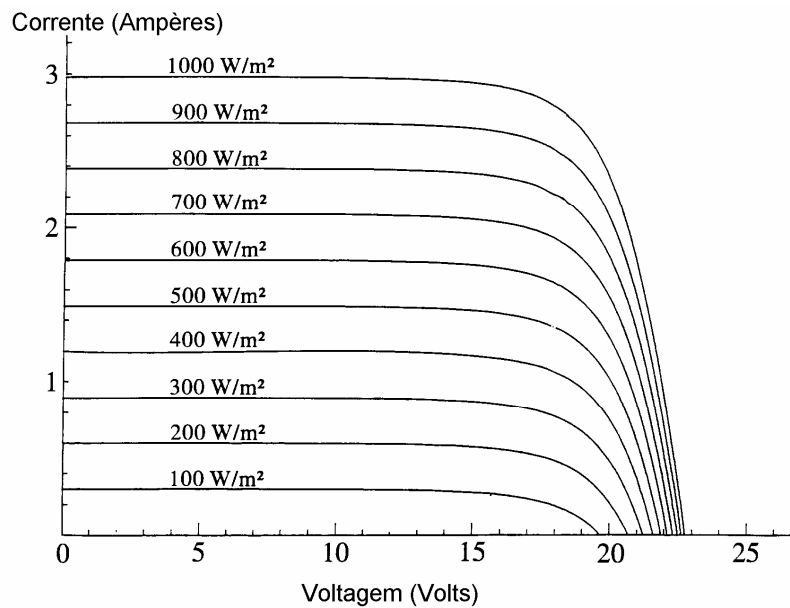


Figura 13: Efeito causado pela variação de intensidade luminosa da luz na curva característica IxV para um módulo fotovoltaico
(Fonte: Manual de Engenharia Para Sistemas Fotovoltaicos)

b) Temperatura das Células:

O aumento do nível de insolação eleva a temperatura da célula e, conseqüentemente, tende a reduzir a eficiência do módulo. Tal fato pode ser constatado no gráfico da Figura 14.

Isto se deve ao fato de que a tensão diminui significativamente com o aumento da temperatura, enquanto a corrente sofre uma elevação muito pequena, quase desprezível. Os módulos de silício amorfo apresentam uma menor influência da temperatura na potência de pico, embora também sofram redução no seu desempenho.

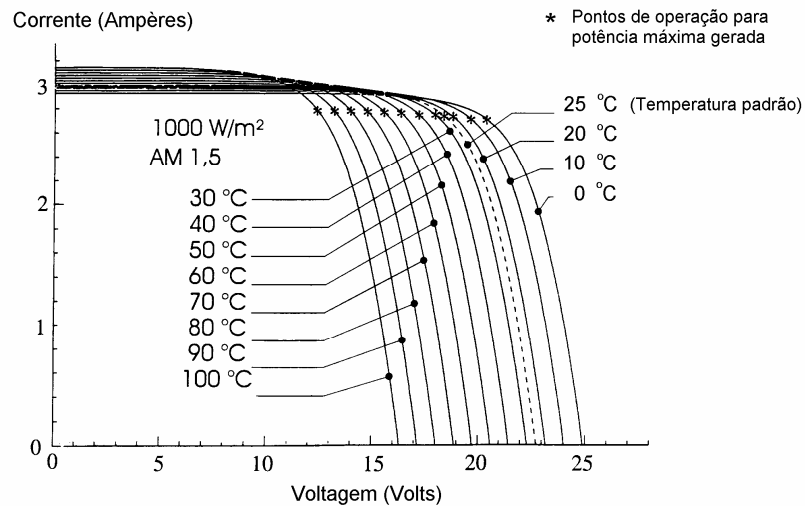


Figura 14: Efeito causado pela temperatura na célula na curva característica IxV (para 1000 W/m²) em um módulo fotovoltaico de silício cristalino
(Fonte: Manual de Engenharia Para Sistemas Fotovoltaicos)

4.2 Baterias

A função prioritária das baterias, também chamadas de acumuladores eletroquímicos, num sistema de geração fotovoltaico é acumular a energia que se produz durante as horas de luminosidade a fim de poder ser utilizada à noite ou durante períodos prolongados de mau tempo.

Outra função das baterias é a estabilização de corrente e tensão na hora de alimentar cargas elétricas, suprimindo transitórios que possam ocorrer na geração.

Ela também tem a função de prover uma intensidade de corrente superior àquela que o dispositivo fotovoltaico pode entregar. É o caso de um motor, que no momento do arranque pode exigir uma corrente de 4 a 6 vezes sua corrente nominal durante uns poucos segundos.

As baterias são classificadas em duas categorias: baterias primárias e baterias secundárias.

Baterias primárias são dispositivos eletroquímicos que, uma vez esgotados os reagentes que produzem a energia elétrica, são descartadas, pois não podem ser recarregadas. Já as baterias secundárias podem ser regeneradas, ou seja, através da aplicação de uma corrente elétrica em seus terminais pode-se reverter as reações responsáveis pela geração de energia elétrica e, assim, recarregar novamente a bateria. Os sistemas fotovoltaicos de geração de energia elétrica utilizam acumuladores secundários, isto é, baterias que podem ser recarregadas. Entre inúmeros tipos de baterias secundárias, as mais comuns são as de Chumbo-Ácido e as de Níquel-Cádmio.

4.2.1 Baterias de Chumbo-Ácido

As baterias de chumbo-ácido são assim denominadas porque a sua matéria ativa é o chumbo, e o eletrólito é uma solução aquosa de ácido sulfúrico. A bateria é composta por elementos ou células, que são constituídos por duas placas de polaridade oposta, isoladas entre si, banhadas pelo eletrólito. Os elementos são interligados convenientemente no interior da bateria de forma a definir sua tensão e capacidade nominal. Na Figura 15 pode-se ver a estrutura interna de uma bateria de chumbo-ácido selada.

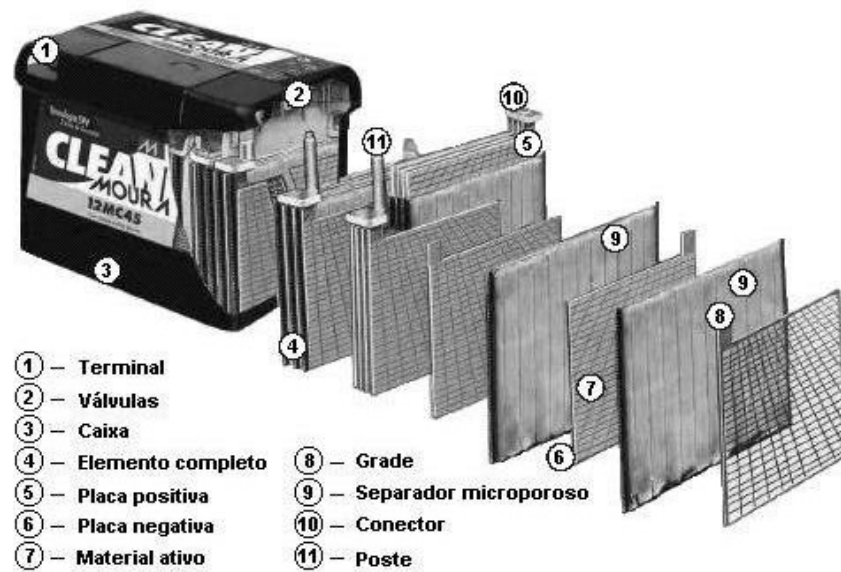


Figura 15: Estrutura de uma bateria de chumbo-ácido selada (Fonte: Catálogo Baterias Moura)

As baterias de chumbo-ácido aplicam-se amplamente nos sistemas de geração fotovoltaicos. Elas são as mais usadas devido a sua variedade de tamanhos, custo baixo e grande disponibilidade no mercado.

