

UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE

FACULDADE DE CIÊNCIAS

Departamento de Física

Curso de Física Aplicada

Exame de estado

Estudo de factores que influenciam no funcionamento das
células solares

Autor: Ubisse, Bartolomeu Joaquim

2010

Aos meus pais Joaquim Ubisse e Celeste Macondzo, cujo amor
e determinação renovam diariamente a minha pessoa.

AGRADECIMENTOS

O meu primeiro agradecimento vai a Deus, o responsável de todas as transformações que originaram e que ainda garantem a viabilidade da espécie humana no planeta Terra, do qual eu também faço parte.

A todos os docentes do Departamento de Física pela forma excelente de transmissão e monitorização da ciência.

Ao professor Doutor Cuamba, pela simpatia, paciência e forma objectiva de ensino.

Ao Doutor Chea, pela flexibilidade e criatividade na abordagem de assuntos científicos.

Aos Eng^os Matusse, Jordão e Muxlhanga, Rogério pela colaboração prestada.

Por último, mas não menos importante, agradeço aos meus colegas e também grandes amigos, pelo excelente ambiente de estudo que me proporcionaram, através da sua amizade e colaboração, em especial ao Alberto, Leovigildo; Valoi, Enfraime; Simão, Fabião; Picardo, Sandra; Mondlane, Gracinda; Tingote, Cláudio; Nélio João; Timane, Hérmen; Cornélio de Jesus e Chilaule, Sérgio.

Bem haja a todos eles e aos que, para não me alongar não mencionei mas, nem por isso foram esquecidos.

DECLARAÇÃO DE HONRA

Declaro que este trabalho nunca foi apresentado para a obtenção de qualquer grau acadêmico e que ele constitui resultado da minha pesquisa.

.....
(Bartolomeu J. Ubisse)

RESUMO

O presente trabalho tem como tema estudo de factores que influenciam no funcionamento das células solares. Com base nos modelos matemáticos conseguiu-se analisar a influência da temperatura, irradiância, resistências série e paralela no desempenho das células solares. A redução da irradiância solar tem maior impacto no decréscimo da corrente de curto-circuito e a temperatura influencia grandemente na redução da tensão do circuito aberto. As resistências não modificam tanto na corrente de curto-circuito né m na tensão do circuito aberto, porém, causam um decréscimo no ponto de máxima potência e do factor de forma.

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura: 2.1 Destinação de materiais em função de bandas energéticas.....	2
Figura: 2.2. Estrutura de uma junção pn	5
Figura: 2.3 Funcionamento de uma célula solar.....	7
Figura: 2.4 Eficiência das células solares em função da altura da banda proibida para várias condições de iluminação.....	8
Figura:2.5 Célula de silício monocristalino.....	9
Figura:2.6 Célula de silício policristalino.....	10
Figura:2.7 Célula de silício amorfo.....	11
Figura: 2.8 Encapsulamento de uma célula solar.....	13
Figura: 2.9 Circuito equivalente de uma célula solar ideal.....	14
Figura: 2.10 Curva I-V de uma célula solar.....	15
Figura: 2.11 Circuito equivalente de uma célula solar.....	16
Figura: 4.1 Influência da irradiância solar no funcionamento de uma célula solar.....	22
Figura: 4.2 Influência da temperatura no funcionamento das células solares.....	22
Figura: 4.3 Efeito da resistência paralela.....	23
Figura: 4.4 Efeito da resistência série no funcionamento das células solares.....	24

LISTA DE TABELAS

Tabela: 3.1 Características do módulo fotovoltaico Shell SM100 – 12.....	20
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS

BC	Banda de condução
BV	Banda de valência
BG	Banda proibida
E_c	Energia da banda de condução
E_v	Energia da banda de valência
E_g	Energia da banda proibida
NOCT	Temperatura de operação nominal da célula
STC	Condições normais de teste
I_f	Fotocorrente
I_D	Corrente do díodo
I_o	Corrente de saturação do díodo
m	Factor de idealidade do díodo
V_{oc}	Tensão do circuito aberto
I_{sc}	Corrente de curto-circuíto

Índice

Agradecimentos	ii
Declaração de Honra.....	iii
Resumo.....	iv
Lista de figuras e tabelas.....	v
Lista de abreviaturas	vi
1.Introdução	1
1.1 Objectivos do trabalho	1
2. Fundamentos teóricos	2
2.1. Destinação de semicondutores de outros materiais.....	2
2.2 Célula solar e efeito fotoeléctrico.....	6
2.2.1 Tipos de células solares	7
2.3 Modo de funcionamento de uma célula solar.....	11
3.Método	20
4.Resultados	22
5. Considerações finais e recomendações	25
5.1 Considerações finais.....	25
5.2 Recomendações	25
6. Referências bibliográficas.....	26

1.Introdução

As células solares são dispositivos semicondutores que fazem a conversão directa da radiação solar em electricidade basendo-se no efeito fotovoltaico. Entretanto, por motivo de serem sujeitas a diferentes condições quer de natureza ambiental quer tecnológicas, elas acabam tendo variabilidades na quantidade de electricidade que fornecem.

Com aplicação de modelos matemáticos decorridos de circuitos equivalentes as células solares, analisa-se o comportamento das curvas I-V da célula de um módulo fotovoltaico Shell SM100-12, de modo a demonstrar-se a variação das suas características quando forem expostas a diferentes condições de irradiância, temperatura, resistência série e paralela.

1.1 Objectivos do trabalho

1.1.1 Objectivo geral

- Estudar o comportamento de uma célula solar perante a variação da irradiância solar, temperatura, resistência série e resistência paralela.

1.1.2 Objectivos específicos

- Descrever a física de uma célula solar;
- Estudar os modelos de uma célula solar e formular algoritmos matemáticos que permitem analisar os seus parâmetros de saída;
- Estudar os modelos matemáticos que possibilitam obter com base nas características de um módulo solar as características de uma célula.

2. Fundamentos teóricos

2.1. Destinação de semicondutores de outros materiais

Toda a matéria que envolve o mundo é resultado de diferentes rearranjos de átomos. Os átomos quando ligam-se entre si formam uma cadeia complexa de substâncias com estados e propriedades bem diferentes.

Os átomos que compõem as substâncias possuem electrões em níveis energéticos (orbitais) bem definidos, entretanto, quando esses átomos formam um sólido os níveis energéticos de cada átomo sofrem influências dos níveis dos átomos vizinhos e, por conseguinte, ocorre o alargamento de níveis energéticos, isto é, surgem bandas energéticas (Agnaldo, 2005).

