
TUTORIAL DE CÉLULA SOLAR

Programa de Educação Tutorial

Engenharia de Telecomunicações

Universidade Federal Fluminense

Niterói-RJ

Março / 2008

Sumário

Prefácio	iii
1 Histórico	1
1.1 Funcionamento	1
2 Tipos de Células	3
2.1 Silício Monocristalino	3
2.2 Silício Policristalino	4
2.3 Silício Amorfo	4
2.4 Células CIGS	5
3 Radiação Solar e Aplicações	7
3.1 Radiação Solar	7
3.2 Instrumentos de medição	8
4 Módulos Fotovoltaicos	11
4.1 Problemas	11
5 Características Elétricas	13
5.1 Fatores que afetam as características elétricas	13
6 Componentes de um sistema fotovoltaico	15
6.1 Sistemas Isolados	15
6.2 Sistemas Híbridos	15
6.3 Sistemas Interligados à Rede	16

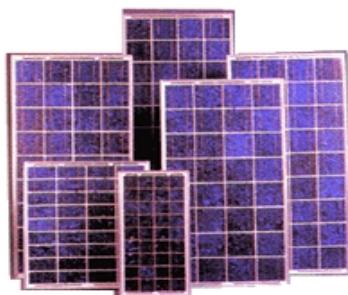
Prefácio

Um dos grandes problemas encontrados hoje em dia pelas nações consiste em como administrar a crescente demanda de energia, ao passo que as fontes tradicionais estão atingindo seu limite. Para que tal problema seja solucionado com êxito, é preciso aceitar o desafio por buscas de maneiras diferentes de se suprir esta necessidade energética. Na vanguarda desta busca, encontram-se os países mais desenvolvidos que investem exponencialmente em pesquisas de Fontes Alternativas de Energia.

Como fruto dessas pesquisas já é observada a extração de energia proveniente dos ventos (Energia Eólica), das marés (Energia Mareomotriz), do calor interno da Terra (Energia Geotérmica), da luz do sol (Energia Solar), esta última, que será objeto de estudo no presente tutorial.

A conversão direta da energia solar em eletricidade é obtida graças ao efeito fotovoltaico, que é a base do funcionamento das células solares. Os materiais usados são os semicondutores sendo o mais utilizado o silício, que é também o material básico para a indústria eletrônica.

Autores : Everton Rcoha de Paula Silva
Gustavo Cunha Pétris
Luis Fillipe Couto de Araujo Pereira



Este documento é de distribuição gratuita, sendo proibida a venda de parte ou da íntegra do documento.

Capítulo 1

Histórico

A célula fotovoltaica é a unidade fundamental do processo de conversão direta da luz solar em eletricidade (Efeito Fotovoltaico). Este efeito, relatado por Edmond Becquerel, em 1839, é o aparecimento de uma diferença de potencial nos extremos de uma estrutura de material semicondutor, produzida pela absorção da luz.

A princípio, a tecnologia foi desenvolvida devido a busca, por empresas do setor de telecomunicações, de fontes de energia para sistemas instalados em localidades remotas. Em seguida, a corrida espacial deu prosseguimento aos avanços nessa área. A célula solar era, e continua sendo, o meio mais adequado (menor custo e peso) para fornecer a quantidade de energia necessária para longos períodos de permanência no espaço. Outro uso espacial que impulsionou o desenvolvimento das células solares foi a necessidade de energia para satélites.

O interesse em aplicações terrestres foi ampliado pela crise energética de 1973. Porém, para que fosse proveitosa a aplicação dessa tecnologia havia a necessidade de reduzir substancialmente o custo de produção das células solares em relação às células usadas em explorações espaciais. Modificou-se, também, o perfil das empresas envolvidas no setor. Por exemplo, empresas de petróleo resolveram diversificar seus investimentos, englobando a produção de energia a partir da radiação solar.

A produção de células fotovoltaicas atingiu a marca de $60MWp$ (Watt pico, que é uma unidade de potência utilizada para módulos solares) em 1993, onde o material mais utilizado era o silício. Sendo este elemento o segundo mais abundante no globo terrestre, ele tem sido explorado sob diversas formas: monocristalino, policristalino e amorfo, onde cada uma delas é explicada com detalhes mais adiante. No entanto, é grande a busca por materiais alternativos, principalmente na área de filmes finos, onde o silício amorfo se enquadra.

