



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE (UEM)
FACULDADE DE CIÊNCIAS DEPARTAMENTO DE FÍSICA

ENERGIAS RENOVAVEIS

$I \times V$ CURVA CARACTERÍSTICA U x I DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Docentes : Prof. Dr. B. CUAMBA

Dr. Ataíde

Discente : Unguana, João Silva

Maputo, Novembro de 2004

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, agropastoris, 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*.

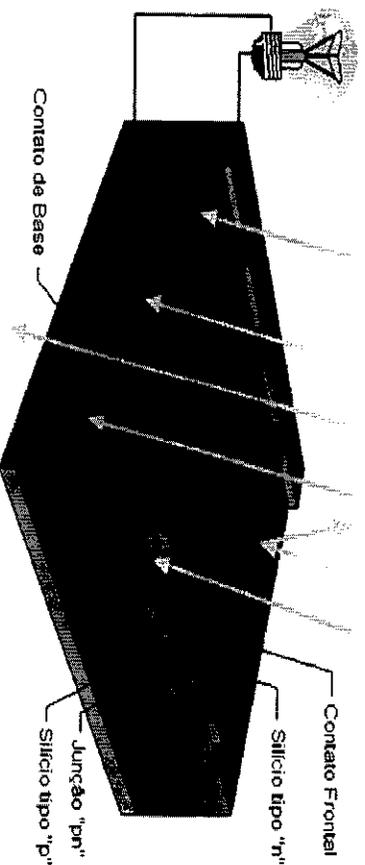


Figura 1. - Corte transversal de uma célula fotovoltaica

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

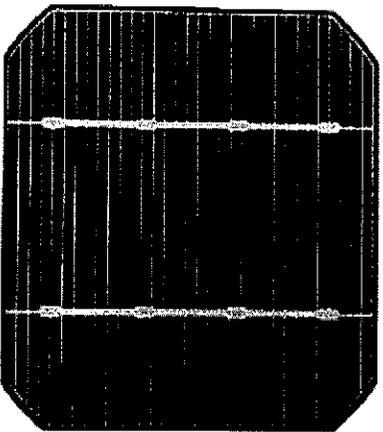


Figura 2. - Célula de silício monocristalino

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 300µm.

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

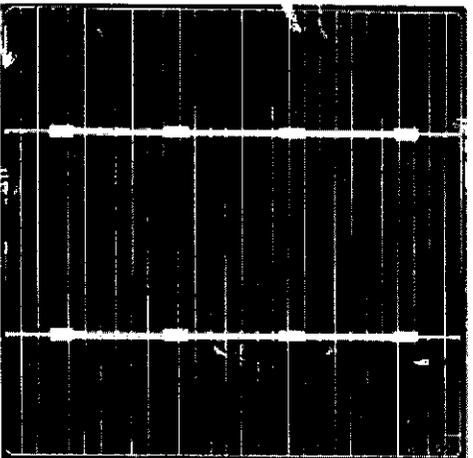


Figura 3. - Célula de silício policristalino

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.

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

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, rouloletes

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 electrodomésticos utiliza a corrente alternada.

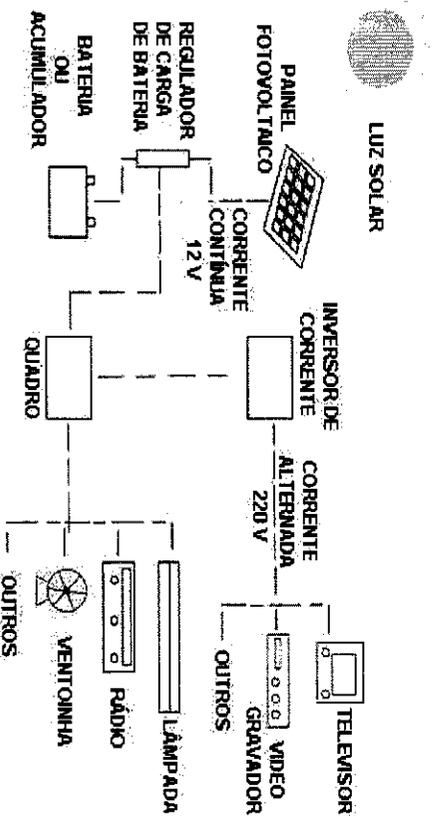


Figura 4.-Esquema ilustrativo dum sistema.