Um parâmetro importante na escolha de uma bateria de chumbo-ácido é sua profundidade de descarga. A profundidade de descarga define o percentual em relação a sua capacidade nominal que uma bateria pode fornecer sem que seja comprometida sua vida útil. Existem baterias de chumbo-ácido de baixa profundidade de descarga, empregadas principalmente em automóveis, e baterias de alta profundidade de descarga, que são as mais indicadas para aplicação nos sistemas fotovoltaicos de geração de energia elétrica.

O gráfico da Figura 16, obtido da folha de dados de uma bateria de ciclo profundo, mostra a relação entre a profundidade média diária de descarga e o número de ciclos que a bateria é capaz de realizar durante a sua vida útil. Descargas que ultrapassam a capacidade de descarga da bateria de chumbo-ácido diminuem o seu tempo de vida útil, e uma descarga muito profunda pode tornar o processo químico irreversível, finalizando o tempo de operação

da bateria. Para aumentar a durabilidade das baterias de chumbo-ácido é necessário carregá-las adequadamente, conforme recomendações dos fabricantes, antes que sua descarga atinja níveis superiores aos pré-estabelecidos para a sua profundidade de descarga.

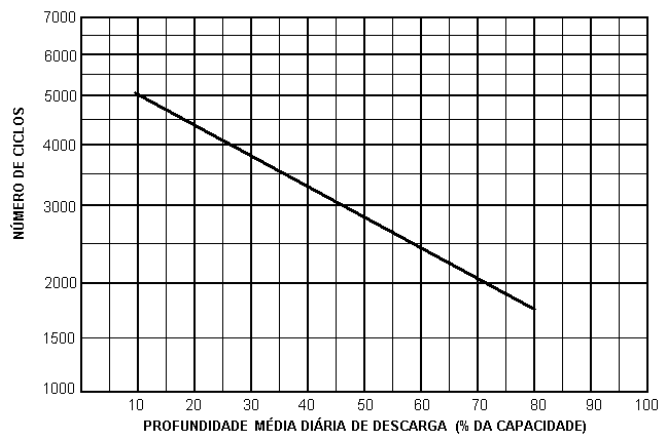


Figura 16: Gráfico da relação entre a profundidade média de descarga diária durante um ciclo e o número de ciclos.
(Fonte: Catálogo de baterias Moura)

Um outro problema relacionado com o processo de descarga da bateria, que contribui para a degradação da vida útil das baterias de chumbo-ácido é a sulfatação. A sulfatação é a formação de cristais de sulfato de chumbo nas placas dos elementos. Os cristais vão se acumulando sobre as placas, formando uma barreira entre o eletrólito e o material ativo das placas. Para minimizar a sulfatação deve-se evitar manter a bateria descarregada por longos períodos de tempo, os carregamentos parciais prolongados e a operação em temperaturas superiores a 45°C.

O processo de carga também pode danificar as baterias. Durante o processo de carga a tensão nos terminais da bateria sobe lentamente até atingir um determinado valor de tensão, quando cessa a acumulação de energia na bateria. A partir desse ponto, caso não se interrompa a corrente de carga, a bateria passa a consumir toda a energia entregue realizando

a eletrólise da água contida no eletrólito. Isso ocasiona perda excessiva de água, resultando no aumento da necessidade de manutenção para reposição do líquido na bateria.

4.2.2 Bateria de Níquel-Cádmio

Um outro tipo de bateria secundária também empregada nos sistemas de geração de energia elétrica fotovoltaicos são as baterias níquel-cádmio. Essas apresentam uma estrutura física semelhante à das baterias chumbo-ácido. Porém, ao invés de placas de chumbo, elas utilizam hidróxido de níquel para as placas positivas (Ni(OH)_2), óxido de cádmio (Cd(OH)_2) para as placas negativas e o eletrólito é o hidróxido de potássio.

As baterias de níquel-cádmio possuem inúmeras vantagens quando comparadas às baterias de ácido de chumbo o que as faz atrativas para utilizações em sistemas fotovoltaicos isolados. Algumas dessas vantagens são: o seu longo tempo de vida, pequena manutenção, sobrevivência a excessivas sobrecargas, excelente capacidade de retenção a baixas temperaturas e a não necessidade de ter uma tensão de regulação de carga. As desvantagens mais críticas das baterias de níquel-cádmio são o seu elevado custo e a sua limitada utilidade comparativamente com as baterias de chumbo-ácido.

4.2.3 Características ideais para uso em sistemas fotovoltaicos

As características requeridas para um desempenho satisfatório de baterias associadas a sistemas fotovoltaicos são:

- Elevada vida cíclica para descargas profundas;
- Necessidade de pouca ou nenhuma manutenção;
- Alta eficiência de carregamento;

- Diminuta taxa de auto-descarga;
- Boa confiabilidade;
- Mínima mudança no desempenho quando trabalhando fora da faixa de temperatura de operação recomendada.

4.3 Reguladores (Controladores) de Carga

Quando um equipamento é ligado à bateria a quantidade de energia elétrica armazenada nela vai diminuindo à medida que o tempo passa. Para evitar que a bateria se descarregue por completo nos períodos longos sem insolação e de grande consumo, ou seja, tenha uma descarga profunda, é conveniente instalar um controlador de carga. Este acessório monitora a carga da bateria e impede que a mesma se descarregue completamente, aumentando a sua vida útil. Já em períodos de grande insolação e pequeno consumo de energia, a bateria tende a se carregar em excesso, aumentando a sua tensão e reduzindo a sua vida útil. O controlador de carga evita este excesso desconectando o módulo.

Os reguladores de carga podem ser do tipo paralelo (*shunt*) ou série, dependendo da forma como desconectam os módulos fotovoltaicos das baterias quando estas atingem a posição de plena carga.

Os controladores tipo paralelo apresentam um circuito elétrico básico conforme mostrado na Figura 17. Quando as baterias estão muito carregadas o controlador curto-circuita a saída dos módulos fotovoltaicos, fazendo com que a tensão dos mesmos caia para um valor próximo de zero. Como a tensão das baterias fica maior que a dos módulos não há mais carregamento. São muito utilizados para sistemas com correntes baixas (até 10 A).

É necessária a colocação de um diodo em série para bloquear a corrente reversa da bateria para o curto-circuito. Tal diodo é também importante para evitar a corrente reversa da

bateria para os módulos durante a noite. Entretanto, como este diodo está em série, o mesmo provoca uma queda de tensão e uma perda de energia no sistema. Alguns tipos de controladores, quando projetados para baixas tensões (≤ 12 V), não usam diodos de bloqueio, pois a perda nos mesmos poderia ser maior que a eventual perda pela corrente reversa.

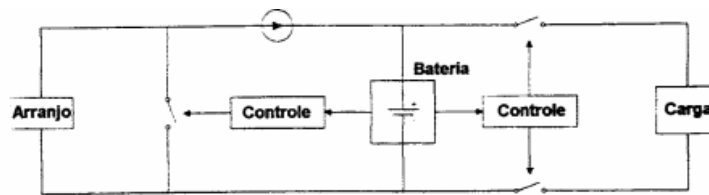


Figura 17: Circuito elétrico básico de controladores de carga tipo paralelo
(Fonte: Manual de Engenharia Para Sistemas Fotovoltaicos)

Os controladores tipo série são utilizados normalmente em sistemas com corrente mais elevada e se caracterizam por desconectar os módulos das baterias conforme mostrado na Figura 18.

