

Cássio Araújo do Nascimento

# **PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DA CÉLULA FOTOVOLTAICA**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia da Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do curso de Pós-Graduação *Lato-Sensu* em Fontes alternativas de energia, para a obtenção do título de especialização.

Orientador

Prof. Es. Carlos Alberto Alvarenga

LAVRAS  
MINAS GERAIS - BRASIL  
2004

Cássio Araújo do Nascimento

# PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DA CÉLULA FOTVOLTAICA

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia da Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do curso de Pós-Graduação *Lato-Sensu* em Fontes alternativas de energia, para a obtenção do título de especialização.

APROVADA em \_\_ de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_.

Prof. \_\_\_\_\_

Prof. \_\_\_\_\_

Prof.Es. Carlos Alberto Alvarenga  
UFLA  
(Orientador)

LAVRAS  
MINAS GERAIS - BRASIL

## SUMÁRIO

Lista de figuras.....	06
Resumo.....	07
1 - Introdução.....	08
2 - CélulasFotovoltaicas.....	11
2.1 - História da Célula Fotovoltaica.....	11
2.2 - Efeito Fotovoltaico .....	14
2.3 - Estrutura de uma Célula Fotovoltaica .....	17
2.4 - Células de Silício Monocristalino .....	18
2.5 - Células de Silício Policristalino.....	18
2.6 - Células de Silício Amorfo.....	19
2.7 - Células de Filmes Finos.....	19
3 - Considerações Finais.....	21
Referências Bibliográficas.....	23

## **LISTA DE FIGURAS**

Figura 2.1 - Ilustração básica de uma célula de silício.....	12
Figura 2.2 - Ilustração de uma célula.....	13
Figura 2.3 - Ilustração da estrutura de uma célula.....	14
Figura 2.4 - Fotografia de uma célula de silício monocristalino.....	15
Figura 2.5 - Fotografia de célula de silício policristalino.....	15
Figura 2.6 - Fotografia de uma célula de silício amorfo.....	16

## **RESUMO**

Sem produzir ruído ou qualquer tipo de poluição, utilizando energia limpa, e inesgotável do Sol, as células fotovoltaicas vem constituindo painéis fotovoltaicos interligados à rede elétrica pública a fim de contribuir com a economia na geração de energia de formas convencionais, bem como diminuir os impactos ambientais com novas construções.

Este trabalho apresenta basicamente algumas das melhores células já consolidadas no mercado e suas potencialidades, abordando o princípio básico de funcionamento de cada uma, levando em consideração sua eficiência.

# 1 - INTRODUÇÃO

A exploração intensa das reservas esgotáveis de combustíveis fósseis e os danos causados ao meio ambiente apresentam um cenário preocupante para o próximo século. Nesse contexto assume crucial importância a busca de fontes alternativas de energias renováveis e não poluentes, como a solar e a eólica.

Vários países investem nas aplicações da energia solar, analisando desde as características do fluxo de radiação solar que chega a terra até a tecnologia necessária para viabilizar, em termos técnicos e econômicos, o máximo aproveitamento dessa energia.

O Brasil também busca soluções para o futuro, elaborando estudos para avaliar a eficácia de pequenos módulos solares, em regiões remotas e o mapeamento do potencial energético solar existente no país, para estabelecer uma política nacional ao setor.

Para a complementação da energia hidrelétrica é necessária uma fonte energética com várias características particulares: limpa (não poluente), não escassa, distributiva e que possa ser usada em residências, indústrias e em estabelecimentos comerciais. Uma das que possui todas essas características é a energia elétrica fotovoltaica.

Aspectos técnicos e econômicos muitas vezes inviabilizam suas utilizações para a geração de energia elétrica, mas não para a sua utilização de outra forma. As faltas de informação por parte dos consumidores e de uma política de incentivo adequada são os maiores obstáculos para a utilização dessa fonte de energia. Além disso, esses fatores contribuem fortemente para criar a concepção generalizada de

inviabilidade econômica de todos os usos de energias não convencionais. Segundo a diretoria de operações da Eletrobrás, na hora do pico entre 18:00 h e 20:00 h, os chuveiros elétricos são responsáveis por quase 20% do consumo nacional de eletricidade (ANEEL, 1998). A substituição dos chuveiros elétricos por aquecedor solar possibilitaria a diminuição da conta de energia do consumidor residencial.

