

FIS-38



**UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE**

Faculdade de Ciências  
Departamento de Física

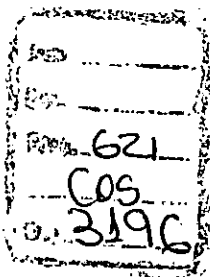
Trabalho de Licenciatura  
Tema:

**Degradação Ambiental das Células Solares de Silício Cristalino**

Autora:

Ana Maria Odete Dabula da Costa

Maputo, Julho de 1998





**UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE**

**Faculdade de Ciências  
Departamento de Física**

**Trabalho de Licenciatura  
Tema:**

**Degradação Ambiental das Células Solares de Silício Cristalino**

**Supervisor:**

**Prof. Doutor Boaventura Chongo Cuamba**

*Maputo, Julho de 1998*

*Aos meus pais*

*Henrique da Costa e Matânia Odete Samuel Dabula*

*e minhas irmãs*

*Cândida Odete da Costa e Alice Cecília Dabula Costa*

*[...Ex toto corde...]*

## AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho foi possível graças ao apoio de todos aqueles que acreditaram na minha formação. Agradeço:

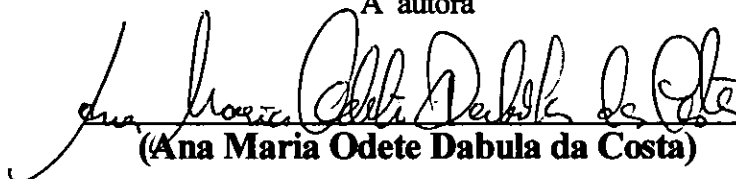
- Ao meu supervisor, Prof. Doutor. Boaventura Chongo Cuamba por me ter confiado a realização deste trabalho sob sua supervisão, pela importante contribuição didáctica e científica e ainda pela disposição de valiosos meios materiais. Ao Prof. Doutor. Rogério Utui pela importante contribuição didáctica e científica na finalização do trabalho.
- Ao Chefe do departamento de Física, dr. Hermínio Tembe pela resolução de problemas técnicos e apoio didáctico durante a realização do trabalho.
- A todos aqueles que foram meus docentes durante o curso, em especial prof. Dr. Rakov, por ser o exemplo que gostaria seguir.
- Ao C.T.A do departamento nomeadamente, senhor Santos Vitorino e o senhor Meneses pela ajuda prestada na disponibilização de material, facilitação na recolha de dados e pelo apoio moral, a senhora Rosa Nhambe pela facilitação no acesso ao material bibliográfico durante o curso e durante o trabalho, pelo carinho e apoio moral prestados, a senhora Otilia, senhora Etelvina e senhora Alice.
- Aos meus colegas dr. Genito Maure pelas valiosas sugestões, apoio moral e o longo caminho juntos percorridos, dr. Marcelino Macome, Humberto Mutevuie, António Saíde, Victor Melo, Cândida Cumbe, Enoque Malate, Félix Tomo e a todos outros colegas pela longa caminhada que juntos partilhamos e pelo apoio moral durante a realização do trabalho.
- Aos avôs, tios e primos em especial ao Baby, Myke e Viky Dabula a Nilsa Nguilande, pela presença constante, força e apoio moral.
- A todos meus amigos em especial, Zita Libombo, Rogério dos Santos, Rodolfo Pinheiro, Belindo Manhiça e Hernani Mussa pelo carinho e força moral prestados durante o curso e realização do trabalho.
- A todos aqueles que directa ou indirectamente contribuíram na realização deste trabalho.
- À Deus.

## DECLARAÇÃO DE HONRA

Este trabalho foi completamente realizado com base no material que ao longo do mesmo se faz referência. As ideias originais nele expressas, são de inteira responsabilidade da autora.

Maputo, Julho de 1998

A autora

  
(Ana Maria Odete Dabula da Costa)

## RESUMO

A pesquisa da tecnologia fotovoltaica em Moçambique, é matéria de extrema importância, e bastante actual. De facto o país possui elevados índices de radiação solar em quase todo o território nacional e cuja média ultrapassa em cinco vezes a média de todo planeta que é de  $1\text{kWh/m}^2$  por dia solar.

A energia fotovoltaica é extremamente útil nas zonas rurais, as quais são dificilmente alcançadas pela rede eléctrica convencional devido a factores económicos, e em outras áreas tais como transportes e comunicações. Por outro lado o uso deste tipo de tecnologia, contribui em grande medida para a preservação do meio ambiente.