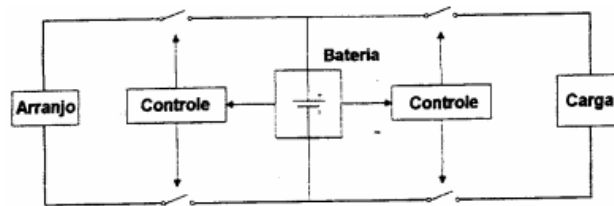


Figura 18: Circuito elétrico básico de controladores de carga tipo série
(Fonte: Manual de Engenharia Para Sistemas Fotovoltaicos)

4.3.1 Características ideais dos controladores de carga

Existem muitos tipos de controladores de carga no mercado com grandes variações de funções e preços. Cabe ao projetista definir aquele que melhor se adequar às características de seu sistema. A seguir estão algumas características desejáveis:

- Vida útil esperada de, pelo menos, 10 anos;
- Chaveamento eletrônico (sem componentes eletromecânicos);
- Proteção contra inversão de polaridade;
- Desconexão da carga para proteção das baterias contra descargas excessivas;
- Curto-circuitar o módulo em caso de não-uso da energia gerada;
- Compensar as variações de temperatura, etc.

4.4 Inversores

Os conversores CC/CA são, normalmente, denominados de inversores. Podem ser utilizados para alimentar uma carga isolada, mas também para interligar um gerador fotovoltaico à rede. O principal papel dos inversores num sistema de geração fotovoltaico é o de criar corrente CA a partir de corrente CC, visto que uma célula fotovoltaica gera corrente CC. Para gerar esta corrente CA existe um dispositivo no inversor que se chama comutador e cujo papel é o de “quebrar” a corrente contínua em pulsos. Estas deformações, que são provocados na onda devido às comutações dos interruptores do inversor, podem produzir perturbações mais ou menos importantes nas células fotovoltaicas (Distorções Harmônicas). Existem vários tipos de comutadores entre os quais os comutadores retificadores controlados de silício, transistores *darlington*, mosfet's (*metal oxide semiconducting field effect transistor*), IGBT's (*insulated gate bipolar transistor*), etc.

Os inversores podem ser divididos em três categorias:

- Onda quadrada: uso não recomendado;
- Onda senoidal modificada: aceitável para a maioria das aplicações;
- Onda senoidal pura: para aplicações especiais com distorção menor que 5%.

4.5 Outros Componentes

Outros elementos necessários ao bom funcionamento de sistemas fotovoltaicos são chaves, fusíveis e disjuntores, que protegem pessoas e equipamentos de surtos de corrente e/ou tensão.

As chaves possibilitam a interrupção do fluxo de corrente em casos emergenciais ou para fins de manutenção.

Os fusíveis e/ou disjuntores protegem equipamentos e condutores contra correntes altas provocadas por curto-circuito, consumo elevado ou falha no aterramento.

Chaves, fusíveis e disjuntores usados para proteção de sistemas fotovoltaicos devem ser apropriados para operação em corrente contínua. Dispositivos de corrente alternada, a princípio, funcionarão bem, mas, com o passar do tempo, começarão a apresentar problemas. Devem ser selecionados em função das máximas tensão e corrente admitidas no sistema.

4.6 Configurações de um sistema fotovoltaico

Os sistemas fotovoltaicos podem ser classificados em três configurações principais: isolados, híbridos e interligados à rede. O emprego de cada um dos sistemas depende diretamente da finalidade do uso final, da avaliação econômica, do nível de confiabilidade e de características específicas do projeto.

4.6.1 Sistemas Isolados

Também conhecidos como autônomos, isto é, independentes da rede elétrica convencional, estes sistemas podem ou não utilizar algum tipo de armazenamento de energia.

São puramente fotovoltaicos, ou seja, não apresentam fontes de energia complementares à conversão de energia promovida pelos módulos solares.

Indica-se o uso de sistemas fotovoltaicos isolados para instalações deliberadamente solares devido a condições climáticas extremamente favoráveis, ou de custo inferior relativamente à opção "ligação à rede" ou ainda de vontade expressa de proteger o ambiente através de um desenvolvimento sustentável.

Dentre os sistemas isolados há vários tipos de configurações possíveis. A seguir, apresentam-se algumas dessas possibilidades.

4.6.1.1 Carga CC sem Armazenamento

Neste caso a energia elétrica pelos painéis solares é utilizada simultaneamente no momento da geração por equipamentos que operam em corrente contínua. Um exemplo de sistema deste tipo pode ser visto na Figura 19.



Figura 19: Sistema isolado com carga CC sem armazenamento
(Fonte: Manual de Engenharia Para Sistemas Fotovoltaicos)

4.6.1.2 Carga CC com Armazenamento

É o caso em que se deseja utilizar equipamentos elétricos, em corrente contínua, independente de haver ou não geração fotovoltaica simultânea. Para que tal fato ocorra, a energia deverá ser, então, armazenada em baterias. O uso de controladores também se faz

necessário, visto que tal dispositivo promoverá a proteção da bateria contra danos causados por sobrecarga ou descarga profunda. A figura 20 mostra um esquema desse tipo.

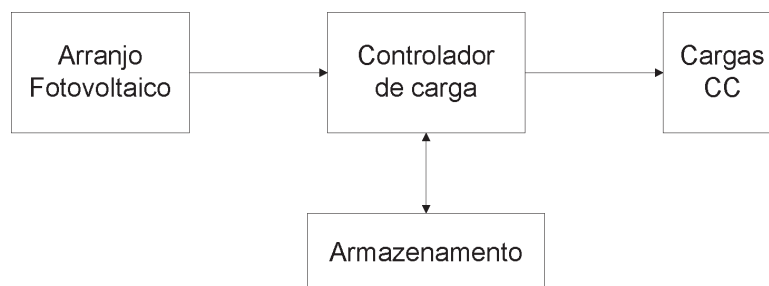


Figura 20: Sistema isolado com armazenamento e cargas CC.
(Fonte: Manual de Engenharia Para Sistemas Fotovoltaicos)

4.6.1.3 Carga CA sem Armazenamento

Da mesma maneira apresentada para cargas CC, pode-se usar cargas que operem em corrente alternada sem o uso de acumuladores, desde que seja introduzido um inversor entre o módulo fotovoltaico e o equipamento a ser usado (ver Figura 21).

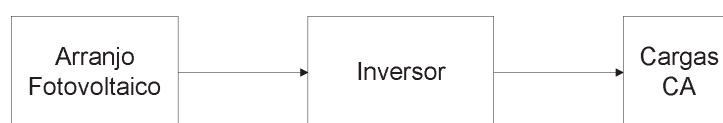


Figura 21: Sistema isolado sem armazenamento para alimentação de cargas CA.
(Fonte: Manual de Engenharia Para Sistemas Fotovoltaicos)

4.6.1.4 Carga CA com Armazenamento

Para alimentação de cargas que operem sob corrente alternada é preciso utilizar um inversor. Incorpora-se ao sistema, ainda, um dispositivo chamado “seguidor do ponto de

máxima potência”, que será responsável por aumentar a eficiência do sistema. Uma representação gráfica dessa configuração pode ser vista na Figura 22.

