



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE
Faculdade de Ciências
Departamento de Física



ENERGIAS RENOVÁVEIS

CURVA CARACTERÍSTICA I_V DOS MÓDULOS FOTOVOLTAÍCOS

**Docentes: Prof. Doutor. B. Cuamba
dr. Ataíde**
Discente : Paiva, Romildo Nuno da C.

Maputo, Outubro de 2004

1. Introdução

Ao longo deste relatório serão abordados de forma sintética vários aspectos de interesse relacionados com a energia solar fotovoltaica, em particular os sistemas fotovoltaicos (PV, photovoltaic). Dentro desta perspectiva o relatório pretende fornecer informação sobre a utilização actual dos sistemas fotovoltaicos tais como aplicações, aspectos tecnológicos relacionados com o projecto dimensionamento dos sistemas. Será feita referência aos diferentes materiais, acumuladores e inversores. Por fim determinar-se-á a curva característica $I_{xf}(V)$ de uma célula solar, que é o objectivo deste relatório.

A Energia Solar Fotovoltaica é a energia obtida através da conversão direta da luz em electricidade (Efeito Fotovoltaico). O efeito fotovoltaico, relatado por Edmond Becquerel, em material semiconductor, produzida pela absorção da luz. A célula fotovoltaica é a unidade fundamental do processo de conversão.

Inicialmente o desenvolvimento da tecnologia apoiou-se na busca, por empresas do sector de telecomunicações, de fontes de energia para sistemas instalados em localidades remotas. O segundo agente impulsionador foi a "corrida espacial". 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.

A crise energética de 1973 renovou e ampliou o interesse em aplicações terrestres. Porém, para tornar economicamente viável essa forma de conversão de energia, seria necessário, naquele momento, reduzir em até 100 vezes o custo de produção das células solares em relação ao daquelas células usadas em explorações espaciais. Modificou-se, também, o perfil das empresas envolvidas no sector. Nos Estados Unidos, as empresas de petróleo resolveram diversificar seus investimentos, englobando a produção de energia a partir da radiação solar.

Em 1993 a produção de células fotovoltaicas atingiu a marca de 60 MWp, sendo o Silício quase absoluto no "ranking" dos materiais utilizados. O Silício, segundo elemento mais abundante no globo terrestre, tem sido explorado sob diversas formas: monocristalino, policristalino e amorfo. No entanto, a busca de materiais alternativos é intensa e concentra-se na área de filmes finos, onde o silício amorfo se enquadra. Células de filmes finos, além de utilizarem menor quantidade de material do que as que apresentam estruturas cristalinas, requerem uma menor quantidade de energia no seu processo de fabricação. Ou seja, possuem uma maior eficiência energética.

Energia Solar Fotovoltaica

A preocupação em estudar novas formas de produção de energia fez com a utilização de células fotovoltaicas não se restringisse somente para programas espaciais mas que fosse intensamente estudados e utilizados no meio terrestre para suprir o fornecimento de energia.

Um dos fatores que impossibilitava a utilização da energia solar fotovoltaica em larga escala era o alto custo das células fotovoltaicas.

Atualmente, os sistemas fotovoltaicos vêm sendo utilizados em instalações remotas possibilitando vários projetos sociais, agrôpastoris, de irrigação e comunicações. As facilidades de um sistemas fotovoltaico tais como: modularidade, baixos custos de manutenção e vida útil longa, fazem com que sejam de grande importância para instalações em lugares desprovidos da rede elétrica.

Efeito fotovoltaico

O efeito fotovoltaico dá-se em materiais da natureza denominados semicondutores que se caracterizam pela presença de bandas de energia onde é permitida a presença de elétrons (banda de valência) e de outra onde totalmente "vazia" (banda de condução).

O semicondutor mais usado é o silício. Seus átomos se caracterizam por possuírem quatro elétrons que se ligam aos vizinhos, formando uma rede cristalina. Ao adicionarem-se átomos com cinco elétrons de ligação, como o fósforo, por exemplo, haverá um elétron em excesso que não poderá ser emparelhado e que ficará "sobrando", fracamente ligado a seu átomo de origem. Isto faz com que, com pouca energia térmica, este elétron se livre, indo para a banda de condução. Diz-se assim, que o fósforo é um dopante doador de elétrons e denomina-se dopante *n* ou impureza *n*.