Segundo Agnaldo (2005), a quantidade de bandas é bem elevada visto que cada uma resulta de alargamento de um só nível. Entretanto, duas só bandas são importante para a classificação das substâncias em conductores, semicondutores e isoladores.

A primeira chama-se banda de valência (BV) e, decorre de níveis de electrões de valência. A segunda denomina-se banda de condução (BC) e resulta do alargamento do primeiro estado excitado. A diferença entre o nível mais baixo da BC e o nível mais alto da BV corresponde a uma faixa que se designa de banda proibida (E_g) e, é assim chamada devido ao facto de nesta região não existir nenhum estado quântico (Agnaldo, 2005 e Green, 2001). A fig.2.1 ilustra a classificação dos materiais em função da concepção de bandas.

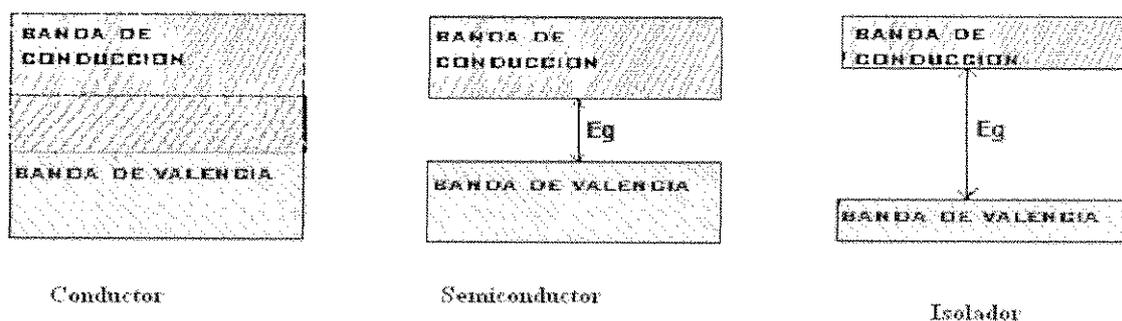


Figura 2.1: Destinação de materiais em função de bandas energéticas.

Fonte: Ramos, 2006

Nos conductores (metais) as bandas (BV e BC) estão sobrepostas e, a banda de valência é maior que a de condução.

Nos semicondutores e isoladores as bandas (BV e BC) encontram-se separados por um espaço correspondente a banda proibida (ver a fig.2.1). Entretanto, nos semicondutores a banda proibida é relativamente menor com vista a permitir excitações térmicas de electrões a temperatura de 300K (Sapoval e Hermann, 1995).

Para além de bandas energéticas, as substâncias também podem ser classificadas baseando-se em seus valores de condutibilidade eléctrica (Agnaldo, 2005).

- Conductores se $\sigma \sim 10^6 - 10^4 \Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$;
- Semicondutores se $\sigma \sim 10^3 - 10^{-9} \Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$;
- Isoladores se $\sigma \sim 10^{-10} - 10^{-22} \Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$

Os semicondutores são substâncias que se encontram entre conductores e isoladores sob ponto de vista da condutibilidade eléctrica e, a uma temperatura de zero absoluto ($T=0 \text{ K}$) apresentam propriedades isoladoras.

Os semicondutores podem se encontrar no estado puro em que apresentam uma quantidade de impurezas e defeitos desprezíveis. No entanto, devido a necessidade de se melhorar as suas propriedades eléctricas, certas impurezas são implantadas nos semicondutores inicialmente puros tornando-se desse modo extrínsecos.

2.1.1. Semicondutores intrínseco e extrínseco

Um semiconductor intrínseco é aquele que se encontra em estado puro ou, com defeitos e impurezas em quantidades desprezíveis (Pierret, 1989). Neste tipo de semiconductors, durante a excitação térmica a concentração dos electrões (n) é igual à concentração das lacunas (p) uma vez que quando o electrão passa para a banda de condução deixa a sua correspondente lacuna na banda de valência (Matos, 2006). Portanto, num semiconductor intrínseco verifica-se a seguinte relação:

$$n = p = n_i \quad (\text{eq.2.1})$$

Sendo:

n – concentração de electrões;

p – concentração de lacunas;

n_i - concentração intrínseca.

Quando um semiconductor possui impurezas em quantidades consideráveis, ele deixa de ser intrínseco e passa a ser extrínseco (Matos, 2006). A necessidade de se implantar (dopar) átomos de um dado elemento (impurezas) a um semiconductor visa a aumentar de uma forma controlada a concentração de portadores de carga e, conseqüentemente melhorar a condutibilidade eléctrica do semiconductor.

Dependendo do tipo de impureza implantada, o semiconductor pode ser do tipo “n” ou do tipo “p” se a impureza for respectivamente doadora ou aceitadora.

Uma impureza é doadora quando comparativamente ao elemento que constitui a rede do semiconductor intrínseco possui um electrão a mais (por exemplo, o fósforo quando implantado no silício). Esta impureza quando implantada neste tipo de semiconductor faz com que apareça um nível de energia dentro da banda proibida perto do nível mais baixo da banda de condução (Melcher, 1997). Esse nível local denomina-se nível doador e, é repleto de electrões daí que a impureza tem o nome de doadora e contribui num acréscimo à concentração dos electrões.

$$n = p + N_D \quad (\text{eq. 2.2})$$

Sendo assim, o semiconductor cujos portadores maioritários de carga são os electrões denomina-se semiconductor do tipo **n**.

Um semiconductor é do tipo **p** se o material dopante possui um electrão a menos (por exemplo o Boro quando implantado num semiconductor de silício). Quando essa impureza for implantada num material semiconductor, apenas $j-1$ electrões do átomo (em que j é a quantidade de electrões na última capa electrônica) que compõe a rede do semiconductor estarão ligados com os da impureza, restando um sem emparelhamento. A presença do electrão não emparelhado faz com

que se arranque um electrão dos átomos vizinhos da banda de valência deixando deste modo uma lacuna nesta banda (Green, 2001 e Buch, s.d.). Impureza desse género chama-se aceitadora e, permite com que apareça um nível local na região da banda proibida mais próximo do último nível da banda de valência.

Como os portadores maioritários são as lacunas, então:

$$p = n + N_A \quad (\text{eq. 2.3})$$

Junção PN

A junção PN decorre da união de dois materiais semiconductores, um do tipo “p” e outro do tipo “n” (Sedra e Smith, 2000). A fig. 2.2 ilustra uma junção p-n.