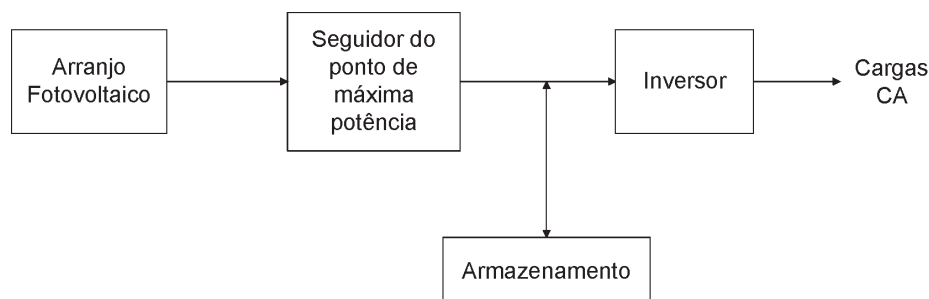


Figura 22: Sistema isolado com armazenamento e seguidor do ponto de máxima potência (Fonte: Manual de Engenharia Para Sistemas Fotovoltaicos)

4.6.2 Sistemas Híbridos

Consistem na combinação de outros sistemas fotovoltaicos com outras fontes de energia que assegurem a carga das baterias na ausência de sol. As fontes de energia auxiliares podem ser, geradores eólicos, diesel, gás, gasolina e outros combustíveis.

Em geral, os sistemas híbridos são empregados para sistemas de médio a grande porte, vindo a atender um número maior de usuários. Por trabalhar com cargas de corrente contínua, o sistema híbrido também apresenta um inversor. Devido a grande complexidade de arranjos e multiplicidade de opções, a forma de otimização do sistema torna-se um estudo particular para cada caso. Uma possibilidade de configuração para sistemas híbridos é mostrado na Figura 23. Na figura citada pode-se perceber a existência de bloco denominado “Unidade de controle e condicionamento de potência”; a função de tal bloco é integrar os vários geradores, de forma que a operação do sistema seja otimizada.

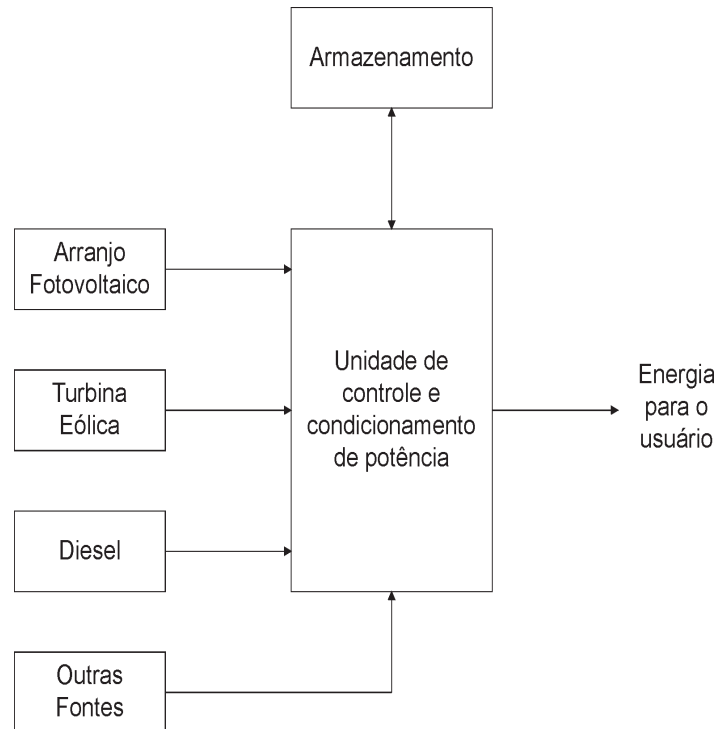


Figura 23: Exemplo de configuração de sistema híbrido.
(Fonte: Manual de Engenharia Para Sistemas Fotovoltaicos)

:

4.6.3 Sistemas Interligados à Rede

Representam uma fonte complementar ao sistema elétrico de grande porte ao qual estão conectados. Normalmente não utilizam armazenamento de energia, pois toda a gerada é entregue diretamente à rede. Para a injeção de energia na rede são utilizados inversores especiais que devem satisfazer a severas exigências de qualidade e de segurança.

A potência fotovoltaica instalada neste tipo de sistema é muito variável, podendo atingir centenas de kWp em centrais fotovoltaicas e dezenas de kWp para alimentação de cargas residenciais. A Figura 24 mostra o esquema de um sistema fotovoltaico integrado à rede.

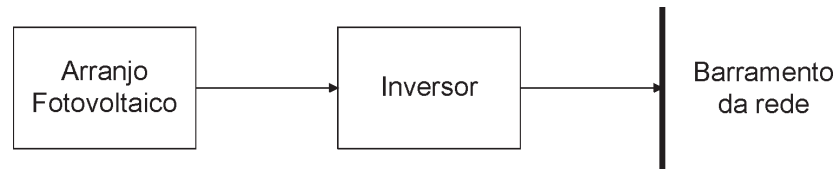


Figura 24: Sistema integrado à rede.
(Fonte: Manual de Engenharia Para Sistemas Fotovoltaicos)

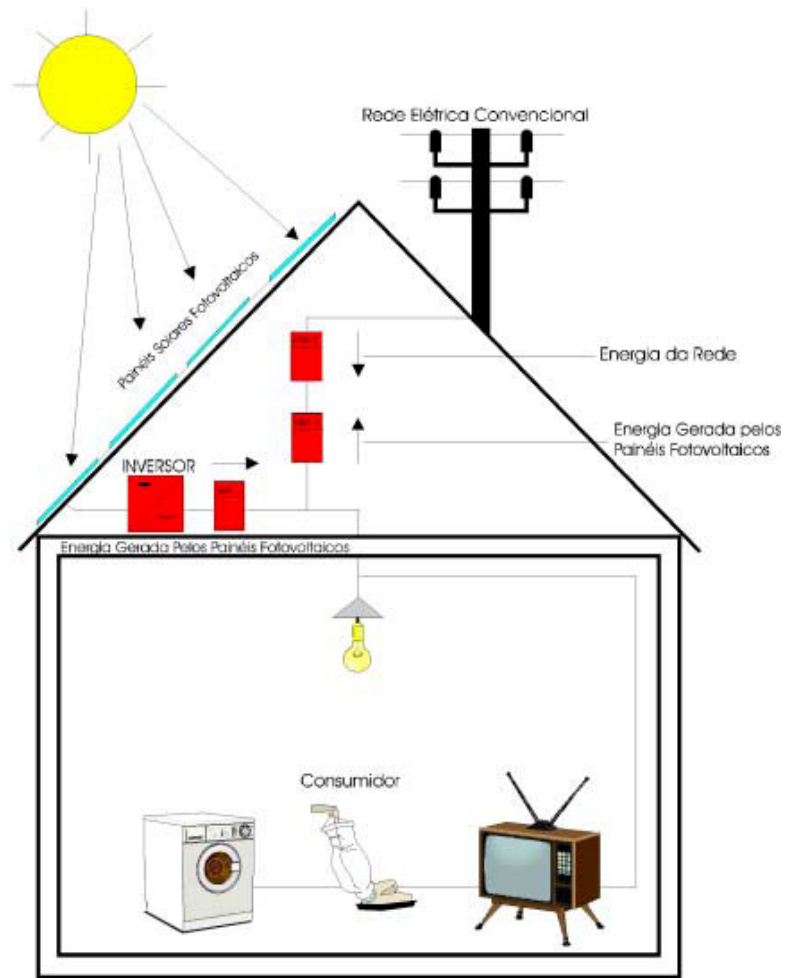


Figura 25: Sistema fotovoltaico conectado à rede (Fonte: Rüter)

Já a Figura 25 representa um sistema fotovoltaico residencial conectado à rede elétrica de distribuição, onde normalmente a energia é injetada na rede de baixa tensão e o medidor do usuário é bidirecional, efetuando um balanço entre a energia gerada e a consumida.

4.7 Campos de Utilização

A natureza modular dos sistemas fotovoltaicos permite que equipamentos de extensa gama de potência sejam construídos tendo por base essa tecnologia. Os módulos, ao se agregarem, poderão suprir desde os miliwatts de uma pequena calculadora científica até os kilowatts dos grandes sistemas de suprimento de energia de localidades remotas.