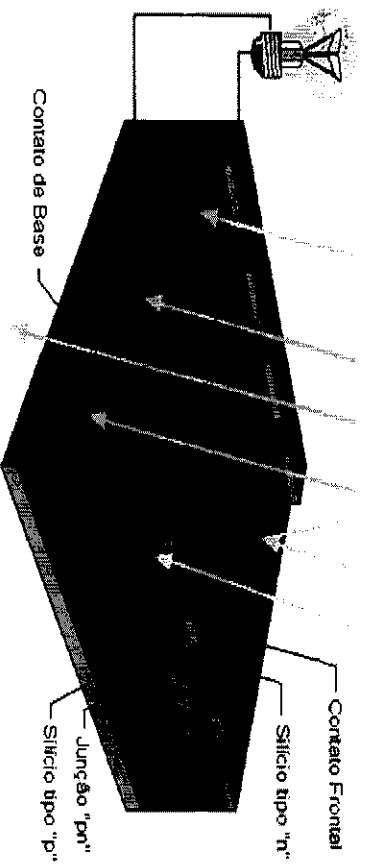


Figura 1. - Corte transversal de uma célula fotovoltaica

Tipos de Células

As células fotovoltaicas são fabricadas, na sua grande maioria, usando o silício (Si) e podendo ser constituída de cristais monocristalinos, policristalinos ou de silício amorfo.

Silício Monocristalino

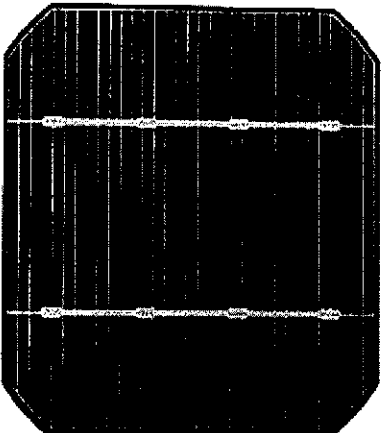


Figura 2. - Célula de silício monocristalino

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 mais utilizado para se chegar as 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 orientada 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 μ m.

Após o corte e limpezas 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.

Silício Policristalino

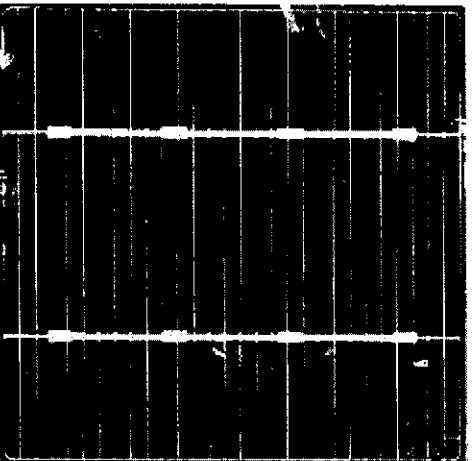


Figura 3. - Célula de silício policristalino

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 só o silício policristalino pode ser obtido. Cada técnica produz cristais com características

As células de silício policristalino 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 as células de silício monocristalino.

O processo de pureza do silício utilizada na produção das células de silício policristalino é similar ao processo do Si monocristalino, o que permite obtenção de níveis de eficiência compatíveis. Basicamente, as técnicas de fabricação de células policristalinas são as mesmas na fabricação das células monocristalinas, porém com menores rigores de controle.

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.

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.

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.

Um sistema de produção electro-solar é uma fonte de energia que, através da utilização de células fotovoltaicas, converte directamente a energia luminosa em electricidade.

Vantagens fundamentais:

- Não consome combustível
- Não produz poluição nem contaminação ambiental
- É silencioso
- Tem uma vida útil superior a 20 anos
- É resistente a condições climáticas extremas (granizo, vento, temperatura e humidade)
- Não tem peças móveis e, portanto, exige pouca manutenção (só a limpeza do painel)
- Permite aumentar a potência instalada por meio da incorporação de módulos adicionais

Principais aplicações:

Geralmente é utilizado em zonas afastadas da rede de distribuição eléctrica, podendo trabalhar de forma independente ou combinada com sistemas de produção eléctrica convencional. Suas principais aplicações são:

- Electrificação de imóveis rurais: luz, TV, rádio, comunicações, bombas de água
- Electrificação de cercas
- Iluminação exterior
- Sinalização
- Protecção catódica
- Barcos, rouletes

Componentes do sistema:

Corrente contínua 12V:

- Painéis ou módulos de células fotovoltaicas
- Suportes para os painéis
- Regulador de carga de baterias e banco de baterias

Corrente alternada 110/220V:

Além dos elementos anteriores, entre as baterias e o consumo será necessário instalar um **inversor de corrente** com a potência adequada. O inversor converte a corrente contínua (DC) das baterias em corrente alternada (AC). A maioria dos eletrodomésticos utiliza a corrente alternada.