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 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.

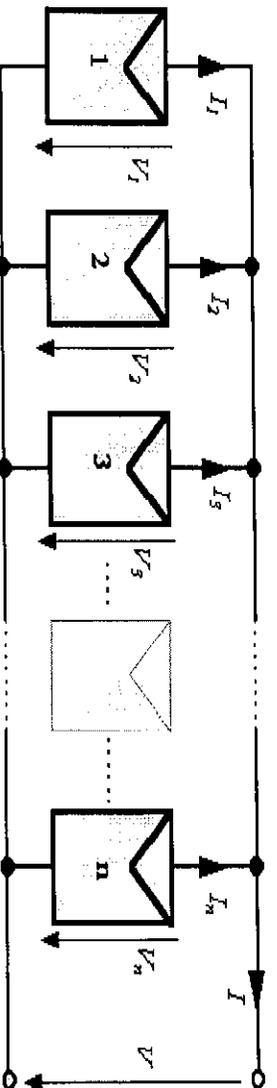


Figura 5.1 - Conexão de células em paralelo

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.

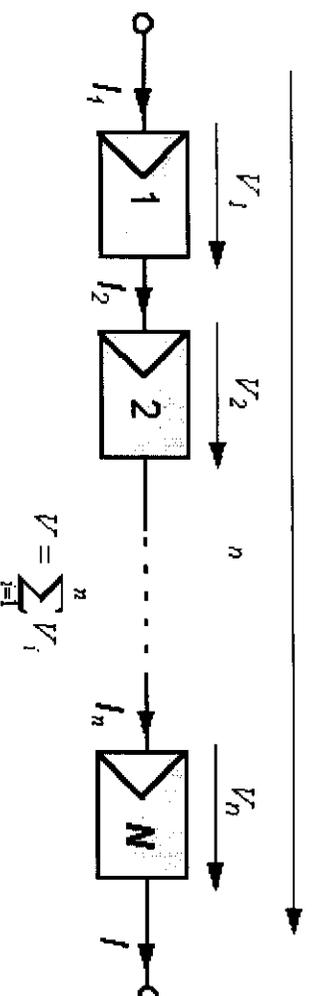


Figura 5.2 - Arranjo das células em série

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.