A utilização da energia solar possui várias vantagens, como a economia na conta de energia, a diminuição da demanda pela energia do sistema nacional, adiando assim, a construção de novas barragens e usinas termelétricas e nucleares, que geram diversos impactos – ambientais e por ser uma fonte de energia renovável e limpa, sem produzir resíduos poluentes.

Utilizando a energia elétrica fotovoltaica para fornecer energia a um circuito responsável pela iluminação em residências, pequenas cargas como: rádios, televisores, vídeo cassete, dvd e outros, os sistemas aquecedor solar, fotovoltaico e energia convencional trabalhando de forma conjugada, proporcionaria uma maior economia.

A energia solar fotovoltaica é obtida através da conversão direta da luz em eletricidade (Efeito Fotovoltaico). Edmond Becquerel relatou o fenômeno em 1839, quando nos extremos de uma estrutura de matéria semicondutora surge o aparecimento de uma diferença de potencial elétrico, devido à incidência de luz. No processo de conversão da energia radiante em energia elétrica a célula é a unidade fundamental.

O silício é o segundo elemento mais abundante no globo terrestre. Em 1993 a produção de células fotovoltaicas atingiu a marca de 60 Mwp. O silício é explorado sob diversas formas: monocristalino, policristalino e amorfo. Outros materiais alternativos estão sendo testados para essa aplicação, como exemplo as células de filmes finos, em que seu processo de fabricação requer menor custo, porém sua eficiência energética é baixa se comparada com as de silício convencional. Mas sua aplicação é melhor em equipamentos de baixo consumo.

O Brasil apresenta uma radiação solar média acima de 2500 horas/ano, por ter como característica um clima tropical. Desta forma a energia solar fotovoltaica poderá ser bem mais utilizada, principalmente em regiões remotas em que a rede de distribuição não alcançou. A preservação do meio ambiente é um fator muito importante e que muitas vezes é “ignorado” com a ampliação das linhas de transmissão e construções de usinas hidrelétricas. Além da importante tarefa de conscientização e sócio-cultural pelo uso de uma energia limpa e gratuita e a economia de energia elétrica convencional.

Quando se evita o gasto de energia elétrica convencional, causada pela utilização da energia solar, há benefícios para a economia e impedem-se perdas ambientais além da importante tarefa de conscientização ambiental e sócio-cultural pelo uso de uma energia limpa e gratuita.

A energia solar fotovoltaica já é viável em diversas aplicações, mas, como sistema autônomo para uso doméstico, não consegue competir com o preço da energia elétrica das concessionárias via rede pública de distribuição, devido principalmente ao alto investimento inicial requerido e custo de manutenção do sistema de armazenamento. Mas aqui é importante salientar, que, neste caso, o usuário deixa de ser mero consumidor, passando a ser um autoprodutor de energia elétrica. O que é uma situação bastante diferenciada.

Uma aplicação da energia fotovoltaica para áreas urbanas, é o sistema fotovoltaico interligado a rede pública. Esta configuração dispensa armazenamento local e não necessita atender toda a demanda do consumidor.

O aproveitamento da energia gerada é quase total, pois quando houver excesso da produção em relação ao consumo, este é repassado a concessionária, gerando crédito para o proprietário.



## **2 - CÉLULAS FOTOVOLTAICAS**

### **2.1 - História da Célula Fotovoltaica**

A conversão da energia solar em energia elétrica é realizada através do efeito fotovoltaico observado por Edmond Becquerel em 1839. Foi observada uma diferença de potencial nas extremidades de uma estrutura semicondutora, quando incidia uma luz sobre ela. Impulsionadas pelas novas descobertas da microeletrônica, em 1956 foram construídas as primeiras células fotovoltaicas industriais.