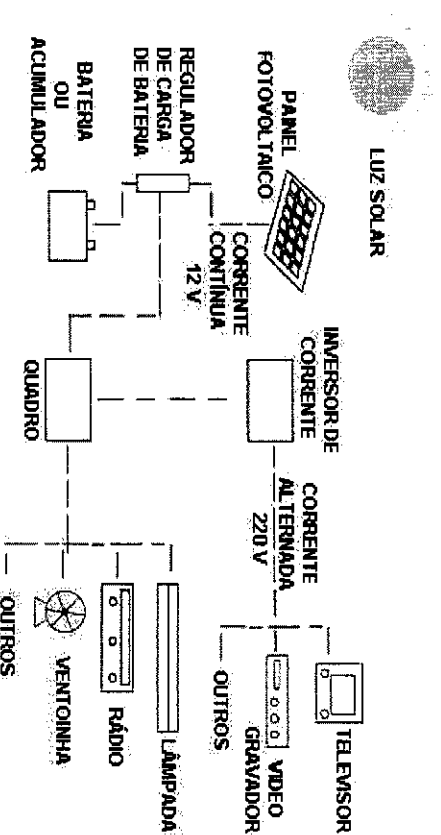


Figura 4.-Esquema ilustrativo dum sistema.

Módulos Fotovoltaicos

Pela baixa tensão e corrente de saída em uma célula fotovoltaica, agrupam-se várias células formando um módulo. O arranjo das células nos módulos podem ser feito conectando-as em série ou em paralelo.

Ao conectar as células em paralelo, soma-se as correntes de cada módulo e a tensão do módulo é exatamente a tensão da célula. A corrente produzida pelo efeito fotovoltaico é contínua. Pelas características típicas das células (corrente máxima por volta de 3A e tensão muito baixa, em torno de 0,7V) este arranjo não é utilizado salvo em condições muito especiais.

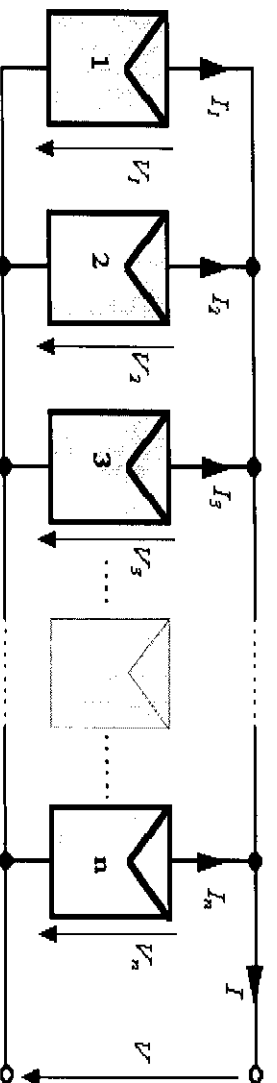


Figura 5. 1 - Conexão de células em paralelo

A conexão mais comum de células fotovoltaicas em módulos é o arranjo em série. Este consiste em agrupar o maior número de células em série onde soma-se a tensão de cada célula chegando a um valor final de 12V o que possibilita a carga de acumuladores (baterias) que também funcionam na faixa dos 12V.

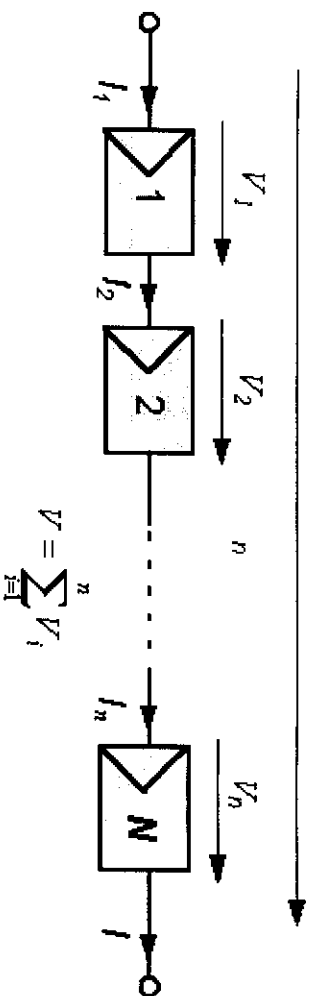


Figura 5.2 - Arranjo das células em série

Quando uma célula fotovoltaica dentro de um módulo, por algum motivo, estiver encoberta a potência de saída do módulo cairá drasticamente que, por estar ligada em série, comprometerá todo o funcionamento das demais células no módulo. Para que todo a corrente de um módulo não seja limitado por uma célula de pior desempenho (o caso de estar encoberta), usa-se um diodo de passo ou de "bypass". Este diodo serve como um caminho alternativo para a corrente e limita a dissipação de calor na célula defeituosa. Geralmente o uso do diodo bypass é feito em agrupamentos de células o que, torna muito mais barato comparado ao custo de se conectar um diodo em cada célula.