1.1 Funcionamento

Por definição, células solares são módulos formados por células fotovoltaicas, conectadas eletricamente e reunidas em uma única estrutura.

Observando-se a origem da palavra fotovoltaica pode-se separá-la em duas partes, onde foto = luz e voltaica = eletricidade. Dessa forma, uma célula fotovoltaica converte a luz do Sol diretamente em eletricidade.

As células fotovoltaicas são feitas de materiais especiais chamados de semicondutores, sendo o silício o mais utilizado atualmente.

Basicamente, quando a luz atinge a célula, uma certa quantidade dela é absorvida pelo material semicondutor. Essa energia absorvida é transferida para o semicondutor fazendo com que os elétrons fracamente ligados à estrutura molecular sejam arrancados, permitindo que eles possam fluir livremente.

Capítulo 2

Tipos de Células

Do ponto de vista de funcionamento, uma célula solar é um fotodiodo com uma grande área que pode ser exposta à luz, seja solar ou não. Desta forma, qualquer diodo (junção p-n) cuja área ativa possa ser exposta à luz tornar-se-á uma célula solar. Obviamente, queremos dizer que o diodo irá se comportar como uma célula solar, mas não produzirá energia suficiente para uma aplicação comercial como fonte de energia. As células fotovoltaicas são fabricadas, na sua grande maioria, usando o silício (*Si*) podendo ser constituída de cristais monocristalinos, de cristais policristalinos ou de silício amorfo. Hoje em dia já podemos encontrar as células CIGS (Cobre-Índio-Gálio-Selênio), que serão detalhadas mais adiante.

2.1 Silício Monocristalino

A célula mais utilizada e comercializada como conversor direto de energia solar em eletricidade é a de silício monocristalino, visto que sua fabricação já é de fácil manipulação, sendo bem conhecida e executada. A parte inicial do processo de fabricação da célula de silício é a extração do cristal de dióxido de silício. Este material é desoxidado em grandes fornos, purificado e solidificado. Com este processo é alcançado um grau de pureza entre 98 e 99%, sendo consideravelmente eficiente, visto que se encontra em uma área de bom aproveitamento energético e de custo. Porém, para funcionar como células fotovoltaicas, este silício necessita de um grau de pureza mais elevado, alcançando a marca de 99,9999%.

Para se 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 Czochralski é o mais utilizado para se obter tais características. 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 $300\mu m$. 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 à vapor de fósforo em um forno onde a temperatura varia de 800 a $1000^{\circ}C$.

As células fotovoltaicas que apresentam as maiores eficiências, dentre todos os outros tipos de células que utilizam o silício como material base, são as monocristalinas. Essas

fotocélulas, se acompanharem o processo mencionado acima, certificam uma eficiência que pode chegar até 18%.

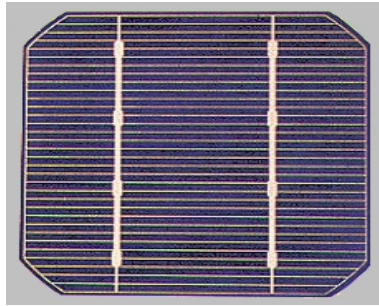


Figura 2.1: Silício Monocristalino

2.2 Silício Policristalino

São mais baratas, por exigirem um processo de preparação das células menos rigoroso. Entretanto, a eficiência cai um pouco em comparação às células de silício monocristalino. O processo de pureza do silício policristalino e a técnica de fabricação da mesma é similar ao do silício monocristalino, mas o que difere esses dois tipos de célula é o rigor de controle na fabricação. Podem ser preparadas pelo corte de um lingote, de fitas ou depositando um filme num substrato, tanto por transporte de vapor como por policristalino imersão. Nestes dois últimos casos só o silício policristalino pode ser obtido. Cada técnica produz cristais com características específicas, incluindo tamanho, morfologia e concentração de impurezas. Ao longo dos anos, o processo de fabricação tem alcançado eficiência máxima de 12,5% em escalas industriais.