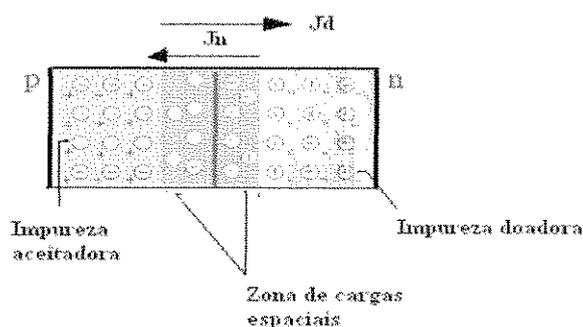


Figura: 2.2. Estrutura de uma junção pn

Fonte: Adaptado em Abreu, 2006

Quando as faces dos dois materiais entram em contacto, ocorre logo a difusão dos portadores de carga, isto é, os electrões livres na região “n” atravessam para o lado da região “p” e as lacunas da região “p” também passam para a região “n” (Cuamba, 1996 e Melcher, 1997). Essa difusão de portadores de carga dá origem a uma corrente de difusão (J_D).

Quando os portadores de cargas saiem de uma região para outra, os iões aceitadores negativos na região p e os iões doadores positivos na região n ficam não neutralizados e, isso faz com que nas bordas da junção surjam cargas espaciais e por conseguinte um campo eléctrico.

O campo eléctrico que surge resulta uma corrente de deriva (J_e) que contrabalança a corrente de difusão (J_D) até se estabelecer o equilíbrio. Durante o equilíbrio, a corrente na junção torna-se nula (Swart, s.d) e o campo eléctrico na junção tem a seguinte expressão:

$$E = -\frac{KT}{q} \frac{1}{n} \nabla n \quad (eq.2.4)$$

Integrando- se o campo eléctrico obtém-se a tensão sobre a junção PN (Swart,s.d).

$$V = \frac{KT}{q} \ln \frac{n_n}{n_p} \quad (eq.2.5)$$

2.2 Célula solar e efeito fotoeléctrico

A célula solar é uma junção p-n que transforma a radiação solar em energia eléctrica (Abreu, 2006).

Quando fotões com energia igual ou maior que a da banda proibida incidem sobre a junção PN ocorre a geração de par electrão – lacuna (Cumbane, 1994 e Matos, 2006). O electrão quando ganha a energia transmitida pelo fotão, transita para a banda de condução deixando deste modo uma lacuna na banda de valência.

O electrão quando chega na banda de condução é atirado para o material do tipo “n” uma vez que a zona de depleção funciona como um dipolo. Fenómeno análogo acontece para a lacuna na banda de valência que também é atirado para a região do tipo “p” evitando-se deste modo a recombinação e, em virtude disso, a concentração de portadores de carga em ambas regiões aumenta (Matos, 2006). Quando se liga contactos metálicos nas extremidades dessas regiões recolhe-se a corrente gerada pela célula, como ilustrado na fig. 2.3.

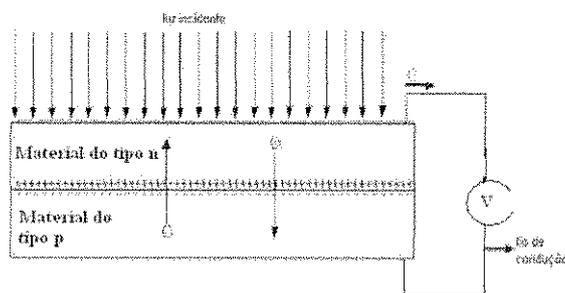


Figura 2.3: Funcionamento de uma célula solar

Fonte: Adaptado em Abreu, 2006

2.2.1 Tipos de células solares

As células solares são diferenciadas tendo-se em consideração o material semiconductor utilizado e os processos tecnológicos de fabricação (Ramos, 2006).

Segundo Cuamba (1996), existem vários materiais semicondutores mas, nem todos são aplicados para o fabrico das células solares. O primeiro parâmetro relevante para se escolher um dado material para o fabrico das células solares é a magnitude da sua banda proibida. Quanto maior for a banda proibida maior é a tensão do circuito aberto da célula. Entretanto, não é conveniente usar-se o material com maior banda proibida possível visto que, esse material absorve menor fracção da radiação solar e, por conseguinte, fornece menor corrente. Sendo assim, os materiais semicondutores usados para o fabrico das células solares são aqueles que possuem magnitudes de bandas proibidas óptimas que permitem com que as células solares tenham maior eficiência possível como é o caso de silício, arsenito de gálio e mais outros ilustrados na fig.2.4.

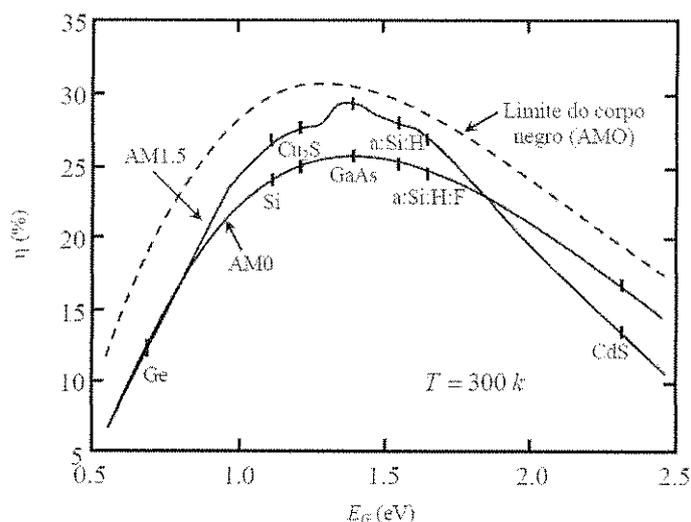


Figura:2.4 Eficiências das células solares em função da altura da banda proibida para várias condições de iluminação

Fonte: Adaptado em Green, 1998

É de notar que a maioria das células solares são feitas de silício uma vez que esse material possui uma boa eficiência e ainda mais é abundante na crosta terrestre. As células solares feitas de silício subdividem-se em três categorias que são:

- Monocristais;
- Policristais e
- Amorfos.

i) Células de silício monocristalino

As células de silício monocristalino são as mais eficientes (com o rendimento que varia de 15 a 18%) e constituem a base da produção de 80% dos módulos solares comercializados (Shayani, 2006). Essas células são fabricadas tendo – se como matéria prima uma barra de silício monocristalino obtida por vários métodos (Czochralski, float-zone e ribbon-growth) com maior destaque o método de Czochralski (Shayani, 2006).

O método Czochralski consiste na fusão e purificação do silício bruto em um cadinho (Vaso metálico ou de material refratário onde ocorre a fusão de materiais) e, com auxílio de uma semente do cristal que é mergulhada no cadinho com o silício líquido, retira – se lentamente a

semente para cima, fazendo – se com que uma estrutura cilíndrica monocristalina solidifique - se à medida em que a semente é erguida.