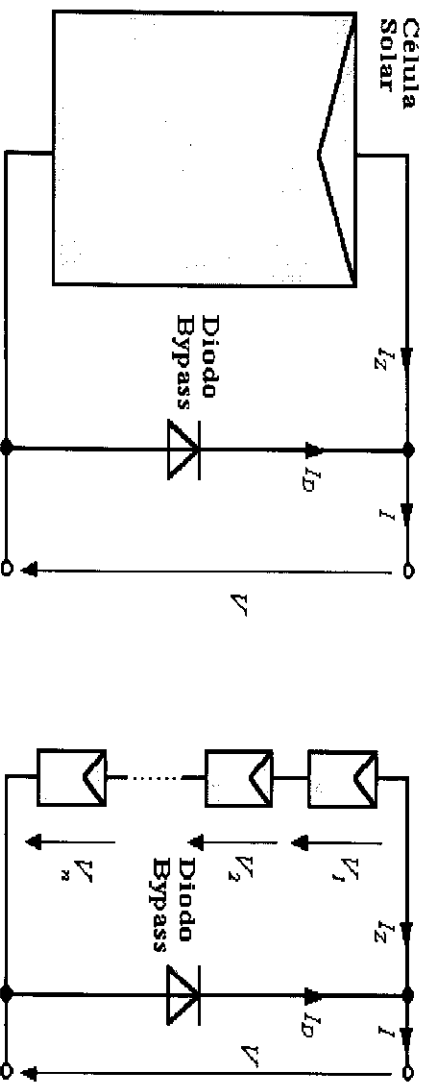


Figura 5.3 - Possível ligação para um diodo bypass entre células

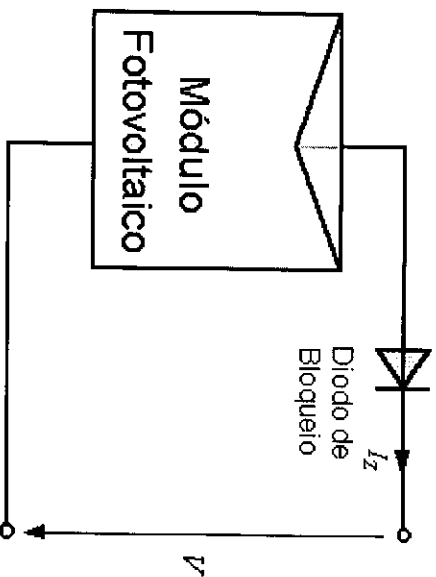


Figura 5.4 - Diodo de bloqueio

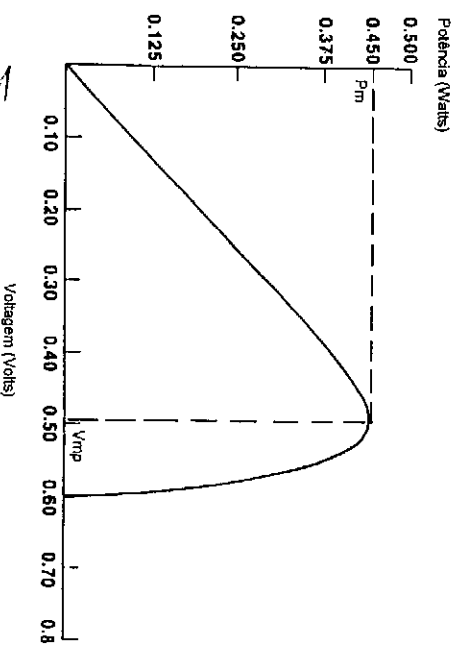
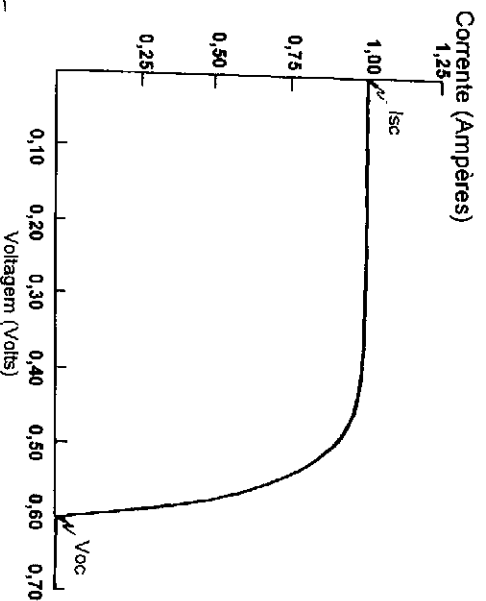
Um outro problema que pode acontecer é quando surge um corrente negativa fluindo pelas células ou seja, ao invés de gerar corrente, o módulo passa a receber muito mais do que produz. Esta corrente pode causar queda na eficiência das células e, em caso mais drástico, a célula pode ser desconectada do arranjo causando assim a perda total do fluxo de energia do módulo. Para evitar esses problemas, usa-se um diodo de bloqueio impedindo assim correntes reversas que podem ocorrer caso liguem o módulo diretamente em um acumulador ou bateria.