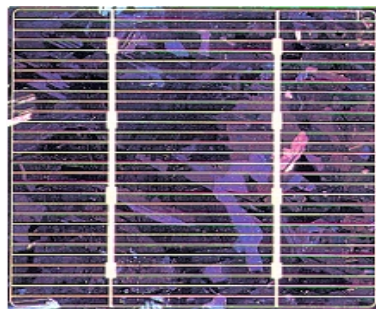


Figura 2.2: Silício Policristalino

2.3 Silício Amorfo

Uma célula de silício amorfo apresenta alto grau de desordem na estrutura dos átomos, característica esta suficiente para diferenciar esse tipo de célula das demais apresentadas acima. A sua utilização em fotocélulas tem mostrado grandes vantagens tanto nas propriedades elétricas quanto no processo de fabricação. Tem como suas principais características o fato de apresentar uma absorção da radiação solar na faixa do visível e poder

ser fabricado mediante deposição de diversos tipos de substratos. Outras características como processo de fabricação simples e barato, possibilidade de fabricação de células com grandes áreas e baixo consumo de energia na produção conferem a esse tipo de material a importância de ser uma das principais tecnologias para sistemas fotovoltaicos de baixo custo.

Apesar dos benefícios apresentados, o uso de silício amorfo apresenta duas desvantagens: baixa eficiência de conversão comparada às células mono e policristalinas de silício e o fato das células serem afetadas por um processo de degradação logo nos primeiros meses de operação, reduzindo assim a eficiência ao longo de sua vida útil.



Figura 2.3: Silício Policristalino

2.4 Células CIGS

As células CIGS, Cobre-Índio-Gálio-Selênio ou $Cu(In, Ga)Se_2$, empregam outros tipos de semicondutores na fabricação das células fotoelétricas. Tais células são feitas com várias camadas ultra finas (na ordem de micron) de diferentes semicondutores, diferentemente das de silício que são baseadas numa junção PN de um mesmo material.

A composição das células CIGS é mais abrangente no que diz respeito ao substrato da célula, pois apesar de, geralmente, utilizar-se o vidro, as camadas também podem ser depositadas sobre polímeros. Essa é a vantagem das células CIGS, pois utilizando polímeros não dependem de uma estrutura para erguer os painéis e ela pode ser aderida em paredes e tetos, cortando custos de instalação.

O contato entre as camadas é feita por uma fina camada ($0,5\mu m$) de Molibdênio, metal de transição de símbolo Mo de número atômico 42, a qual é depositada por vaporização em cima do substrato. O Mo , além de ser um bom condutor, também é um eficiente material para adesão da célula ao substrato.

A próxima camada é constituída do próprio CIGS, tendo como função a absorção da energia solar e a consequente geração de pares elétron-lacuna para os condutores próximos.

Além dessas camadas há também a camada neutra que vem acima da camada de absorção. Esta camada é de cerca de $50nm$ de CdS (Sulfeto de Cádmio). O ZnO (Óxido de Zinco), adicionado ao CdS , contribuem ao lado N da junção PN da célula solar. O *gap* de energia do CdS é de $E_g = 2,4eV$, e portanto, dentro da faixa energética do espectro solar. Porém, o par elétron-lacuna aqui gerado não consegue se encontrar na região de carga espacial e, conseqüentemente, não contribui para a corrente gerada na célula. Devido a camada de apenas $50nm$, pouca luz é absorvida nela antes de chegar à camada de absorção. A função da camada neutra é proteger a camada de absorção das

reações químicas causadas pelo depósito da camada de ZnO , em particular a difusão de átomos de uma camada entre outra.

A vantagem das células CIGS em relação às de silício é a economia de material. Devido à alta absorção do CIGS, é necessária uma camada da ordem de $1\mu m$ de espessura, enquanto células de silício necessitam de camadas da ordem de 200 a $300\mu m$.

A eficiência de células CIGS é de 18,8% para pequenas áreas, e de 11,8% para grandes áreas ($0,3 \cdot 1,2m$)².