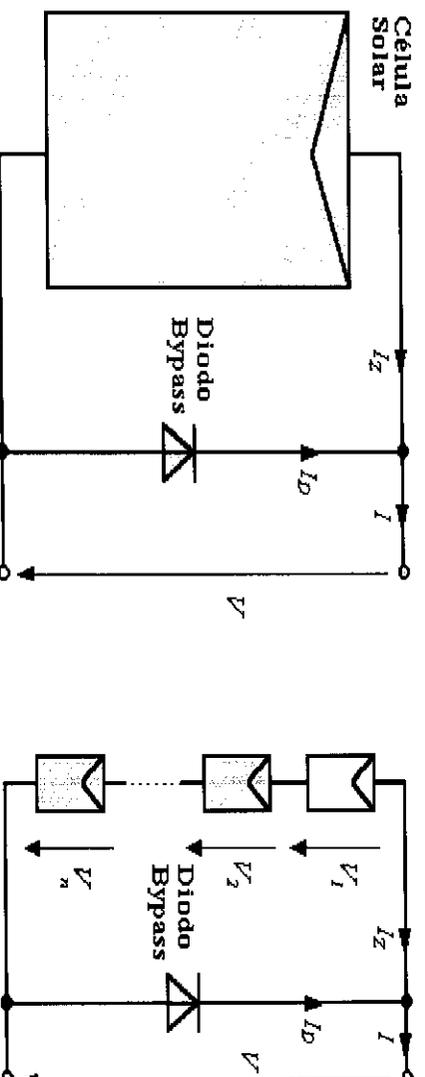


Figura 5.3 - Possível ligação para um diodo bypass entre células

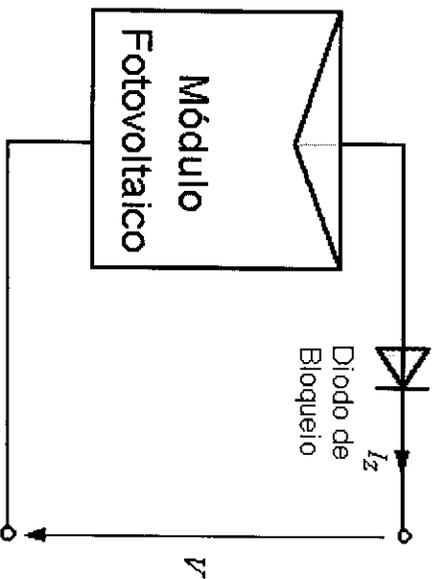


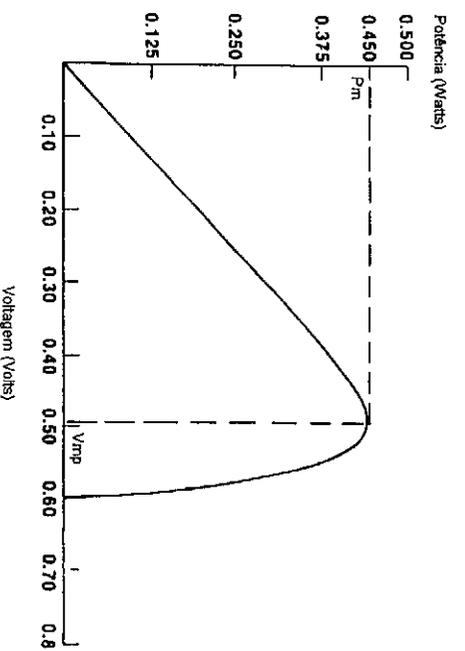
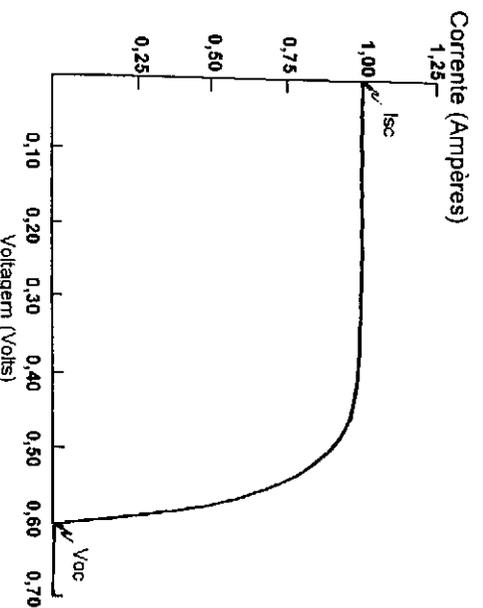
Figura 5.4 - Diodo de bloqueio

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

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



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 desconecta 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.