Para um maior aproveitamento das potencialidade do país em energia solar, torna-se necessário melhorar o desempenho das células solares (que neste momento se situa entre os 14%-16% para células comerciais) e adequar o seu uso as condições ambientais da nossa região. Para tal, foi realizado o estudo da eficiência de células solares e a análise da respectiva degradação ao longo de 1 ano, período compreendido entre 1 de Julho de 1997 a 30 de Junho de 1998 nas condições ambientais de Moçambique. Fez-se ainda a análise dos factores de grande influência no rendimento das células, tais como a temperatura e a radiação solar. Os resultados obtidos possuem uma boa precisão e podem ser usados na melhoria do tipo de células para o uso na região.

## ÍNDICE

RESUMO.....	1
1. INTRODUÇÃO.....	3
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	4
2.1. GENERALIDADES.....	4
2.1.1. Radiação solar.....	4
2.2. GERADOR FOTOVOLTAICO.....	7
2.2.1. Efeito fotovoltaico.....	7
2.2.2. Requisitos para uma célula solar.....	8
2.2.3. Modelo de uma célula solar.....	9
2.2.4. Características eléctricas de uma célula solar.....	10
2.2.4.1. Corrente de curto circuito.....	11
2.2.6. Tensão de circuito aberto.....	11
2.3. CRITÉRIOS GERAIS A OBSERVAR NA CONSTRUÇÃO DE UMA CÉLULA.....	12
2.3.1. Processo de manufatura.....	12
2.4. EFICIÊNCIA DE UMA CÉLULA FOTOVOLTAICA.....	14
2.4.2. Limites removíveis.....	15
2.4.3. Limites não removíveis.....	16
3. APLICAÇÕES.....	16
3.1. TELECOMUNICAÇÕES.....	17
3.2. ILUMINAÇÃO.....	17
3.3. ELECTRIFICAÇÃO RURAL.....	17
3.4. REFRIGERAÇÃO.....	18
3.5. BOMBEAMENTO DE ÁGUA.....	18
4. METODOLOGIA PARA ANÁLISE DA DEGRADAÇÃO DAS CÉLULAS SOLARES.....	19
4.1. MÉTODO GERAL.....	19
4.1.1. Requisitos gerais para as medições.....	19
4.1.2. Característica tensão corrente para a luz natural do Sol.....	19
4.1.3. Conversão da característica tensão-corrente.....	20
4.2. MÉTODO EXPERIMENTAL ESCOLHIDO.....	21
4.2.1. Descrição do método.....	21
4.2.2. Descrição do material usado.....	22
5. TRATAMENTO DE DADOS COLHIDOS E DISCUSSÃO DE RESULTADOS.....	23
5.1. APRESENTAÇÃO DE DADOS COLHIDOS PELO DATALOGGER E EFICIÊNCIA CALCULADA.....	23
5.2. CÁLCULO DE ERROS.....	26
5.2.1. Apresentação de gráficos dos resultados obtidos.....	28
6. CONCLUSÕES.....	32
7. BIBLIOGRAFIA.....	33
8. ANEXOS.....	34

## 1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento das células fotovoltaicas teve início à cerca de 140 anos atrás, após a descoberta do efeito fotovoltaico em 1839 pelo físico francês Edmund Bequerel, quando trabalhando no laboratório de seus pais em França, observou que incidência de luz sobre um eléctrodo numa solução electrolítica desenvolvia uma fotovoltagem. Cerca de 40 anos mais tarde, ou seja em 1877, Adams e Day observaram pela primeira vez o efeito similar em materiais de estado sólido, mais precisamente no selénio, pouco depois de Smith ter demonstrado o efeito de fotocondutividade neste material em 1873. Cedo os pesquisadores de materiais de estado sólido entre eles Grandal e Schottky, realizaram um trabalho pioneiro em células solares de selénio e de óxido de cobre que foram largamente usados em registos de exposições fotográficas. Apesar desta demonstração ter sido feita muito cedo, não foi possível a obtenção de geradores fotovoltaicos antes do desenvolvimento das primeiras células fotovoltaicas de silício em 1954, princípio da era moderna da tecnologia fotovoltaica, que marcou o início do uso do efeito fotovoltaico em processos de conversão de energia.

A aplicação das células solares teve início com a introdução destas, pela primeira, vez em programas espaciais dos E.U.A e a primeira célula a entrar no espaço, foi instalada no Vanguard I, o segundo satélite americano em órbita em 1958, e em aplicações terrestres aquando da crise do petróleo em 1973. Hoje esta tecnologia está suficientemente desenvolvida o que torna possível a sua aplicação em áreas remotas nos países em desenvolvimento.

Moçambique possui um potencial energético que constitui um dos seus principais recursos de que conta para o seu desenvolvimento económico. Com efeito o país possui significativos recursos, hídricos, carvão, gás natural, biomassa e elevados níveis de radiação solar. Esta última cobre quase na totalidade todo o território nacional e, corresponde em média 5 vezes mais a média recebida pelo globo terrestre no geral, de  $1.0\text{kW/m}^2$  por dia solar.