Figura 2.4: CIGS

Capítulo 3

Radiação Solar e Aplicações

3.1 Radiação Solar

O Sol, além de ser responsável pela vida na Terra, é um grande gerador de radiação, a qual é uma fonte inesgotável de energia. O Sol fornece anualmente $1,5 \cdot 10^{18} kWh$ de energia, o que equivale a 10000 vezes a energia consumida pelos humanos até o ano de 2006.

O planeta Terra descreve anualmente uma trajetória elíptica ao redor do Sol com um ângulo de $23,5^\circ$ em relação ao plano equatorial. Esta inclinação é responsável pelas estações do ano e pela dificuldade de se calcular a posição do Sol para uma determinada data.

A posição angular do Sol é denominada Declinação Solar (δ). Este ângulo varia de acordo com estes limites: $-23,45^\circ < \delta < 23,45^\circ$.

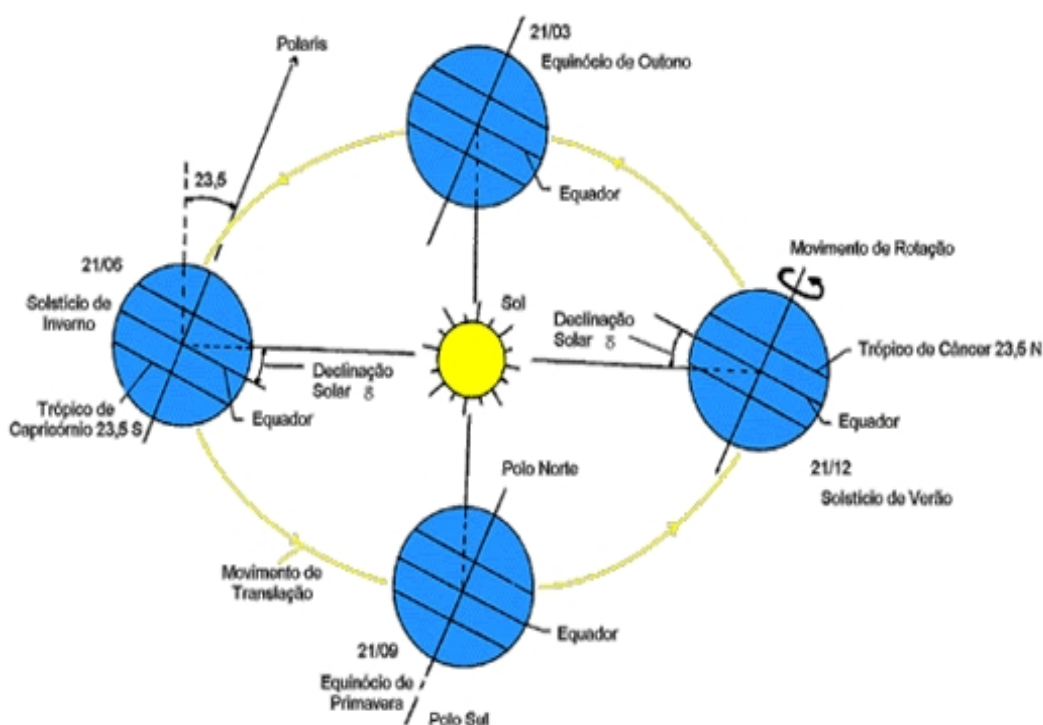


Figura 3.1: Órbita da Terra

A radiação solar que atinge o topo da atmosfera terrestre provém da região da fotosfera solar que é uma camada tênue com aproximadamente 300km de espessura e temperatura superficial da ordem de 5800K (5527°C). Porém, esta radiação não se apresenta como um modelo de regularidade, pois há a influência das camadas externas do Sol (cromosfera e coroa), com pontos quentes e frios, erupções cromosféricas, entre outros efeitos.

Analisando a radiação ao nível do solo, nem toda a radiação solar que chega às camadas superiores da atmosfera é absorvida, porque devido à reflexão e à absorção dos raios solares, apenas uma fração desses raios chega à superfície da Terra. Esta fração que atinge o solo é constituída por uma componente direta (ou de feixe) e por uma componente difusa.