Segundo Shayani (2006), o método de obtenção do silício monocristalino envolve o consumo de maior energia eléctrica uma vez que as temperaturas atingidas são de ordem de 1400°C , porém, as células feitas desse material possuem maior eficiência possível.

A fig. 2.5 ilustra a composição de uma célula de silício monocristalino.

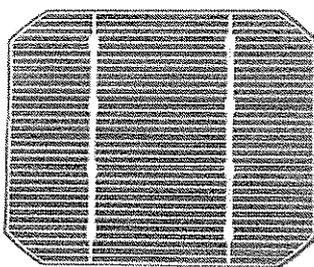


Figura:2.5 Célula de silício monocristalino

Fonte: Ramos, 2006

ii) Células de silício policristalino

As células de silício monocristalino são produzidas a partir de blocos de silício obtidos por fusão de silício puro em moldes especiais. Nos moldes o silício solidifica-se por meio do esfriamento lento e, devido a esse processo, os átomos não se organizam num único cristal mas sim, formam uma estrutura policristalina com superfícies de separação entre os cristais (Nascimento, 2004). As células de silício policristalino apresentam uma eficiência menor que a das células de silício monocristalino, isto é, tem uma eficiência de 12 a 14%. A fig.2.6 ilustra uma célula de silício policristalino.

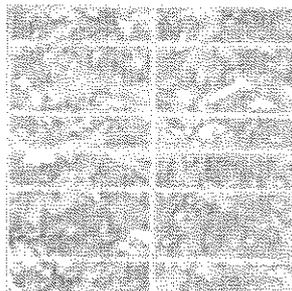


Figura:2.6 Célula de silício policristalino

Fonte: Nascimento, 2004

iii) Células de silício amorfo

As células de silício amorfo são aquelas que se obtém por meio da deposição de camadas finas de silício sobre superfícies de vidro ou metal. O silício amorfo não forma uma estrutura regular de cristal daí que, ocorrem ligações livres que absorvem hidrogénio até à saturação.

Segundo Ramos (2006), as células de silício amorfo são produzidas em estruturas p-i-n onde, a camada intrínseca “i” é depositada entre a camada p e a camada n com vista a se aumentar o número de portadores de carga e melhorar-se a conversão fotovoltaica.

Os contactos eléctricos são depositados por evaporação térmica reactiva em vácuo, na forma de uma película transparente de óxido de índio e estanho, após a deposição das camadas p, i e n.

A eficiência das células de silício amorfo é muito mais baixa comparativamente com as do silício mono e policristalino e, varia entre 5% e 7% (Ramos, 2006). A fig. 2.7 mostra a estrutura de uma célula de silício amorfo.

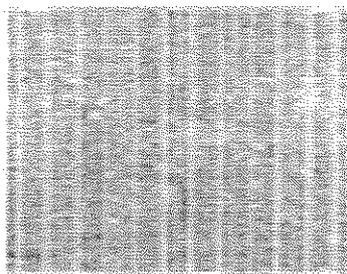


Figura:2.7 Célula de silício amorfo

Fonte: Ramos, 2006

2.2.2 Encapsulamento das células solares

As células solares são sujeitas a diferentes condições externas quer de natureza mecânica tanto como atmosféricas, pelo que, o seu fabrico inclui um processo de encapsulamento que visa a protege-las dessas condições (tensões mecânicas, poeiras e humidade).

Para se estabilizar a estrutura de uma célula solar aplica-se o material de encapsulamento a um substrato que, geralmente tem sido o vidro, plástico acrílico, metal ou folheados de plástico (GREENPRO, 2004).

Uma vez que a quantidade da electricidade gerada por uma célula solar é função da irradiância solar, a cobertura do lado sensível à luz é feita de material com uma elevada transmissão luminosa. Por essa razão, para o caso em que se aplica o vidro, para além de ser temperado com vista a resistir às elevadas cargas térmicas, deve possuir um baixo teor de ferro de modo a oferecer a maior transmitância possível.

Segundo Requena (2009), o silício é um material muito brilhante e, portanto, reflecte muito. Por esse facto, o encapsulamento integra também um material anti-reflexo com vista a reduzir-se a quantidade da irradiância solar reflectida pelo material semiconductor. O material anti-reflexo pode ser o etileno vinil acetato (EVA), um fluoropolímero especial (Teflon) ou uma resina fundida.

De notar que a escolha de cada uma das substâncias depende fundamentalmente do tamanho do módulo em que se pretende construir com as células e da necessidade de se integrar uma cobertura na face frontal, por exemplo, o encapsulamento EVA só é aplicado a módulos com

tamanhos inferiores a 2m x 3m e, integra necessariamente uma placa de vidro com vista a resistir contra a radiação ultra- violeta (UV) (GREENPRO, 2004). O encapsulamento Teflon, contrariamente ao EVA, oferece uma maior resistência à radiação UV e, as células com este tipo de encapsulamento assentam num substrato galvanizado pelo que, não requerem outra cobertura na face frontal.

O encapsulamento com Teflon é usado maioritariamente para módulos especiais produzidos em pequena escala (por exemplo, telhas solares).

O encapsulamento em resina é basicamente um processo de fundição. Nesse processo, fixa-se as células solares entre duas folhas de vidro e, une-se os bordos dessas folhas com separadores transparentes. A folha frontal consiste num vidro branco endurecido, de elevada transparência e, a folha oposta consiste num vidro convencional endurecido que satisfaz os requisitos estruturais (resistência à tensões mecânicas, humidade e factores atmosféricos). A cavidade resultante é então preenchida com uma resina fundida fortemente transparente e, com esse encapsulamento pode-se fabricar módulos solares com dimensões máximas de 2,5 m x 3,8 m (GREENPRO, 2004).

Segundo GREENPRO (2004), o encapsulamento em resina é utilizado normalmente para módulos especiais tendo em vista a integração em edifícios (fachadas, coberturas de vidro e dispositivos de sombreamento).

A fig. 2.8 ilustra o exemplo de uma célula solar que integra um vidro temperado e com maior índice de transparência, um revestimento anti-reflexivo, uma rede de contactos superior que permitem a colecta dos electrões no material do tipo 'n' e outra posterior que colecta as lacunas geradas no material do tipo 'p'.