Características elétricas dos módulos fotovoltaicos

Geralmente, a potência dos módulos é dada pela potência de pico. Tão necessário quanto este parâmetro, existe outras características elétricas que melhor caracteriza a funcionalidade do módulo. As principais características elétricas dos módulos fotovoltaicos são as seguintes:

- Voltagem de Circuito Aberto (Voc)
- Corrente de Curto Circuito (Isc)
- Potência Máxima (Pm)
- Voltagem de Potência Máxima (Vmp)
- Corrente de Potência Máxima (Imp)

A condição padrão para se obter as curvas características dos módulos é definida para radiação de $1000\text{W}/\text{m}^2$ (radiação recebida na superfície da Terra em dia claro, ao meio dia), e temperatura de 25°C na célula (a eficiência da célula é reduzida com o aumento da temperatura).



Figs.

Figs.

Figura 5.5 - Curva característica IxV mostrando a corrente Isc e a tensão Voc

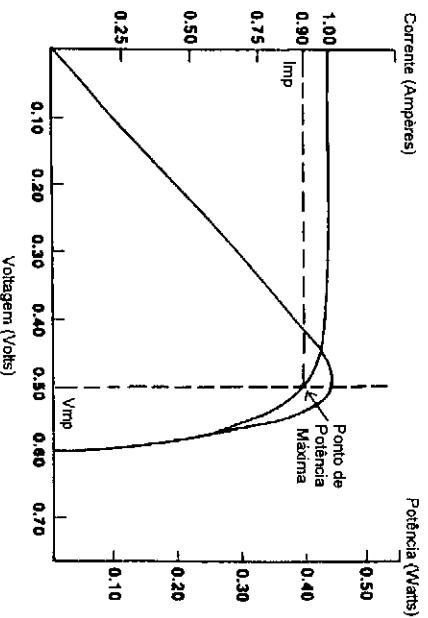


Figura 5.6 - Curva típica de potência versus tens

Figura 5.7 - Parâmetros de potência máxima

Fatores que afetam as características elétricas dos módulos

Os principais fatores que influenciam nas características elétricas de um painel é a *Intensidade Luminosa* e a *Temperatura das Células*. A corrente gerada nos módulos aumenta linearmente com o aumento da Intensidade luminosa. Por outro lado, o aumento da temperatura na célula faz com que a eficiência do módulo caia, abaixando assim os pontos de operação para potência máxima gerada.

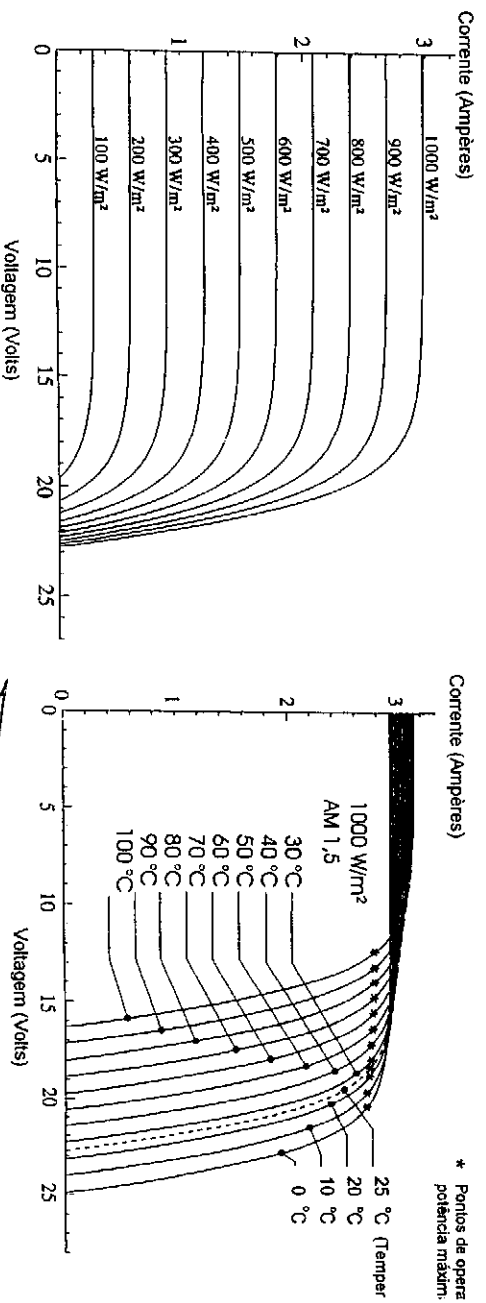


Figura 5.8 - Efeito causado pela variação de intensidade luminosa.

Figura 5.9 - Efeito causado pela temperatura na

Componentes de um sistema fotovoltaico

Um sistema fotovoltaico pode ser classificado em três categorias distintas: sistemas isolados, híbridos e conectados a 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.