Posicionando-se a superfície receptora inclinada com relação à horizontal, haverá uma terceira componente refletida do entorno (obstáculos, vegetações, solo, etc.). O coeficiente desta componente é chamado de (albedo).

Antes de atingir o solo, as características da radiação solar (intensidade, distribuição espectral e angular) são afetadas por interações com a atmosfera devido aos efeitos de absorção e espalhamento. Estas modificações são dependentes da espessura da camada atmosférica, também identificada por um coeficiente denominado (Massa de Ar) (AM), e, portanto, do ângulo Zenital do Sol, da distância Terra-Sol e das condições atmosféricas e meteorológicas.

3.2 Instrumentos de medição

Os instrumentos de medição são de grande importância para a aplicação das células solares, pois é com eles que se define a melhor localização das células fotovoltaicas, para melhor aproveitá-las. De acordo com as normas estabelecidas pela OMM (Organização Mundial de Meteorologia) são determinados limites de precisão para quatro tipos de instrumentos: de referência ou padrão, instrumentos de primeira, segunda e terceira classe. As medições padrões são: radiação global e difusa no plano horizontal e radiação direta normal.

Alguns desses instrumentos são:

1. **Piranômetros:** medem a radiação global. Este instrumento caracteriza-se pelo uso de uma termopilha que mede a diferença de temperatura entre duas superfícies, uma pintada de preto e outra pintada de branco igualmente iluminadas. A expansão sofrida pelas superfícies provoca uma diferença de potencial que, ao ser medida, mostra o valor instantâneo da energia solar. Precisão de 2% (primeira classe) e 5% (segunda classe).

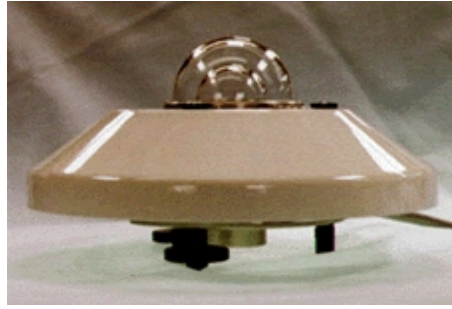


Figura 3.2: Piranômetro

2. **Pireliômetros:** medem a radiação direta. Ele se caracteriza por apresentar uma pequena abertura de forma a visualizar apenas o disco solar e a região vizinha denominada circunsolar. O instrumento segue o movimento solar onde é constantemente ajustado para focalizar melhor a região do sensor. Precisão de 0,5%.



Figura 3.3: Pireliômetro

3. **Heliógrafo:** mede a duração do brilho solar. A radiação solar é focalizada por uma esfera de cristal de 10cm de diâmetro sobre uma fita que, pela ação da radiação é enegrecida. O comprimento desta fita exposta a radiação solar mede o número de horas de insolação.



Figura 3.4: Heliógrafo

4. **Actinógrafo:** mede a radiação global. Este instrumento é composto de sensores baseados na expansão diferencial de um par bimetálico. Os sensores são conectados a uma pena que registra o valor instantâneo da radiação solar. Precisão de 15 a 25% (terceira classe).

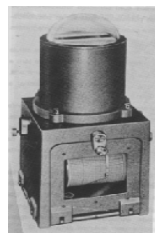


Figura 3.5: Actinógrafo

Capítulo 4

Módulos Fotovoltaicos

Módulos Fotovoltaicos são células solares conectadas umas as outras. Tais conexões são feitas em virtude da baixa tensão e corrente de saída em uma célula solar e podem ser feitas em paralelo ou em série.

A associação em paralelo é caracterizada pela soma das correntes de cada célula mas não pela soma das tensões. A tensão de saída tem o mesmo valor de uma única célula fotovoltaica. Esta configuração nos retorna uma corrente de $3A$ e uma tensão em torno de $0,7V$.

Como a associação em paralelo fornece uma tensão muito baixa ela não é muito utilizada. Isso não acontece com a associação em série que tem por característica a soma das tensões de cada célula. Esta configuração nos retorna uma tensão de $12V$ o que possibilita a carga de baterias que funcionam na faixa dos $12V$.