O elevado custo na sua fabricação inviabilizava sua utilização prática a não ser em aplicações especiais, como sistema autônomo de fornecimento de energia elétrica para satélites. Neste caso o custo não era um fator limitante e as características de confiabilidade e de baixo peso, tornaram as células fotovoltaicas a maneira mais conveniente e segura de gerar eletricidade no espaço.

Em estações remotas de telecomunicações foram empregadas células fotovoltaicas para o fornecimento de energia elétrica, devido a comprovação das suas características e desempenho no espaço.

Outro agente impulsionador das pesquisas dessa tecnologia para aplicações diversas, inclusive para complementação do sistema elétrico existente, foi a crise do petróleo em 1973. A energia solar passou a atrair o interesse do governo, com a possibilidade real do esgotamento das reservas petrolíferas.

Mas o custo de produção das células era um fator preocupante em relação a quantidade de energia produzida por ela. Era preciso reduzir o custo significativamente. Por isso o desenvolvimento do mercado foi muito lento. Mas em

1978 a produção já chegava a 1 Mwp/ano. Com o aumento da escala de produção e a pesquisa de tecnologia em materiais usados na fabricação das células o custo e o preço começaram a diminuir. Após quinze anos a produção já alcançava 60 Mwp/ano.

Na década de 90 marca o desenvolvimento acelerado da indústria fotovoltaica. Visando ampliar os horizontes para utilização em massa da energia solar como opção energética, inúmeros programas mundiais foram lançados para a demonstração da viabilidade técnica-comercial da energia solar fotovoltaica em projetos de eletrificação rural nos países em desenvolvimento.

Passada a crise do petróleo, muitas empresas petrolíferas deixaram o ramo do desenvolvimento de novas células. Mas outros fatores continuaram impulsionando a indústria: o fortalecimento do movimento de defesa do meio ambiente e o desenvolvimento do grande mercado da eletrificação rural principalmente nos países subdesenvolvidos. A produção mundial em 1998 era prevista em torno de 100 Mwp<sup>1</sup>.

Hoje um dos maiores desafios que o setor enfrenta é a redução de custos dos sistemas fotovoltaicos. Com as novas tecnologias em desenvolvimento, principalmente a dos filmes finos, poderão provocar reduções significativas nos custos dos módulos fotovoltaicos. O desenvolvimento de modelos auto-sustentados de eletrificação rural com sistemas fotovoltaicos é o maior desafio. O baixo nível cultural e econômico da maior parte das populações limita o desenvolvimento do mercado.

Estimativas levam a crer que cerca de 30% da população mundial, algo como 2 bilhões de pessoas, ainda vivam em condições dependentes do carvão ou biomassa tradicional para cozinhar alimentos e usando velas, pilhas, querosene e diesel para geração de eletricidade.

---

<sup>1</sup> Mwp - mega watt pico (condição de máxima potência)

A energia solar fotovoltaica tem como “vocação” a utilização em pequenas instalações (pequenas cargas) que a torna, econômica, eficiente e segura. O Brasil dispõe de um dos maiores potenciais do mundo para o aproveitamento de energias renováveis principalmente a energia solar, e além de ecologicamente correto, é uma fonte inesgotável de energia.

## 2.2 - Efeito Fotovoltaico

Células fotovoltaicas são fabricadas com material semicondutor, ou seja, material com características intermédias entre um condutor e um isolante.

O silício apresenta-se normalmente como areia. Através de métodos adequados obtém-se o silício em forma pura. O cristal de silício puro não possui elétrons livres e, portanto é mal condutor elétrico. Para alterar isto acrescentam-se porcentagens de outros elementos. Este processo denomina-se dopagem. A dopagem do silício com o fósforo obtém-se um material com elétrons livres ou materiais com portadores de carga negativa (silício tipo N).

Realizando o mesmo processo, mas agora acrescentado Boro ao invés de Fósforo, obtém-se um material com características inversas, ou seja, falta de elétrons ou material com cargas positivas livres (silício tipo P).