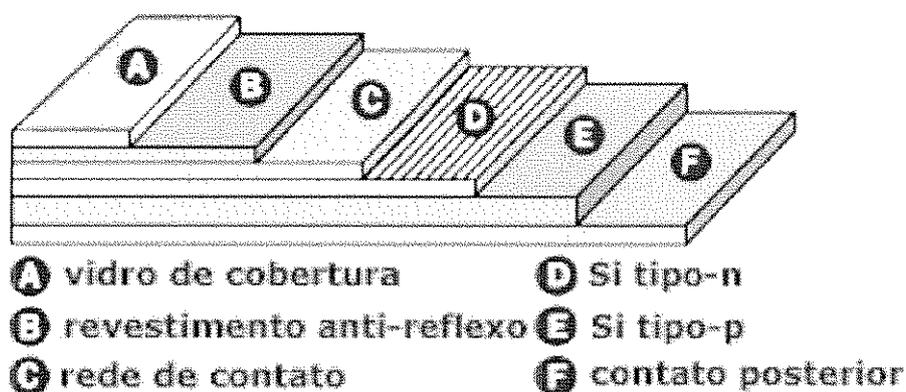


Figura: 2.8 Encapsulamento de uma célula solar

Fonte: Requena, 2009

2.3 Modo de funcionamento de uma célula solar

No presente sub-capítulo descreve-se as características de uma célula solar tendo-se como a base o modelo de um díodo de junção. Faz-se uma análise sucessiva em circuitos (aberto e curto - circuito) de modo a desenvolver-se algoritmos relativos as características que permitem traçar a curva I-V e determinar os parâmetros de funcionamento de uma célula solar.

2.3.1. Modelo ideal de uma célula solar

O modelo ideal de uma célula solar é a que permite obter as características de funcionamento da célula considerando-se que não possui imperfeições que possam levar a quedas de tensão no seu interior ou a fuga de corrente.

Este modelo simplesmente integra uma fonte de corrente, díodo de junção e uma resistência de carga como pode se ver na fig. 2.9.

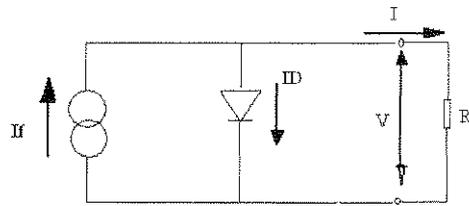


Figura 2.9: Circuito equivalente de uma célula solar ideal

Fonte: Adaptado em Cuamba,1996

Aplicando-se a lei de Kirchoff no circuito da fig.2.9 pode-se determinar a corrente de aplicação gerada pela célula usando –se a seguinte expressão:

$$I = I_f - I_D \quad (eq. 2.6)$$

Onde, I_f é a fotocorrente e I_D é a corrente do díodo.

Substituindo-se a corrente de díodo pela sua expressão, a corrente gerada fica dada por:

$$I = I_f - I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{mK_B T}\right) - 1 \right] \quad (eq. 2.7)$$

Onde, I é a corrente de aplicação que é gerada, I_f é a corrente que se gera na célula pela incidência da radiação, I_0 é a corrente de saturação do díodo, q é a carga do electrão, V é a voltagem da célula, m é factor de idealidade do díodo, K_B é a constante de Boltzman e T é a temperatura absoluta.

Duas situações são importante na análise da equação , isto é, situação de circuito aberto onde a corrente de aplicação (I) é nula e, situação de curto-circuito onde a voltagem da célula é nula ($V = 0$) e a corrente de aplicação é igual à fotocorrente. Estas duas situações permitem exprimir a tensão do circuito aberto e a corrente do curto-circuito como o seguinte:

$$V_{OC} = \frac{mK_B T}{q} \ln\left(\frac{I_f + I_0}{I_0}\right) \quad (eq. 2.8)$$

$$I_{SC} = I_f \quad (eq. 2.9)$$

Esses dois parâmetros (V_{OC} e I_{SC}), representam os extremos da curva I-V da célula solar.

Segundo Cuamba (1996), essa curva I-V possui uma inflexão na qual se localiza o ponto de máxima potência (P_{mp}). A projecção desse ponto no eixo da tensão permite determinar o valor da tensão máxima (V_m) e, ao longo do eixo da corrente permite determinar a intensidade da máxima corrente (I_m) como se ilustra na fig.2.10.

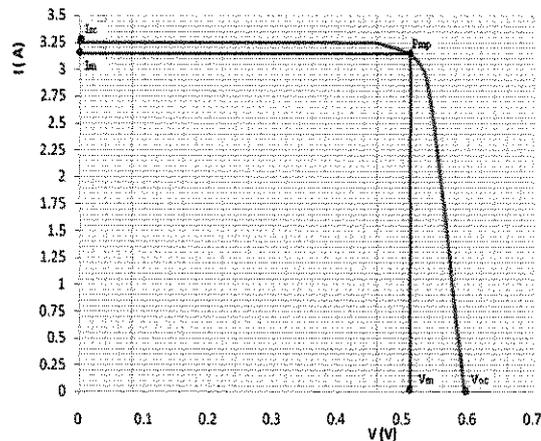


Figura:2.10 Curva I-V de uma célula solar

O ponto de potência máxima representa a maior área rectangular possível de ser escrita sob a curva I-V (Ramos, 2006). Entretanto, existe um outro parâmetro que descreve quão quadrática é a curva I-V denominado factor de forma (FF).

Segundo Cuamba (1996), o factor de forma é a razão entre a potência de pico e o produto $V_{oc}I_{sc}$.

$$FF = \frac{V_m \cdot I_m}{V_{oc} \cdot I_{sc}} = \frac{P_{mp}}{V_{oc} I_{sc}} \quad (eq.2.10)$$

O factor de forma é sempre menor que unidade e, para boas células pode atingir 0.7 (Cuamba, 1996).

i) Rendimento de uma célula solar

O rendimento de uma célula solar determina-se achando a razão entre a potência máxima pela potência da radiação incidente (Pacheco, 2009).

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{\text{inc}}} \quad (\text{eq. 2.11})$$

Onde P_{\max} é a potência máxima gerada pela célula solar em watts (W) e P_{inc} é a potência da radiação incidente na superfície da célula em Watts (W).

A potência da radiação que incide sobre a superfície da célula solar pode-se determinar pelo produto da irradiância pela área activa da célula solar.

2.3.2. Modelo real de uma célula solar

O modelo de uma célula ideal integra somente a fonte de corrente, um díodo e uma resistência de carga permitindo-se desse modo que toda a corrente gerada possa ser fornecida a resistência de carga. Porém, numa situação prática nem toda a corrente gerada pela célula é fornecida a resistência de carga uma vez que a mesma célula apresenta fugas de corrente e queda de tensão causada pela circulação de corrente no seu interior, pelos contactos metálicos e grade de metalização da sua face frontal (Hecktheuer, 2001).