Embora a energia solar fotovoltaica seja, ainda, considerada como um método caro de produção de energia elétrica, há situações que serão detalhadas adiante, nas quais ela se constitui no método mais indicado. Paralelamente a isso existe forte tendência que leva a sociedade civil e empresas do mundo inteiro a adotarem uma postura e política ambiental mais responsáveis e sustentáveis. Nota-se, ainda, que o aumento da escala de produção tem contribuído para a diminuição dos custos de fabricação e, conseqüentemente, do preço de mercado das células solares.

A energia solar fotovoltaica pode ser aplicada de diversas maneiras, porém as principais formas de utilização são:

4.7.1 Bombeamento de água

O bombeamento de água por sistemas fotovoltaicos é, talvez, a mais nobre das aplicações da energia solar fotovoltaica.

O bombeamento de água acionado por sistemas fotovoltaicos constitui-se como forma eficaz e confiável de abastecimento de regiões longínquas e desassistidas de energia elétrica.

Comparando-se o custo de bombas d'água utilizando geração fotovoltaica com sistemas a diesel, as "bombas solares" são, geralmente, consideradas mais baratas, para

vazões menores que 50 m³ por dia e alturas manométricas menores do que 20 metros (muito embora isto varie com as condições locais, níveis de insolação diário e custo do combustível).

Para poços que possuem alto teor de sal, além do recomendado para uso humano, facilmente encontrados no Nordeste brasileiro, pode-se combinar ao conjunto de bombeamento solar fotovoltaico o uso de sistemas de dessalinização também operados por energia solar.

A Tabela 2 fornece características de funcionamento de diversos sistemas de bombeamento d'água.

Tabela 2: Características de sistemas de bombeamento d'água com bombas CC

Modelo do Sistema	Altura Manométrica Máxima [m]	Vazão Média [l/dia]	Pot. Nom. do Arranjo [Wp]	Tipo de Bomba	Nº Médio de Pessoas Beneficiadas
B75W8000	31	1500	75	Superfície	8,3
B75W2088	7	3300	75	Superfície	18,3
B80W8000	35	1530	80	Superfície	8,5
B80W2008	14	2800	80	Superfície	15,5
B94W9300	19	2080	94	Submersível	11,5
B150W9300	67	1610	150	Submersível	8,9

Fonte: <http://www.solenerg.com.br/bombeamento.htm>, em 12/11/2008.



Figura 26: Sistema fotovoltaico em Sumba, Indonésia, capaz de fornecer água potável para 4000 pessoas.

(Fonte: Handbook of Photovoltaic Science and Engineering)

Os sistemas de bombeamento solar podem ser instalados de dois modos: direto e indireto.

- **Modo Direto:** O painel fornece energia diretamente à bomba, permitindo o seu funcionamento ininterrupto enquanto houver luz solar incidindo no arranjo fotovoltaico. Para esse tipo de sistema o investimento para implantação e instalação é menor, visto que o painel fotovoltaico liga-se diretamente à bomba, prescindindo a incorporação de baterias e controladores de carga. Entretanto, a capacidade de bombeamento estará sujeita à variação das condições climáticas.
- **Modo Indireto:** Neste caso já há a adição de controladores e baterias ao sistema, o que possibilita que a energia produzida pelo arranjo fotovoltaico seja armazenada para uso futuro.

4.7.1.1 Dimensionamento de bombas solares:

O sistema é dimensionado de acordo com a quantidade de água prevista para uso, as alturas manométricas envolvidas, as características da insolação local e outras circunstâncias do projeto. As necessidades de água devem ser levantadas, com base no consumo previsto de acordo com o sistema de distribuição adotado e com as potencialidades de usos diversos (residencial, irrigação, animais etc.), levando-se em conta que, quanto maior for a quantidade diária bombeada, maior será o número de módulos fotovoltaicos utilizados e, portanto, o investimento inicial.

O primeiro cálculo a ser feito é o da energia hidráulica requerida pela bomba, cuja fórmula encontra-se na Equação (1).

$$E_{hidráulica} = Vol_{água} * H_m * \rho * g \quad \text{Equação (1)}$$

Onde:

$E_{hidráulica}$ = Energia hidráulica

$Vol_{água}$ = Volume de água requerido

H_m = Altura manométrica

ρ = Densidade da água

g = Aceleração da gravidade

De posse do valor encontrado em (1) parte-se para o próximo passo, substituindo-se (1) em (2), afim de se chegar ao valor da potência requisitada pelo arranjo solar.

$$P = \frac{E_{hidráulica}}{M_{insolação} * F} \quad \text{Equação (2)}$$

Onde:

P = potência do arranjo solar fotovoltaico

M_{insolação} = Menor média mensal de insolação do ano (ver Anexo II)

F = Fator de correção do sistema (tipicamente 84%)

4.7.2 Eletrificação Rural

Uma aplicação particularmente importante é a iluminação de casas em áreas rurais e/ou remotas, seja por seu aspecto ecológico ou pelo social. As habitações de tais localidades remotas são tipicamente iluminadas por velas ou lampiões a querosene. Os últimos, a despeito de iluminarem de forma mais eficaz que as velas, produzem ruído desagradável, emitem grande calor, o que praticamente inviabiliza a permanência humana junto a elas, especialmente nos lugares de clima tropical, e demandam altas quantidades de combustível.

A extensão de rede elétrica convencional é uma solução viável somente para as propriedades que se encontram próximas de alguma linha rural já existente. Em muitos destes casos bastará à concessionária de energia fazer a instalação do medidor elétrico ou esporadicamente de um transformador. Um universo muito grande de propriedades continuará sem energia, pois será impraticável a utilização da extensão de rede como alternativa para eletrificação rural.

Por todos esses motivos, para as propriedades mais afastadas a única alternativa será a utilização de fontes renováveis de energia, que podem ser obtidas pontualmente e de forma descentralizada. Dentre as alternativas comerciais existentes a energia solar fotovoltaica reúne todas as características necessárias para ser utilizada em larga escala, das quais pode-se destacar as seguintes vantagens:

- Utiliza-se sistema padrão que pode ser replicado com facilidade;
- Pulverização das propriedades facilita a introdução de unidades independentes de geração solar – cada usuário é um autoprodutor de sua energia básica;
- Facilidade de instalação e transporte para regiões remotas;
- Disponibilidade de energia mesmo com tempo nublado;
- Solução economicamente sustentável para propriedades distantes a mais de 2 km da rede elétrica.

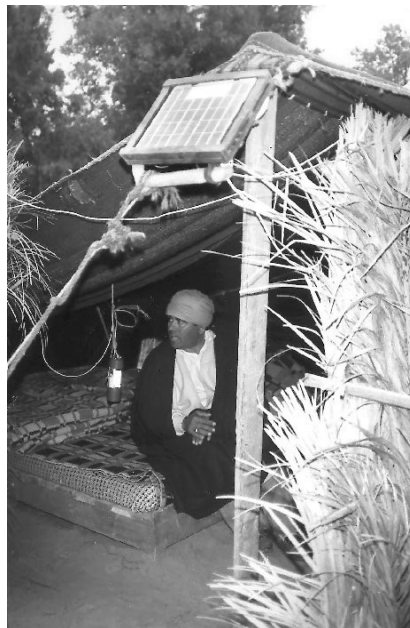


Figura 27: Eletrificação rural na Tunísia
(Fonte: Handbook of Photovoltaic Science and Engineering)

O principal obstáculo à implantação de sistemas fotovoltaicos em regiões remotas é o custo extremamente elevado, na casa de 5 a 8 dólares por Wp, aproximadamente. De acordo com a ONG inglesa *Practical Action*, para produzir 30W de iluminação durante 6 horas seriam requeridos, tipicamente, num país tropical como o Brasil, 2 painéis solares com 40W de potência nominal, cujo custo estimado é de 625 dólares. Para áreas acometidas por grandes períodos de céu nublado possivelmente necessitarão de painéis solares com até o dobro da potência.