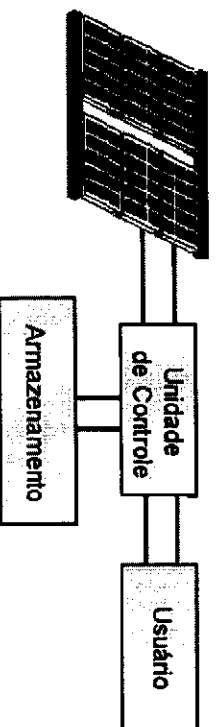


Figura 6.1 - Configuração básica de um sistema fotovoltaico.

Sistemas Isolados

Sistemas isolados, em geral, utiliza-se alguma forma de armazenamento de energia. Este armazenamento pode ser feito através de baterias, quando se deseja utilizar aparelhos elétricos ou armazenar-se na forma de energia gravitacional quando se bombeia água para tanques em sistemas de abastecimento. Alguns sistemas isolados não necessitam de armazenamento, o que é o caso da irrigação onde toda a água bombeada é diretamente consumida ou estocadas em reservatórios.

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

Para alimentação de equipamentos de corrente alternada (CA) é necessário um inversor. Este dispositivo geralmente incorpora um seguidor de ponto de máxima potência necessário para otimização da potência final produzida. Este sistema é usado quando se deseja mais conforto na utilização de eletrodomésticos convencionais.

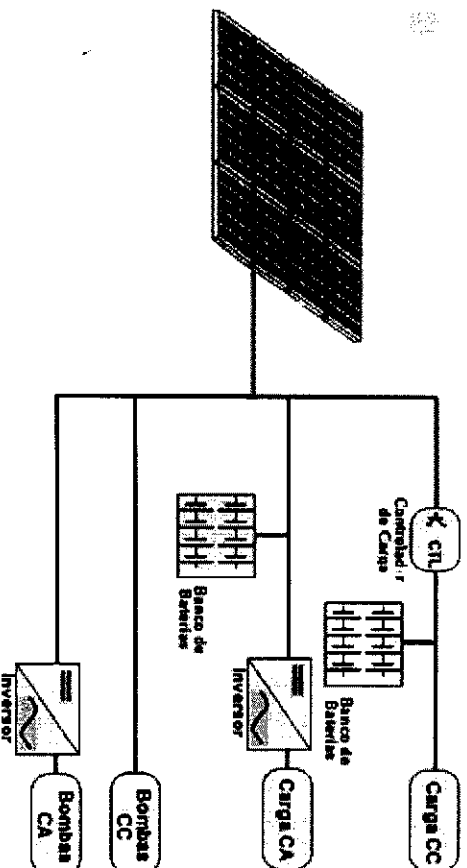


Figura - Diagrama de sistemas fotovoltaicos em função da carga utilizada.

⇒ *Mat. e Métodos.*

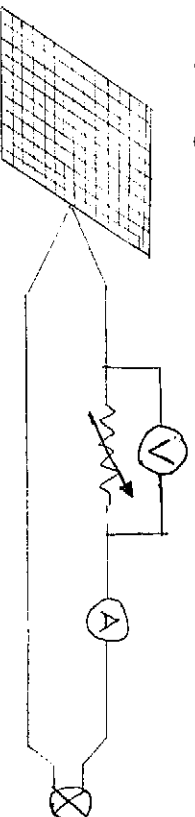
Material usado:

- Painel solar
- Multímetro
- Voltímetro
- Cabos para ligação
- Lâmpada de potência 7 watt, tensão de 12 volt
- Reostato {resistência variável}

Procedimento

Montamos o circuito do esquema representado na figura abaixo.

Em intervalos de tempo de dez minutos foi-se variando a resistência até ao máximo possível de modo a obter-se maior número das variações possíveis, e para cada variação registava-se os valores da corrente e da voltagem numa tabela.



Tabelas de dados experimentais

I{A}	0.74	0.68	0.64	0.54	0.44	0.36	0.29	0.25	0.22	0.21	0.21
V{V}	0	6	9	11.5	13.0	15.0	16.15	17.5	17.5	17.5	17.5

I{A}	0.75	0.72	0.70	0.69	0.65	0.54	0.43	0.35	0.29	0.26	0.23	0.22	0.21
V{V}	0	4	6	7	9	11	14	15	16	17	17	17	17

I{A}	0.73	0.63	0.60	0.50	0.43	0.39	0.32	0.29	0.26	0.24	0.22	0.21	0.20
V{V}	0	4.9	8.8	12.0	13.3	14.0	14.1	15.8	16.2	16.5	17.0	17.1	17.2

I{A}	0.70	0.64	0.51	0.45	0.41	0.38	0.35	0.30	0.27	0.25	0.24	0.22	0.21
V{V}	0	11.3	12.5	13.4	13.9	14.5	15.6	17.0	17.2	17.6	17.8	18.0	18.2

I{A}	0.70	0.65	0.64	0.60	0.52	0.50	0.44	0.38	0.36	0.32	0.30
V{V}	0	2.3	6	8.9	11.1	11.5	12.8	14.0	14.2	14.5	14.9

* Gráficos Derivativos ?