Segundo Ramos (2006), todas essas resistências que se geram quer por razões de imperfeições no cristal semiconductor, eventuais defeitos da junção tanto como contactos metálicos, podem ser aglutinadas somente em dois tipos de resistências que são resistência série (R_s) e resistência paralela (R_p), conforme ilustrado na fig. 2.11.

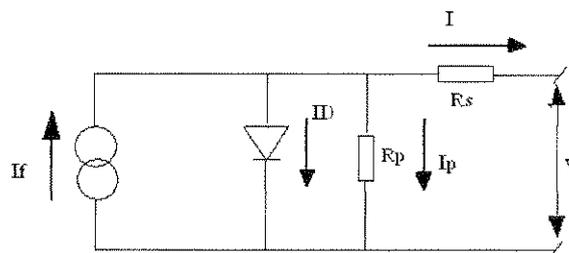


Figura 2.11: Circuito equivalente de uma célula solar.

Fonte: Adaptado em Cuamba, 1996

De acordo com o circuito equivalente da fig. 2.11, a corrente de saída pode ser dada por:

$$I = I_f - I_D - I_p \quad (eq.2.12)$$

Onde I_f (A) é a fotocorrente, I_D (A) é a corrente do díodo e I_p (A) é a corrente na resistência paralela,

Substituindo-se as correntes do díodo e da resistência paralela da equação pelas suas correspondentes expressões, a corrente fornecida por uma célula real fica:

$$I = I_f - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(V + IR_s)}{mK_B T} \right] - 1 \right\} - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (eq. 2.13)$$

Onde I_0 é a corrente de saturação inversa, m é factor de idealidade do díodo, K_B é a constante de Boltzman e T é a temperatura da junção da célula (Hecktheuer, 2001).

Se comparar-se a expressão dada pela equação 2.13 com a da equação 2.7, nota-se que a presença das resistências série e paralela modifica o comportamento da corrente da célula solar e, por esta razão, quer o ponto de potência máxima assim como o factor de forma também sofrem alteração. Esses parâmetros fazem parte do grupo dos parâmetros internos que afectam o rendimento das células solares que engloba também a reflectividade do material que cobre as células solares.

No grupo dos parâmetros externos os que mais se destacam são a temperatura e a irradiância solar (Cuamba, 1996). Os sombreamentos também influenciam no baixo rendimento das células solares uma vez que, podem constituir pontos de atenuação da radiação solar, entretanto, eles são de fácil controle daí que são ignorados neste presente trabalho.

i) Temperatura

A temperatura é um factor que infulência negativamente no funcionamento das células solares uma vez que a sua subida favorece o surgimento da recombinação do par-electrão (Ramos, 2006).

O aumento da temperatura faz com que a magnitude da banda proibida reduz – se e, desse modo, aumente o valor da fotocorrente (Cuamba,1996). Entretanto, esse aumento ja não favorece a

tensão do circuito aberto, isto é, a tensão do circuito aberto decresce significativamente com o aumento da temperatura.

$$\frac{dV_{oc}}{dT} = \beta, \quad \beta < 0 \quad (eq.2.14)$$

Onde β é o coeficiente de variação da tensão de circuito aberto em função da temperatura e, o seu valor é fornecido pelo fabricante da célula solar.

Para determinar-se a tensão do circuito aberto a uma dada temperatura integra-se a expressão 2.14 tendo-se como limites de integração os valores nas condições normais de teste (STC) e esta resulta em:

$$V_{oc}(T_c) = V_{oc}^{(STC)} + \beta(T_c - T^{(STC)}) \quad (eq.2.15)$$

Onde $V_{oc}(T_c)$ é a tensão do circuito aberto a uma dada temperatura da célula (T_c), $V_{oc}^{(STC)}$ é a tensão do circuito aberto nas condições normais de teste e $T^{(STC)}$ é a temperatura nas condições normais de teste.

Segundo Matos (2006), a temperatura da célula é influenciada pela temperatura ambiente e, em função disso é dada por:

$$T_c = T_a + \left(\frac{G}{800} \right) (NOCT - 20) \quad (eq. 2.16)$$

Onde T_a é a temperatura ambiente, G é a irradiância solar em Wm^{-2} e $NOCT$ é a temperatura da célula nas condições de operação normal da célula, o seu valor é fornecido pelo fabricante e representa a temperatura que a célula atinge em condições normalizadas definidas como $T_a = 20^\circ C$ e $G = 800 Wm^{-2}$.

ii) Irradiância solar

A irradiância solar constitui uma base fundamental para o bom funcionamento das células solares uma vez que o seu aumento resulta em aumento significativo na corrente de curto circuito.

A tensão do circuito aberto também aumenta com o aumento da radiação, porém, tal aumento é relativamente menor sob ponto de magnitude em comparação com a da corrente de curto-circuito (Matos, 2006).

Segundo Ramos (2006), a corrente gerada pela célula solar a uma dada irradiância exprime-se pela seguinte relação:

$$I_{sc}(G) = \left(\frac{G}{1000} \right) I_{sc}^{STC} \quad (eq. 2.17)$$

Onde $I_{sc}(G)$ é a corrente de curto-circuito a uma dada irradiância e G é a irradiância solar em W/m^2 .

3. Método

Com base nos dados do módulo Shell SM100-12 (tabela 3.1), determinou-se I_{sc} e V_{oc} relativos a uma célula com auxílio das seguintes expressões:

- $V_{oc} = V_{ocm}/N_{sc}$
- $I_{sc} = I_{scm}/N_{pc}$

Onde, V_{oc} é a tensão do circuito aberto da célula e, I_{scm} é a corrente do curto – circuito do módulo, V_{ocm} é a tensão do circuito aberto do módulo, I_{sc} é a corrente do curto – circuito da célula.

Tabela: 3.1 Características do módulo fotovoltaico Shell SM100 - 12

Silício monocristalino		
Potência de pico	P_{max}	100 W
Corrente máxima	I_{max}	5.9 A
Tensão maxima	V_{max}	17.0 V
Corrente de curto-circuito	I_{scm}	6.5 A
Tensão de circuito aberto	V_{ocm}	21.4 V
Temperatura normal de funcionamento	NOCT	45°C
Coefficiente de temperatura de I_{sc}	α	2.8 E-03 A/K
Coefficiente de temperatura de V_{oc}	β	-7.6 E-03 V/K
Número de células em série	N_{sc}	36
Número de ramos em paralelo	N_{pc}	2
Comprimento	C	1.316 m
Largura	L	0.66 m
Área	A	0.869 m ²

Fonte: Castro, 2002

Para a obtenção dos gráficos que evidenciam a influência dos parâmetros interno e externo no funcionamento das células solares usou-se o pacote informático “Microsoft office Excell 2007” e os modelos matemáticos consignados pelas equações:

- 2.13- para a análise dos efeitos da resistência série e resistência paralela;
- 2.15 e 2.16 - para a análise do efeito da temperatura;
- 2.17 – para a análise do efeito da irradiância.