Um lampião de pressão a querosene, que é muito menos eficiente, custaria de 24 a 50 dólares, mas consumiria cerca de 5 litros de querosene por semana, o que levaria a gastar de 118 a 235 dólares ao ano só em combustível. Ademais, o preço dos painéis solares vêm decrescendo à medida em que a produção aumenta, enquanto o preço do querosene continua a crescer. Ainda assim, para driblar os problemas associados ao alto investimento inicial dos sistemas de energia renovável, esquemas de financiamento têm sido montados nos países em desenvolvimento. No Brasil, o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), por exemplo, financia projetos de fontes alternativas de energia com taxas que variam de 1,8 a 2,8% ao ano, dependendo do risco do investimento.

4.7.3 Refrigeração de Vacinas

Para que os programas de erradicação de doenças que estão em marcha nos países em desenvolvimento tenham êxito é imprescindível que as vacinas sejam armazenadas corretamente, especialmente em regiões remotas.

As geladeiras supridas por energia solar fotovoltaicas possuem maiores níveis de confiabilidade e maior vida útil que aquelas acionadas por geradores a diesel, que são habitualmente utilizadas em áreas remotas.

Todos os tipos de vacinas têm que ser transportados e armazenados sob determinada temperatura, sob pena de se deteriorarem. Entretanto, geladeiras acionadas por geradores a diesel sofrem frequentemente com problemas relacionados à disponibilidade de combustível. A energia solar é, portanto, de grande importância nesses casos.

Comparados às geladeiras a querosene, as geladeiras abastecidas por energia solar fotovoltaica apresentam as seguintes vantagens:

- Eliminação dos problemas de abastecimento de combustível;
- Eliminação dos problemas gerados pela qualidade do combustível;
- Maior confiabilidade;
- Melhor desempenho na refrigeração (e controle de temperatura);
- Eliminação de gastos com querosene;
- Redução das perdas de vacina;
- Menores custos de manutenção do refrigerador.

4.7.3.1 Custos comparativos:

Um refrigerador fotovoltaico custa de 1300 a 2600 dólares (com o sistema completo o custo oscila entre 3000 e 5000 dólares), e o custo da instalação será superior à instalação da geladeira a querosene. Esta, por sua vez, pode custar de 650 a 1300 dólares, mas necessitará de 0,5 a 1,4 litros de combustível por dia, requerendo manutenção constante e tendo um curto ciclo de vida. Guardadas as proporções e considerando-se cada ciclo de vida, pode-se afirmar que os custos serão os mesmos para os dois modelos de refrigerador, mas o modelo alimentado por tecnologia solar fotovoltaica leva vantagem devido à maior confiabilidade e ao pequeno desperdício de vacinas.

4.7.3.2 A Tecnologia

Refrigeradores fotovoltaicos funcionam sob o mesmo princípio que os convencionais, mas à baixas tensões (12 ou 24 Vcc). Para a montagem do sistema são necessários um banco de baterias para armazenar a eletricidade, um regulador de carga e um controlador. O leiaute do sistema é mostrado na Figura 28.

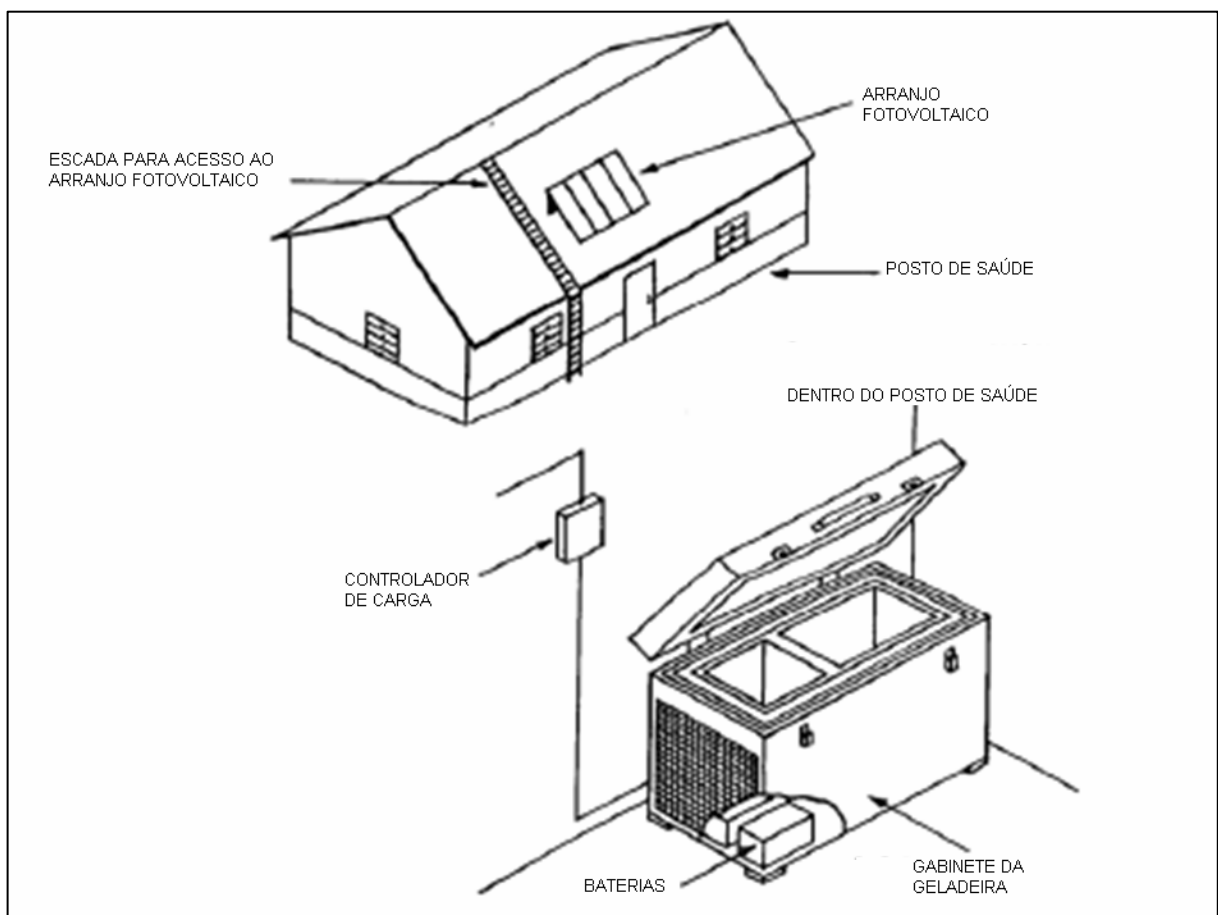


Figura 28: Leiaute típico de um sistema fotovoltaico para abastecimento de geladeira solar, (Fonte: Practical Action)

Algumas geladeiras possuem um compartimento para produção de gelo. As capacidades variam: podem estocar entre 10 a 85 litros de vacina, enquanto a produção de gelo pode chegar a taxas equivalentes a 6,4kg/dia.

O dimensionamento é feito de acordo com as necessidades de potência de cada caso específico, dados os níveis de radiação solar da localidade proposta. Tipicamente são adotados valores entre 150 e 200 Wp para os painéis.