Conclusão:

De acordo com os registros feitos ao longo da experiência conclui-se a partir dos gráficos da Curva Característica I x V, que os mesmos registros contradizem com os resultados teóricos. Pois conforme a teoria era de esperar que depois dum maior valor da tensão a intensidade de corrente sofreria uma queda até ao valor zero.

Referências bibliográficas :

- 1) PALZ, Wolfgang. *Energia Solar e fontes alternativas*. São Paulo: Hemus Livraria Editora Ltda, 1981.
 - 2) BEZERRA, Arnaldo Moura. *Aplicações Térmicas da Energia Solar*. 4ª ed. João Pessoa: Editora UFPB, 2000.
 - 3) FRAIDENRAICH, Naum & Lyra, Francisco. *Energia Solar fundamentos e tecnologias de conversão heliotérmica e fotovoltaica*. Recife: Editora Universitária da UFPE, 1995.
 - 4) LUIZ, Adir M. *Como Aproveitar a Energia Solar*. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 1985.
 - 5) COMETTA, Emilio. *Energia Solar utilização e empregos práticos*. São Paulo: Editora Hemus Editora Ltda
 - 6*) Aplicações Térmicas da Energia Solar - Quarta Edição - 2001, Editora Universitária - UFPB
 - 7*) Sistema Solar para Aquecimento de Água Residencial - Publicação n° 21 - 1997. Editora Universitária - UFPB
 - 8*) Energia Solar - Aquecedores de Água - Curitiba - 1982. o Editora Livraria Itaipú Ltda. - Curitiba
 - 9*) Aplicações Práticas da Energia Solar - São Paulo - 1990 - Esgotado, Editora Nobel S.A - SP
- *) Materia constante da internet.
- HECKTHEUER, L. e KRENNZINGER, A. *Medição da Curva Característica I-V de Módulos Fotovoltaicos*. X Congresso Ibérico de Energia Solar e V Congresso Ibero-Americano de Energia Solar - NUTAU'2000, v. CD-ROM, São Paulo SP, 2000.



I (A)	V(V)
0.74	0
0.68	6
0.64	9
0.54	11.5
0.44	13
0.36	15
0.29	16
0.25	17.5
0.23	17.5
0.21	17.5
0.21	17.5

I (A)	V(V)
0.75	0
0.72	4
0.7	6
0.69	7
0.65	9
0.54	11
0.43	14
0.35	15
0.29	16
0.26	17
0.23	17
0.22	17
0.21	17
0.21	17

I (A)	V (V)
0	0
0.73	4.9
0.63	8.8
0.6	12.0
0.5	13.3
0.43	14
0.39	14.1
0.32	15.8
0.29	16.2
0.26	16.5
0.24	17
0.22	17.1
0.21	17.2
0.2	17.5
0.2	17.5

I (A)	V (V)
0.7	0
0.64	4.1
0.51	11.3
0.45	1205
0.41	13.4
0.38	13.9
0.35	14.5
0.3	15.6
0.27	17
0.25	17.2
0.24	17.6
0.23	17.8
0.22	18
0.21	18.2
0.2	18.5

I (A)	V (V)
0.7	0
0.65	2.3
0.64	6
0.6	8.9
0.52	11.1
0.5	11.5
0.44	12.8
0.38	14
0.36	14.2
0.32	14.5
0.3	14.9
0.29	15.8
0.27	16
0.26	16.2
0.24	16.6
0.21	17
0.22	17
0.2	17.1
0.2	17.3
0.2	17.5