Cada célula solar compõe-se de camada fina de material tipo N e outra com maior espessura de material tipo P (ver figura 2.1)

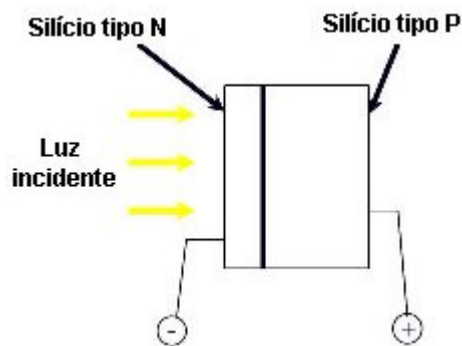


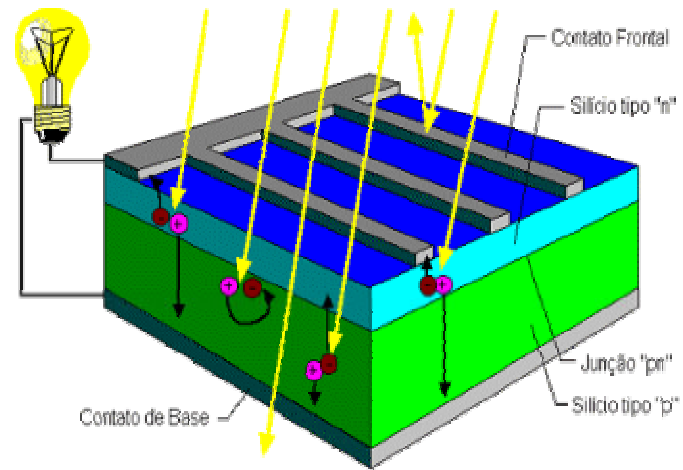
Figura 2.1

Separadamente, ambas as capas são eletricamente neutras. Mas ao serem unidas, na região P-N, forma-se um campo elétrico devido aos elétrons livres do silício tipo N que ocupam os vazios da estrutura do silício tipo P. Ao incidir luz sobre a célula fotovoltaica, os fótons chocam-se com outros elétrons da estrutura do silício fornecendo-lhes energia e transformando-os em condutores. Devido ao campo elétrico gerado pela junção P-N, os elétrons são orientados e fluem da camada “P” para a camada “N”.

Por meio de um condutor externo, ligando a camada negativa à positiva, gera-se um fluxo de elétrons (corrente elétrica). Enquanto a luz incidir na célula, manter-se-á este fluxo.

A intensidade da corrente elétrica gerada variará na mesma proporção conforme a intensidade da luz incidente.

Uma célula fotovoltaica não armazena energia elétrica. Apenas mantém um fluxo de elétrons estabelecidos num circuito elétrico enquanto houver incidência de luz sobre ela. Este fenômeno é denominado “Efeito fotovoltaico” (ver figura 2.2)



**Figura 2.2**

### 3 - Estrutura de uma Célula Fotovoltaica

Ao contrario da maioria dos outros semicondutores, o dispositivo fotovoltaico não usa a estrutura normal do silício, como nos diodos, ao invés disso usa uma fina camada de óxido transparente. Estes óxidos são altamente transparentes e tem alta condutividade elétrica. Camadas anti-reflexo podem ser usadas para cobrir uma célula fotovoltaica. Os cristais policristalinos são grãos minúsculos de material semicondutor. As propriedades dos filmes policristalinos são diferentes do silício normal. Ele provou ser melhor para criar um campo elétrico entre dois materiais semicondutores diferentes. Veja a estrutura de uma célula (figura 2.3).