4.7.3.3 Performance

O consumo de energia gera, normalmente, entre 400 e 800Wh por dia, para uma geladeira que não produz gelo e à temperatura ambiente de 32°C. Para 43°C e produção de 2 kg de gelo por dia, o consumo de energia poderá variar entre 900 e 1900 Wh/dia.

Deve-se ressaltar, ainda, que uma boa geladeira de vacinas deve ser capaz de manter a correta temperatura interna por, no mínimo, dez horas, em caso de desconexão da bateria e do módulo solar.

Os custos típicos para implantação do sistema variam de 3500 a 7500 dólares, excluídos transporte e instalação.

4.7.4 Estação remota para monitoramento

Equipamentos para instrumentação remota e comunicação de dados necessitam de uma fonte de energia confiável, de forma a impedir a interrupção ou perda de dados. Sistemas fotovoltaicos são adequados para este tipo de aplicação porque a energia necessária é baixa e os locais onde são instalados geralmente encontram-se afastados da fonte de energia convencional. Devido à confiabilidade e simplicidade dos sistemas fotovoltaicos, estes estão

substituindo também alguns equipamentos alimentados por fontes CA em áreas atendidas pela rede elétrica.

Exemplos de aplicações:

- Monitoramento de condições climáticas;
- Controle do tráfego nas estradas;
- Registros sísmicos;
- Investigações científicas.

4.7.5 Proteção catódica de estruturas metálicas enterradas, tais como: torres de transmissão, oleodutos e gasodutos.

Sistemas Fotovoltaicos podem ser usados para proteção catódica de forma a impedir corrosão nas estruturas de metal enterradas. A corrosão dos metais ocorre devido a um processo de oxidação que desencadeia uma reação química e faz que os elétrons fluam do metal para o eletrólito.

Nas situações práticas, o eletrólito é a água existente no solo, que possui impurezas e geralmente é ácida ou salgada. Pelo fato da densidade do eletrólito variar sazonalmente e, em alguns casos, até mesmo diariamente, os projetos de sistemas para proteção catódica tornam-se bastante complexos.

O conceito básico da proteção catódica é que, se a perda de elétrons de um metal que está enterrado puder ser impedida, não haverá corrosão.

A fonte de energia fotovoltaica irá aplicar, entre o metal a ser protegido e o eletrólito, uma tensão ligeiramente maior do que o potencial de oxidação.

4.7.6 Suprimento de energia para estações remotas de telecomunicações e telemetria

Sistemas fotovoltaicos estão há muitos anos sendo usados para fornecer energia para a área de telecomunicações devido à sua simplicidade e reduzida manutenção. A confiabilidade das fontes de energia para a maioria das aplicações nesta área é bastante crítica e a disponibilidade deve ser muito alta. Geralmente estes sistemas necessitam de baixa potência e são instalados em áreas remotas com acesso limitado e, normalmente, com severas condições climáticas (vento, maresia, etc.).

5 DIMENSIONAMENTO

O dimensionamento de um sistema fotovoltaico complexo requer conhecimentos técnicos específicos, necessitando, assim, de pessoas qualificadas. Porém, o dimensionamento de pequenos e simples sistemas de energia solar pode ser facilmente realizado por qualquer pessoa.

Para isso é necessário primeiramente o conhecimento básico de alguns valores e grandezas, tal como:

- a) Tensão nominal do sistema: Refere-se à tensão típica em que operam as cargas que serão conectadas. Deve-se, ainda, distinguir se a referida tensão é contínua ou alternada;
- b) Potência exigida pela carga;
- c) Horas de utilização das cargas (perfil de carga): Juntamente com a potência requerida pela carga deverá ser especificado o tempo diário de utilização da referida potência. Multiplicando potência por horas de utilização serão obtidos os watts-hora requeridos pela carga ao final de um dia. ;
- d) Localização geográfica do sistema (latitude, longitude, e altura da instalação em relação ao nível do mar): Tais dados são necessários para determinar o ângulo de inclinação adequado para o módulo fotovoltaico e o nível de radiação (médio mensal) da localidade em questão;

- e) Autonomia prevista: Refere-se ao número de dias previstos nos quais haverá diminuição ou ausência de geração de energia; esses dados deverão ser considerados no dimensionamento das baterias. Para sistemas rurais domésticos adota-se valor entre 3 e 5 dias, e para sistemas de comunicações remotos, de 7 a 10 dias de autonomia.

No Anexo I encontram-se representados dados de potência, média de utilização e consumo médio mensal dos aparelhos elétricos mais utilizados.

5.1 Escolha dos Painéis

A escolha do painel solar é determinada a partir de sua capacidade de geração em Ah. Deve-se seguir, então, as orientações descritas abaixo, para que a capacidade de geração do arranjo seja calculada de maneira satisfatória.

- i. Calcular o valor da potência exigida por cada equipamento, em W;
- ii. Multiplicar a potência de cada aparelho e/ou dispositivo pela Utilização Média Diária (ver Anexo I) para obter o valor da potência em Wh/dia (ver Anexo I);
- iii. Calcular o valor total da potência, em watts-hora/dia, somando os valores obtidos em (ii);
- iv. Dividir o valor da potência total de (iii) pela tensão do sistema para obter, então, a corrente necessária ao módulo, em Ah/dia.
- v. Dividir a corrente obtida em (iv), em Ah/dia, pela menor média mensal de insolação diária (ver Anexo II) para chegar, finalmente, ao valor de corrente necessária ao módulo, em Ah;

- vi. Com o valor em Ah de (v) escolhe-se o painel que iguala ou supera este valor no catálogo de preferência.

5.2 Dimensionamento das Baterias

Recomenda-se optar por baterias de descarga profunda, pois possuem melhor rendimento e podem trabalhar com até 90% de sua capacidade, fora o fato de sua vida útil ser maior que a das baterias convencionais normalmente utilizadas em automóveis. Aplica-se o valor de corrente diário de consumo de corrente multiplicado por 3.

6 CONCLUSÃO

A disseminação de fontes alternativas de energia, em especial a energia solar fotovoltaica se faz absolutamente necessária, na medida em que tal tipo de geração de energia atua como vetor de preservação do equilíbrio ambiental e disseminador de inclusão social.

Apesar de ser sensivelmente mais cara que as demais fontes de energia, seja as tradicionais ou até mesmo as alternativas, a energia solar fotovoltaica se caracteriza por ter elevado grau de confiabilidade e pela alta flexibilidade, que deriva a capacidade de chegar a localidades remotas às quais a rede convencional não teria acesso.

Portanto, é de extrema importância que haja maciços investimentos e apoio intensivo à inovação e à pesquisa tecnológica, que levem ao aumento de eficiência das células, à economias de escala e conseqüente diminuição de custos. É importante, ainda, que a população saiba dos benefícios e vantagens em se optar por esse tipo de tecnologia, através de campanha promocional e explicativa, pois o que é desconhecido normalmente sofre rejeição, gerando baixa demanda.

Nota-se, pelos tipos de aplicações estudados, principalmente as de cunho social, como a geladeira para vacinas e o bombeamento de água, que o setor de geração de energia solar fotovoltaica é altamente estratégico para os países em desenvolvimento, dado que podem ajudar a mitigar doenças, desacelerar o fluxo migratório, dentre outros benefícios.

Finalmente, o incentivo governamental através de mecanismos de subsídios e diminuição de impostos se faz importante, visto que o aumento da participação das energias

renováveis na matriz energética brasileira produziria aumento de externalidades positivas para toda a sociedade.

7 BIBLIOGRAFIA

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL; *Atlas de energia elétrica do Brasil*; ANEEL; Brasília; 2002.