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

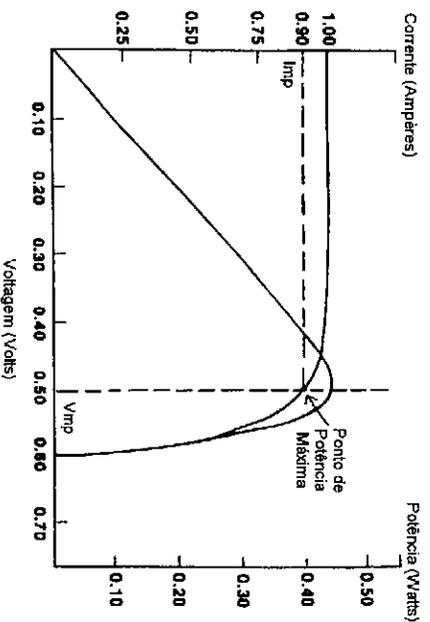
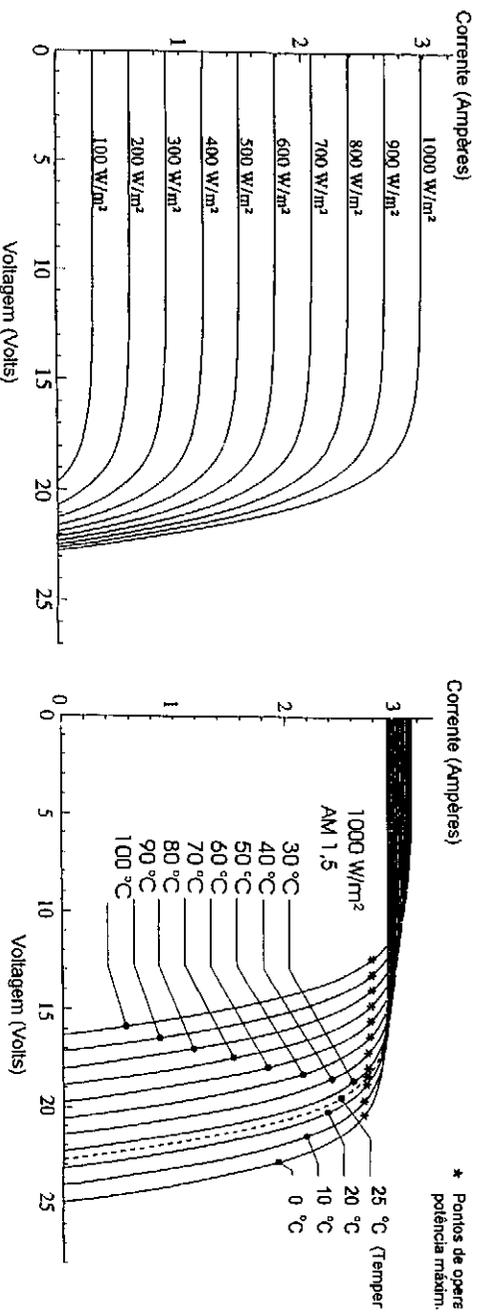


Figura 5.6 - Curva típica de potência versus tens

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.

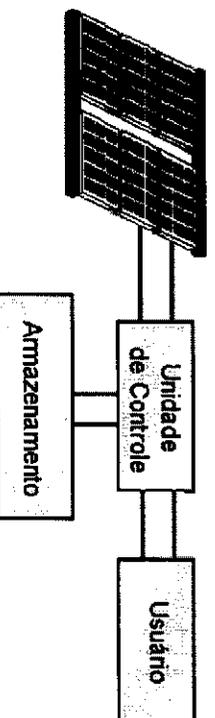


Figura 6.1 - Configuração básica de um sistema fotovoltaico.

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.