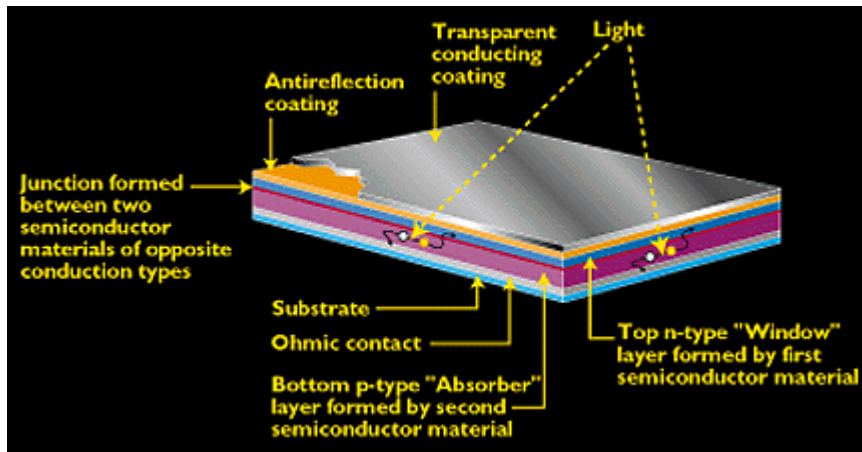
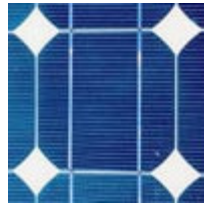


Figura - 2.3

## 2.4 - Células de silício monocristalino

Estas células obtém-se a partir de barras cilíndricas de silício monocristalino produzidas em fornos especiais. As células são obtidas por corte das barras em forma de pastilhas finas ( $0,4 - 0,5 \text{ mm}^2$  de espessura). A sua eficiência na conversão da luz solar em eletricidade é superior a 12%. A figura 2.4 mostra a estrutura de uma célula monocristalina.



**Figura 2.4**

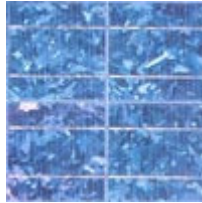
## 2.5 - Células de silício policristalino

Estas células são produzidas a partir de blocos de silício obtidos por fusão de silício puro em moldes especiais. Uma vez nos moldes, o silício esfria lentamente e solidifica-se. Neste processo, os átomos não se organizam num único cristal. Forma-se uma estrutura policristalina com superfícies de separação entre os cristais. Sua eficiência na conversão de luz solar em eletricidade é ligeiramente menor do que nas de silício monocristalino. A figura 2.5 mostra a estrutura de uma célula de silício policristalino.

---

<sup>2</sup> mm - milímetro (unidade de comprimento)

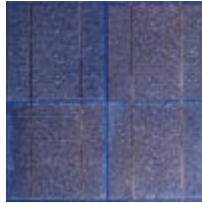




**Figura 2.5**

## **2.6 - Células de silício amorfo**

Estas células são obtidas por meio da deposição de camadas finas de silício sobre superfícies de vidro ou metal. Sua eficiência na conversão de luz solar em eletricidade varia entre 5% e 7%. A figura 2.6 mostra a estrutura de uma célula de silício amorfo



**Figura 2.6**

## **2.7 - Células de filmes finos**

Silício Amorfo Hidrogenado ( $a\text{-Si}^3$ ), é uma tecnologia fotovoltaica em filmes finos (películas delgadas).

---

<sup>3</sup> a-Si - silício amorfo

A melhor aplicação para essa tecnologia está em calculadoras, relógios e outros produtos onde o consumo de energia é baixo. Tais células são eficientes sob iluminação artificial (principalmente sob lâmpadas fluorescentes).

Estes filmes finos são depositados sobre substratos de baixo custo, como vidro, aço, inox e alguns plásticos.

Foram desenvolvidos painéis solares, disponíveis no mercado que são flexíveis, inquebráveis, mais leves, semitransparentes, com superfícies curvas, que estão ampliando o mercado fotovoltaico por sua maior versatilidade. Por sua aparência estética mais atraente, o a-Si tem encontrado aplicações arquitetônicas diversas, substituindo materiais de cobertura de telhados e fachadas na construção civil.

O recorde de eficiência em células de a-Si individuais disponível no mercado está na faixa de 8-9%. Em algumas aplicações arquitetônicas como material de revestimento é que o a-Si leva grande vantagem sobre as células convencionais de silício, pois o custo por metro quadrado, e não o custo por  $W_p$ , é a grandeza de interesse e neste aspecto, hoje o a-Si tem custo inferior à metade do custo da tecnologia convencional do silício.