CATÁLOGO DE BATERIAS MOURA, FAMÍLIAS MC E MF. Disponível em: www.moura.com.br., acessado em: 19/09/2008.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA A ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO – CRESESB; *Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos*; Rio de Janeiro: Centro de Pesquisas em Energia Elétrica – CEPEL; novembro de 1999.

CRESESB, *Tutorial Solar*. Disponível em <http://www.cresesb.cepel.br/tutorial/solar/images/Image89.gif>. Acesso em 12/11/2008.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE; *Balanço Energético Nacional (BEN)*; 2007.

FERNANDES, B. C., *Centros Sociais Solares*. Disponível em http://www.vivercidades.org.br/publique222/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?inford=1208&sid=22&usg=__f0oZ4MZgt-uMarChQkLkQpocU0M=. Acesso em 12/11/2008.

GRUPO FAE/UFPE; *Atlas Solarimétrico do Brasil*; Recife, PE, 2000.

HELIODINÂMICA. Disponível em <http://www.heliodinamica.com.br/>. Acesso em 12/11/2008.

LUQUE, A., HEGEDUS, S.; *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*; Wiley, 2002.

MME, *Plano de Revitalização e Capacitação PRC-PRODEEM V.21*. Brasília, DF, 2004.

PRACTICAL ACTION. Disponível em <http://www.practcalaction.org>. Acesso em 12/11/2008.

SCHEER, H., *Economia Global Solar. Estratégias Para a Modernidade Ecológica*. Rio de Janeiro: CRESESB-CEPEL, 2002.

SEMICONDUTOR THEORY. Disponível em <http://novaeletronica.net/curso/cap17.htm>.
[Acesso em 12/11/2008.](#)

SHOPTIME. Disponível em <http://www.shoptime.com.br/>. Acesso em 09/08/2008.

SISTEMAS DE BOMBEAMENTO SOLAR. Disponível em <http://www.solenerg.com.br/bombeamento.htm>. Acesso em 12/11/2008.

TOLMASQUIM, M. T., *Fontes Renováveis de Energia no Brasil*. Rio de Janeiro: CENERGIA, 2003.

ANEXO I – Dados de potência, utilização média diária e consumo dos principais equipamentos elétricos (Fonte: site do Shoptime)

Aparelhos Elétricos	Potência Média (P) [W]	Dias Estimados Uso/Mês	Utilização Média/Dia (UMD)	Consumo Médio Mensal [kWh]
Aparelho de som 3x1	80	20	3h	4,8
Aparelho de som pequeno	20	30	4h	2,4
Ar cond. 7.500 BTU/h	1000	30	8h	240,0
Ar cond. 10.000 BTU/h	1350	30	8h	324,0
Ar cond. 12.000 BTU/h	1450	30	8h	348,0
Ar cond. 15.000 BTU/h	2000	30	8h	480,0
Ar cond. 18.000 BTU/h	2100	30	8h	504,0
Aspirador de pó	10	30	30 min	0,15
Batedeira	120	8	30 min	0,48
Cafeteira elétrica	600	30	1h	18,0
Computador	120	30	3h	10,8
Exaustor	170	30	4h	20,4
Forno elétrico	1500	30	1h	45,0
Forno de microondas	1200	30	20 min	12,0
<i>Freezer</i>	200	-	-	80,0
Geladeira simples	200	-	-	45,0
Geladeira duplex	300	-	-	45,0
Lavadora de louças	1500	30	40 min	30,0
Lavadora de roupas	500	12	1h	60,0
Liquidificador	300	15	15 min	1,1
Secador de cabelos pequeno	600	30	10 min	4,5
Secador de cabelos grande	1400	30	10 min	7,5
Secador de roupas pequeno	600	8	1h	8,0
Secador de roupas grande	1400	12	1h	42,0
TV 14"	60	30	5h	9,0
TV 21"	90	30	5h	13,5
TV 29"	110	30	5h	16,5
Ventilador de teto	120	30	8h	28,8
Ventilador pequeno	65	30	8h	15,6
Vídeo cassete	10	8	2h	0,16
Vídeo game	15	15	4h	0,9

ANEXO II – Média mensal de insolação diária das capitais brasileiras, segundo o Atlas Solarimétrico do Brasil, elaborado pelo Grupo FAE/UFPE

Cidade	Média Mensal de Insolação Diária [h]											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Aracaju	9,0	7,9	7,8	7,5	6,7	6,9	6,8	7,6	7,9	8,7	9,5	9,1
Belém	4,4	3,5	3,3	4,1	6,0	7,5	8,2	8,3	7,6	7,4	6,8	5,8
Belo Horizonte	6,1	6,9	6,9	7,6	7,6	8,0	8,3	8,2	7,0	6,1	6,1	5,3
Boa Vista	6,6	6,2	6,9	5,8	5,4	5,2	4,9	4,8	7,8	7,7	8,1	6,5
Brasília	5,1	5,6	5,8	6,7	7,6	8,4	8,6	8,5	6,8	5,4	4,8	4,5
Campo Grande	6,6	6,4	6,8	7,3	7,1	7,2	7,7	7,2	5,7	7,1	7,3	6,5
Cuiabá	5,4	5,6	6,0	7,1	6,7	7,3	8,0	7,4	6,0	7,0	6,5	5,9
Curitiba	5,2	4,8	4,6	4,6	4,9	4,3	4,8	4,8	4,1	4,4	5,1	4,9
Florianópolis	6,4	6,5	6,0	6,0	6,0	5,4	5,5	4,9	4,3	5,1	5,8	6,1
Fortaleza	7,2	6,8	5,0	5,3	6,9	7,9	8,5	9,7	9,5	9,3	9,6	9,0
Goiânia	5,7	5,5	6,6	7,7	8,2	9,0	9,1	8,7	7,2	6,0	5,8	5,5
João Pessoa	8,5	8,6	7,9	7,3	6,6	6,5	6,0	7,9	8,5	9,1	9,6	9,1
Macapá	4,8	3,9	3,5	3,8	4,9	6,3	7,3	8,8	9,1	9,1	8,4	6,6
Maceió	8,2	8,8	6,5	6,0	6,2	6,0	5,7	6,6	6,8	8,1	9,2	8,5
Manaus	3,7	3,1	3,2	3,7	4,8	6,2	6,9	7,3	5,2	5,5	4,7	4,2
Natal	8,8	8,2	7,5	6,8	6,8	6,5	7,0	7,9	8,7	9,6	9,7	9,5
Porto Alegre	7,7	7,4	6,5	6,0	5,4	4,5	4,8	4,9	5,0	6,5	7,2	7,9
Porto Velho	3,5	3,2	3,7	4,2	4,1	6,6	7,1	5,1	5,0	4,8	6,5	4,0
Recife	8,3	7,8	6,9	6,5	6,3	5,7	5,3	7,1	7,5	8,3	9,3	8,5
Rio Branco	3,1	3,0	3,8	4,1	4,7	4,8	6,6	5,5	4,8	4,7	4,3	3,7
Rio de Janeiro	6,3	7,3	6,3	5,5	5,5	5,2	5,9	5,8	4,6	5,1	5,6	5,2
Salvador	7,7	7,9	7,8	6,2	5,3	6,0	5,9	6,5	7,2	7,1	7,6	7,6
São Luís	4,5	3,9	3,2	3,4	5,0	7,0	7,4	8,3	8,1	8,1	8,2	6,5
São Paulo	4,8	5,1	4,7	4,7	4,9	4,8	5,3	5,0	4,2	4,4	4,8	4,2
Teresina	5,4	5,3	5,4	5,9	7,5	8,8	9,6	9,3	8,3	8,1	7,8	6,5
Vitória	7,4	8,1	7,0	6,5	6,5	6,5	6,2	6,7	5,4	5,2	5,1	5,6