Para a análise dos efeitos da resistência série, considerou-se a resistência paralela (na eq.2.13) sendo infinita e, uma vez que a corrente a ser determinada aparece também no segundo membro, usou-se para a corrente do segundo membro uma aproximação $I \cong I_{sc}$ como recomendam alguns autores (Filho, 2007).

Para a análise dos efeitos da resistência paralela considerou-se a resistência série nula e variou-se apenas os valores da resistência paralela.

Para a análise do efeito da temperatura manteve-se constante a irradiância ($G = 800 \text{ Wm}^{-2}$) e variou-se a temperatura ambiente. A temperatura de referência (STC) é de 25°C .

Para irradiância, manteve-se constante a temperatura ambiente ($T_a=25^{\circ}\text{C}$).

4. Resultados

4.1 Parâmetros externos

i) Radiação solar

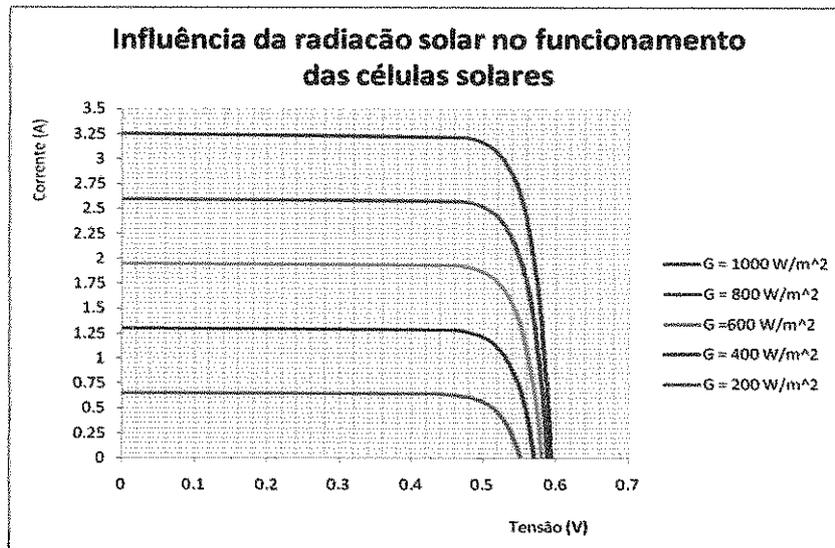


Figura 4.1: Influência da irradiância solar no funcionamento de uma célula solar.

Uma diminuição no valor de irradiância regista-se uma redução acentuada na corrente do curto-circuito, isto é, um decréscimo em 20% no valor da irradiância tem-se uma redução no valor de I_{sc} em 20%, valor relativamente elevado comparativamente ao decréscimo da V_{oc} que é na ordem de 1%.

ii) Temperatura

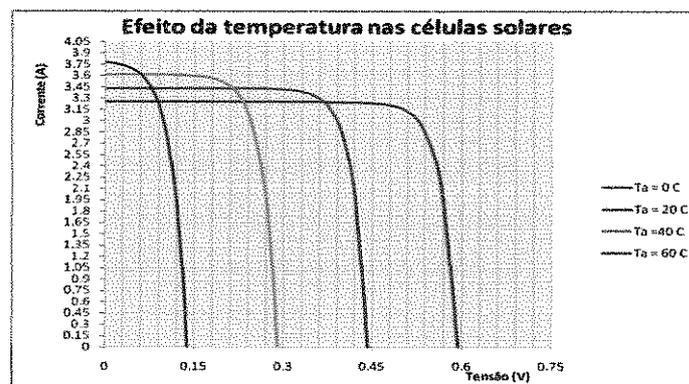


Figura: 4.2 Influência da temperatura no funcionamento das células solares.

A temperatura não modifica da mesma maneira os parâmetros da célula (I_{sc} e V_{oc}), uma vez que enquanto a tensão do circuito aberto regista um decréscimo em 16.9% com o aumento da temperatura, a corrente de curto-circuito regista um incremento na ordem de 5.9%. Esse aumento da I_{sc} está associado com o aumento da fotocorrente vista a diminuição da magnitude da banda proibida com o aumento da temperatura. Entretanto, esse aumento da I_{sc} não melhora a eficiência da célula visto que a tensão de circuito aberto regista um decréscimo acentuado e, como o factor de forma depende dessa tensão, também decresce favorecendo dessa maneira a redução da eficiência da célula.

4.2 Parâmetros internos.

i) Resistência paralela

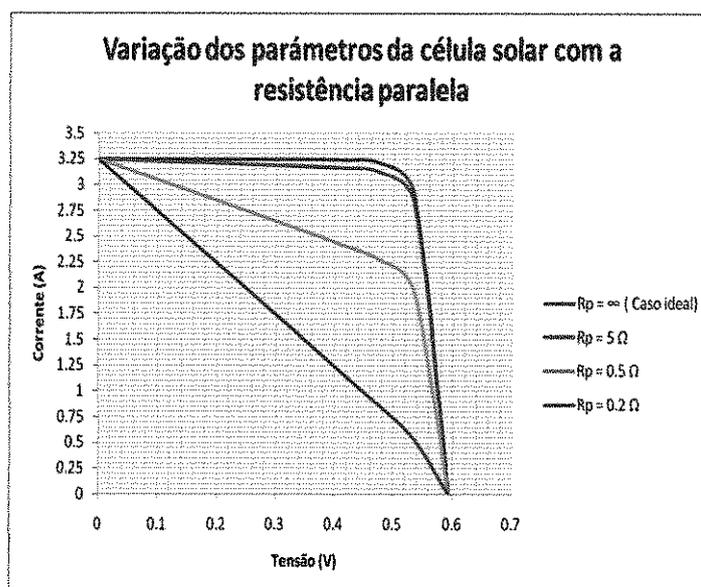


Figura 4.3: Efeito da resistência paralela

A redução da resistência paralela, isto é, do valor infinito para finito resulta em deslocamento do ponto de máxima potência. Este facto, permite reduzir significativamente quer a corrente máxima quer a tensão e, obviamente, reduzindo o rendimento da célula solar.