O mais recente competidor no mercado fotovoltaico para geração de energia elétrica é o  $CdTe^4$ , também na forma de filmes finos.

Outro competidor do mercado no futuro próximo são os compostos baseados no disseleneto de Cobre e Índio ( $CIS^5$ ), principalmente por seu potencial atingir eficiência relativamente elevada. Pequenas áreas produzidas em laboratório apresentam no momento eficiência em torno de 18%.

---

<sup>4</sup> CdTe - Telureto de Cádmio

<sup>5</sup> CIS - Disseleneto de Cobre e Índio

### **3 - CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Em um sistema fotovoltaico o elemento básico é a célula. A conversão da energia radiante em eletricidade acontece na célula, através do efeito fotovoltaico.

Cada célula gera uma tensão elétrica da ordem de 0,4 a 0,5 Volt<sup>6</sup>, que sendo associadas em série pode aumentar essa tensão para uma desejada. Sendo assim na saída de cada módulo se tem a soma da energia produzida por cada célula resultando num gerador com energia significativa.

Existem diversos tipos de células fotovoltaicas no mercado. Algumas estão em estágio experimental. As atuais pesquisas buscam construir células mais eficientes e com baixos custos de fabricação, problema esse que limita a sua disseminação no mercado brasileiro.

As células mais importantes e consolidadas no mercado são as fabricadas a base de silício. Atualmente constituem o grande campo de pesquisas para desenvolvimento de células de menor custo, são as células de filmes finos. A estratégia é usar pouco material, diminuir o consumo de energia na fabricação permitindo a produção em larga escala.

Um conjunto de células associadas em série paralelo forma um painel fotovoltaico, e com outros dispositivos como acumuladores, conversores e inversores constituem um sistema fotovoltaico de geração de energia elétrica. A confiabilidade desse sistema é uma das características mais importantes. Porque não possui partes

móveis, baixo nível de complexidade, não se degrada com os efeitos naturais, como: ventos fortes, descargas atmosféricas e além de tudo apresenta alto índice de disponibilidade. Para um sistema fotovoltaico utilizado como complemento de energia elétrica em relação a convencional, uma das vantagens é que caso ocorra um defeito, este se limita à instalação específica não se estendendo às demais.

Outra característica importante é que devido às células fotovoltaicas estarem dispostas em módulos, o sistema pode ser expandido.

No estado de Mato Grosso, os pequenos produtores rurais têm uma parcela significativa no mercado consumidor local. Esses são mais penalizados pelas distâncias e pelos custos em relação à distribuição da energia elétrica convencional, provocando na sua produção uma diminuição do potencial. Esse problema pode ser resolvido com a implantação de sistemas fotovoltaicos. Para que isso se viabilize é preciso de uma política mais eficaz de incentivo para a aquisição de equipamentos que utilizam essa tecnologia.

Mato Grosso e um raio de 900 Km de suas divisas responderá em breve por 65% da produção de grãos e fibras nacionais.

Grandes empresários direcionam o foco de suas atenções para Mato Grosso. Com isso, o perfil econômico do estado ganha um novo contorno e deixa de ser exclusivamente o de estado de produção primária para se transformar em centro de verticalização da produção. “Temos que aproveitar esse bom momento, para estimular a opção da exploração da energia elétrica fotovoltaica como mais uma solução econômica, divulgando todas as vantagens dessa tecnologia, enfatizando a mais importante que é a preservação do meio ambiente”.

---

<sup>6</sup> Volt - unidade de medida de Tensão elétrica

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVARENGA, Carlos Alberto. Energia solar. Lavras: UFLA/FAEPE, 2001.

ACIOLI, José de Lima. Fontes de energia. Brasília: Universidade de Brasília, 1994.

COMETTA, Emilio. Energia solar. São Paulo: Hemus, 1978.

PALZ, Wolfgang. Energia solar e fontes alternativas. São Paulo: Hemus, 1981.

Sistema Fotovoltaico. Disponível em <http://www.solenerg.com.br/conceitos>