Gráfico da Curva Característica da I x V

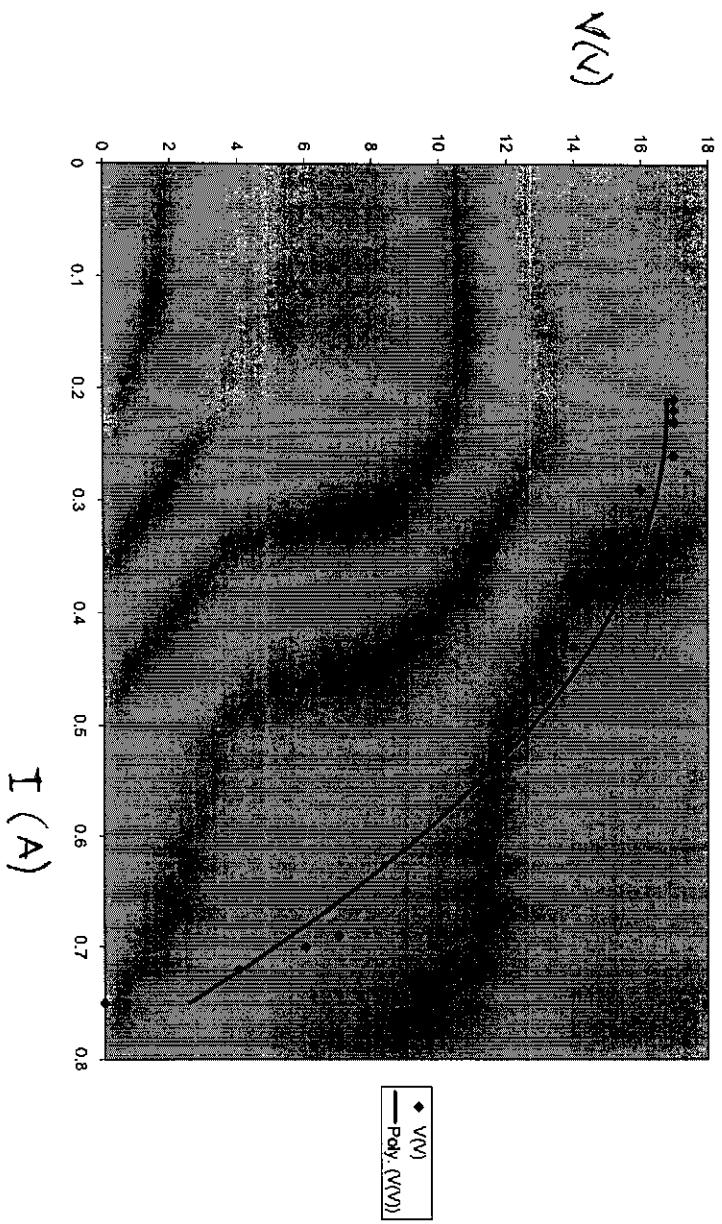


Gráfico da Curva Característica I x V

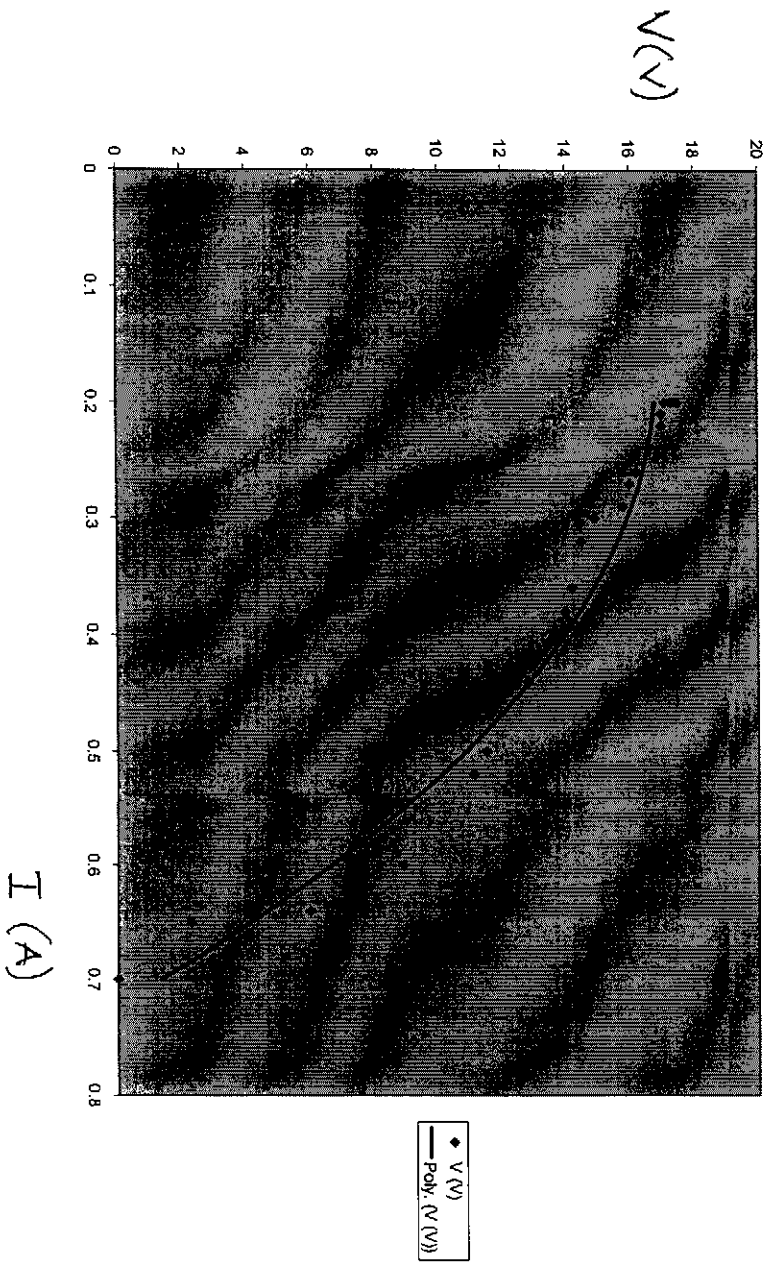


Gráfico da Curva Característica I x V