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

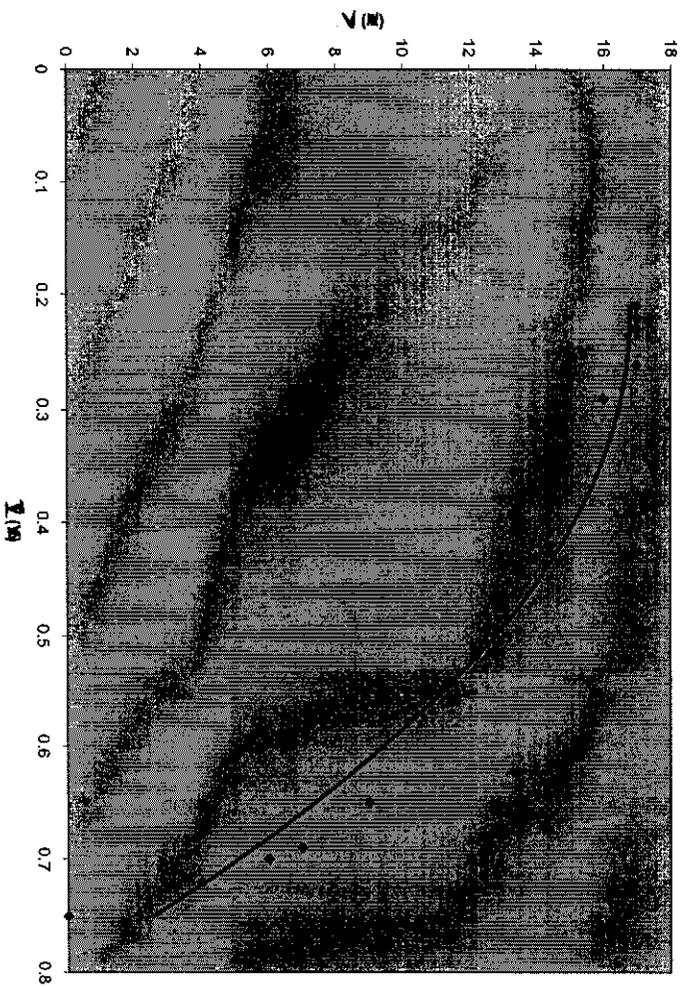
I (A)	V(V)
0.75	0
0.72	4
0.7	6
0.69	7
0.65	9
0.54	11
0.43	14
0.35	15
0.29	16
0.26	17
0.23	17
0.22	17
0.21	17
0.21	17

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	12.05
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

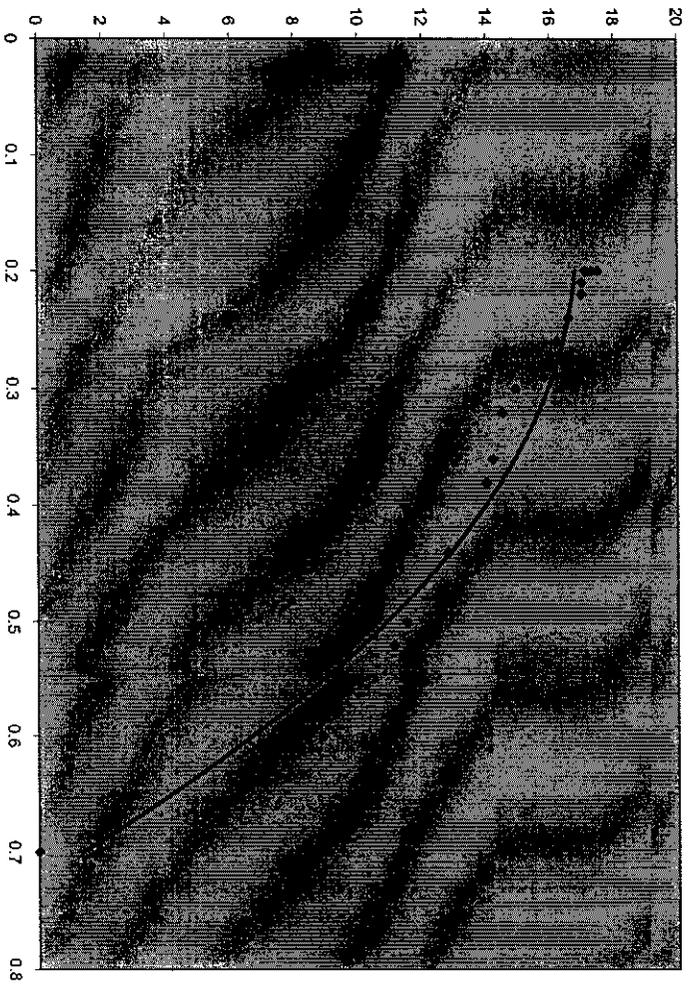
I (A)	V (V)
0.7	0
0.65	2.3
0.64	6
0.6	8.9
0.52	11.1
0.5	11.5
0.44	12.8
0.38	14
0.36	14.2
0.32	14.5
0.3	14.9
0.29	15.8
0.27	16
0.26	16.2
0.24	16.6
0.21	17
0.22	17
0.2	17.1
0.2	17.3
0.2	17.5