iii) Resistência série

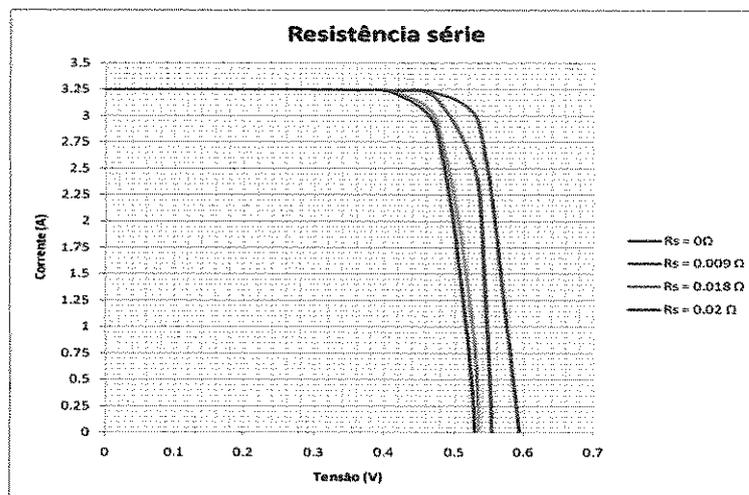


Figura: 4.4 Efeito da resistência série no funcionamento das células solares

O aumento da resistência série leva ao decréscimo do ponto de máxima potência e, em virtude disso, tanto a corrente máxima assim como a tensão máxima vão reduzir as suas magnitudes favorecendo desse modo a redução do factor de forma e, por conseguinte, a redução da eficiência da célula.

5. Considerações finais e recomendações

5.1 Considerações finais

O aumento da temperatura constitui um factor muito prejudicial no funcionamento das células solares. Em princípio podia ser satisfatório, uma vez que a corrente de curto-circuito regista um pequeno crescimento, todavia, isso deixa de ter impacto visto que a tensão do circuito aberto sofre uma redução apreciável que acaba baixando o ponto de máxima potência, reduzindo-se desse modo o rendimento das células solares.

A irradiância é um parâmetro essencial para o funcionamento das células solares pelo que se a natureza permitisse, o seu valor devia ser o máximo possível. A redução da irradiância leva a redução da corrente de curto – circuito e a potência máxima debitada pela célula.

As resistências no interior das células sempre constituem focos de dissipação de energia reduzindo dessa forma a eficiência das células solares. Entretanto, esses parâmetros (resistências série e paralela) dizem respeito ao fabricante pelo que, é necessário que os cristais usados no fabrico das células tenham o mínimo possível de imperfeições e os metais usados nos contactos também tenham a maior condutibilidade eléctrica possível.

5.2 Recomendações

A influência dos parâmetros externos no funcionamento das células solares é algo que pode ser tutorado por qualquer especialista ou técnico de energias fotovoltaicas. Por conseguinte, durante o dimensionamento de um sistema fotovoltaico para além de se preocupar pela irradiância é também fundamental conhecer a temperatura média do local onde se pretende usar as células solares.

Durante o processo de aprendizagem das energias fotovoltaicas é imperioso que os estudantes assimilem o comportamento exibido pelas células solares quando forem sujeitas a diferentes situações ambientais (irradiância e temperatura) e tecnológicas (resistências serie e paralela) com vista a ter uma precessão profunda do que possa acontecer quando essas células forem postas em aplicação prática.

6. Referências bibliográficas

- [1] ABREU, Ricardo A. (2006). *Caracterização eléctrica de células solares de tripla junção-GaInP/GaAs/Ge*. INPE. 150 pp
- [2] CASTRO, Rui M.G. (2002). *Energias Renováveis e Produção Descentralizada*. Lisboa. 51 pp
- [3] CUAMBA, B.C. (1996). *Studies of the performance on a photovoltaic power plant in southern african environment*. pp 6-22
- [4] CUMBANE, Julião João. (1994). *Estudo do efeito da temperatura no rendimento das células solares*. Tese de licenciatura em Física aplicada. Departamento de Física - Universidade Eduardo Mondlane, Maputo.
- [5] FALCÃO, Vivienne D. (2005). *Fabricação de células solares de CdS/CdTe*. Rio de Janeiro. 120 pp
- [6] FILHO, Luís R. (2007). *Análise e modelagem geométrica da potência gerada por um sistema híbrido solar fotovoltaico eólico*. Tese de Doutoramento em Agronomia. Faculdade de Ciências Agronômicas – Universidade de Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. Botucatu – SP. 156 pp
- [7] GREEN, Martin A. (1998). *Solar Cells*. University of New South Wales. Kensington, NSW 2023. 274 pp
- [8] GREENPRO. (2004). *Energia Fotovoltaica – Manual sobre tecnologias, projecto e instalação*. 368 pp.
- [9] HECKTHEUER, Lúcio A. (2001). *Análise de associações de módulos fotovoltaicos*. Tese de doutoramento em engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Porto Alegre. 135 pp
- [10] LASNIER, F. And ANG. T.G. (1990). *Photovoltaic engineering handbook*. IOP Publishing. pp 71-91.

- [11] MATOS, Fernando Barbosa. (2006). *Modelamento computacional de células fotovoltaicas baseado nas propriedades físicas dos materiais*. Tese de mestrado em Electricidade Rural e Fontes Alternativas de Energia. Faculdade de Engenharia Eléctrica – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia. 148 pp
- [12] PACHECO, Juliano de Pellegrin. (2009). *Otimização da energia gerada por painéis solares fotovoltaicos em sistemas isolados da rede eléctrica*. Tese de Mestrado em Informática Industrial. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba. 152 pp
- [13] PIERRET, Robert F. (1989). *Advanced semiconductor fundamentals*. 6ª edição, Purdue university. 228 pp
- [14] RAMOS, Cristina de Moura. (2006). *Procedimento para caracterização de módulos fotovoltaicos*. Tese de mestrado em energias. Universidade de São Paulo, São Paulo. 141 pp.
- [15] REQUENA, Michelle B. (2009). *Células Solares: Fundamentos e Aplicações*. Instituto de Geociências e Ciências Exactas Campus de Rio Claro. 37 pp.
- [16] SEDRA, Adel S. & SMITH, Kenneth C. (2000). *Microelectrónica*. 4ª edição, Makron Books. São Paulo. pp 131-156
- [17] SHAYANI, Rafael A. (2006). *Medição do rendimento global de um sistema fotovoltaico isolado utilizando módulos de 36 células*. Tese de Mestrado em Engenharia Elétrica. Universidade de Brasília, Brasília. 225 pp.