4.1 Problemas

Podemos ter perda de potência quando algumas das células não estão em seu funcionamento adequado. Isso pode acontecer por vários motivos como por exemplo a má iluminação de uma célula ou o excesso de iluminação.

Então para que um pior desempenho não ocorra são utilizados diodos de desvio ou (*bypass*). Este diodo serve como caminho alternativo para a corrente e limita a dissipação de calor na célula defeituosa. Ele é instalado em módulos fotovoltaicos pois os torna mais baratos em relação à instalação de um diodo para cada célula.

Já para uma corrente negativa, que ocorre quando uma célula ao invés de gerar corrente recebe muito mais do que ela pode produzir, instalamos um diodo de bloqueio que evita a circulação dessa corrente negativa.

Capítulo 5

Características Elétricas

A potência dos módulos é dada pela potência de pico e outros parâmetros são fundamentais para uma melhor caracterização da funcionalidade dos módulos fotovoltaicos, que são:

- Voltagem de Circuito Aberto (V_{oc});
- Corrente de Curto Circuito (I_{sc});
- Potência Máxima (P_m);
- Voltagem de Potência Máxima (V_{mp});
- Corrente de Potência Máxima (I_{mp}).

Condições padrão para se obter curvas características dos módulos:

- Radiação Solar de $1000W/m^2$ (radiação recebida na superfície da Terra em dia claro e ao meio dia);
- Temperatura de $25^{\circ}C$ na célula.

5.1 Fatores que afetam as características elétricas

Os principais fatores que influenciam nas características elétricas dos módulos fotovoltaicos são a LUMINOSIDADE e a TEMPERATURA DAS CÉLULAS. A corrente gerada nos módulos aumenta linearmente com o aumento da intensidade luminosa e o aumento da temperatura faz com que a eficiência do módulo caia abaixando assim os pontos de operação para potência máxima gerada.

Capítulo 6

Componentes de um sistema fotovoltaico

Um sistema fotovoltaico pode ser classificado em três categorias distintas: sistemas isolados, sistemas híbridos e sistemas conectados à rede. Os sistemas obedecem a uma configuração básica onde o sistema deverá ter uma unidade de controle de potência e também uma unidade de armazenamento.

6.1 Sistemas Isolados

Em geral, utiliza-se alguma forma de armazenamento de energia. Este armazenamento pode ser feito através de baterias e energia gravitacional. Alguns sistemas isolados não precisam de armazenagem como é o caso da irrigação onde toda a água bombeada é consumida ou estocada em reservatórios. Exemplos no Brasil:

- Sistema de bombeamento fotovoltaico para irrigação*

No município de Capim Grosso, o sistema foi instalado no açude Rio dos Peixes e é formado por 16 painéis fotovoltaicos que foram instalados em balsas flutuantes em virtude das variações sazonais do nível da água.

- Sistema de telefonia pública utilizando energia fotovoltaica em Maceio-Al*

6.2 Sistemas Híbridos

São aqueles que, desconectados da rede convencional, apresentam fontes e geração de energia como por exemplo: turbinas eólicas, geração diesel, módulos fotovoltaicos entre outras. Para tal sistema é necessário um controle de todas as fontes para que haja máxima eficiência na entrega da energia para o usuário. Em geral, são empregados para sistemas de médio e grande porte vindo a atender um número maior de usuários.

Exemplos no Brasil:

- Sistema Híbrido (Solar-Eólica-Diesel)*

Foi instalado na comunidade de Joanes no Pará e é o primeiro sistema híbrido solar-eólica-diesel implantado no Brasil e conta com equipamentos doados pelo Departamento de Energias dos Estados Unidos (DOE), o acompanhamento técnico do Laboratório Americano de Energias Renováveis (NREL) e o CEPEL.

6.3 Sistemas Interligados à Rede

Utilizam grande número de painéis fotovoltaicos, e não utilizam armazenamento de energia pois toda a geração é entregue à rede. Este sistema é complementar ao sistema elétrico de grande porte ao qual está conectado.