Gráfico da Curva Característica da I x V



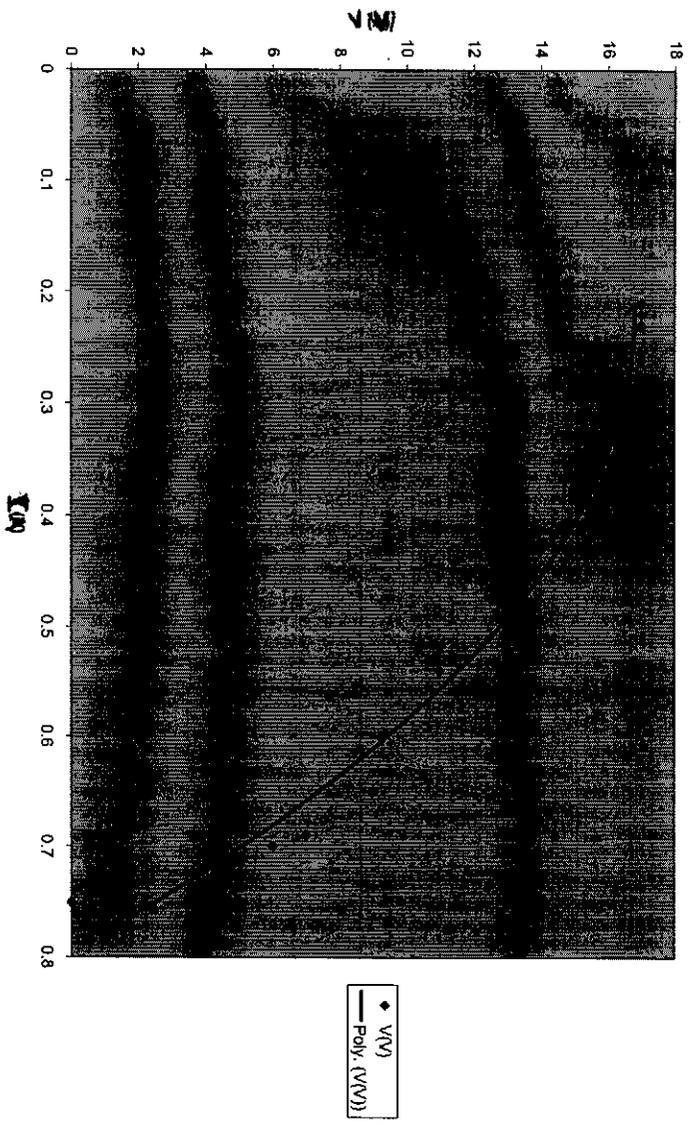
◆ V (V)
— Poly. (V (V))

Gráfico da Curva Característica I x V



◆ V (V)
— Poly. (V (V))

Gráfico da Curva Característica I x V



REFERÊNCIAS bibliográfica

- [1] Anonymus. (1992). Padrão de Índio - Fogão Solar - (3 Partes) É 13429. Agência de Padrões Índios, Delhi Novo.
- [2] Medo P.A. (1999). Avaliando o procedimento de norma internacional por testar fogões solares e resultados informando. *Energia 68 solar (1): 1-7*
- [3] Mullick S.C., Kandpal T.C. e Saxena A.K. (1987). Procedimento de teste térmico para caixa-tipo fogões solares. *Energia 39 solar (4): 353-360.*