Dentro do país, o programa de pesquisas nesta área teve início em 1991, com o projecto de instalação e monitoração de um sistema de bombeamento de água usando o efeito fotovoltaico, com capacidade de 848W, no Campus universitário da U.E.M. Este projecto foi iniciado em 1993 e integrado no sistema de monitoração em 1994. Pretende-se com esta pesquisa, desenvolver um modelo de transferência de tecnologia fotovoltaica eficiente no contexto dos países em desenvolvimento de uma maneira geral e de Moçambique em particular. É, portanto, dentro desta pesquisa que o presente trabalho tem como objectivo estudar a eficiência das células solares de silício cristalino e analisar a respectiva degradação com as condições ambientais.



## 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 2.1. GENERALIDADES

#### 2.1.1. Radiação solar

O Sol é um reactor termonuclear gigante que emite energia a partir da sua superfície aproximadamente igual à radiação de um corpo negro à uma temperatura de cerca de 6000K. No espaço, 98% da energia total irradiada pelo Sol situa-se nos comprimentos de onda entre 0.25 e 3.0 $\mu\text{m}$ . A maior parte da energia emitida é radiação electromagnética que se encontra entre a região do visível e próximo da região infravermelha.

O espectro do corpo negro na superfície solar é modificada pela variação da temperatura no disco solar, pelo efeito da atmosfera solar e pelas linhas de absorção de Fraunhofer. A figura 2.1 mostra a distribuição espectral da radiação solar fora da atmosfera terrestre, e a figura 2.2 mostra uma comparação de distribuições espectrais entre a radiação solar e o corpo negro.

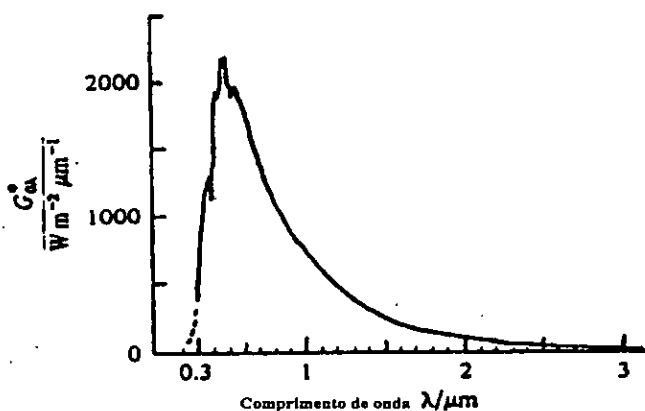


Figura 2.1. Distribuição espectral da radiação solar fora da atmosfera terrestre  $G_{0A}^*$  (curva padrão-NASA-1971) [Segundo a fonte 1]

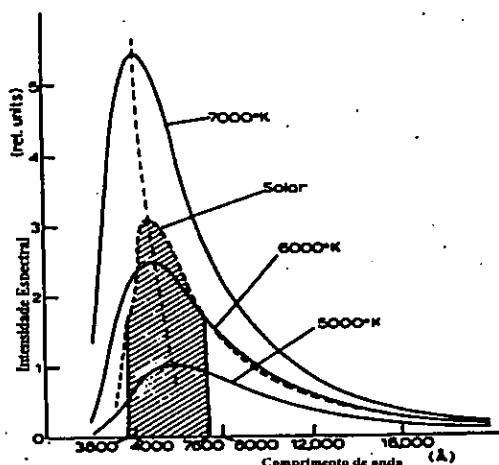


Figura 2.2. Distribuição espectral da radiação solar comparada com a distribuição correspondente a do corpo negro a diferentes temperaturas. [segundo a fonte 1]

A quantidade chamada de constante solar é definida como sendo a taxa à qual a energia solar é recebida numa unidade de superfície, perpendicular à direcção do sol, no espaço livre (vácuo) a meia a distância entre a Terra e o Sol. E o valor mais recentemente aceite é o de  $1.353 \text{ kWm}^{-2}$ . A radiação solar real no espaço livre, difere deste valor em  $\pm 3.35\%$ , devido às variações na distância entre a Terra e o Sol ao longo do ano, causadas pelo movimento de translação da Terra em torno do Sol numa órbita elíptica. O espectro solar extraterrestre pode ser dividido em três regiões principais:

- Região ultravioleta ( $\lambda < 0.4 \mu\text{m}$ ): 9% da radiação;
- Região do visível ( $0.4 \mu\text{m} < \lambda < 0.7 \mu\text{m}$ ): 45% da radiação;
- Região infravermelha ( $\lambda > 0.7 \mu\text{m}$ ): 46% da radiação;

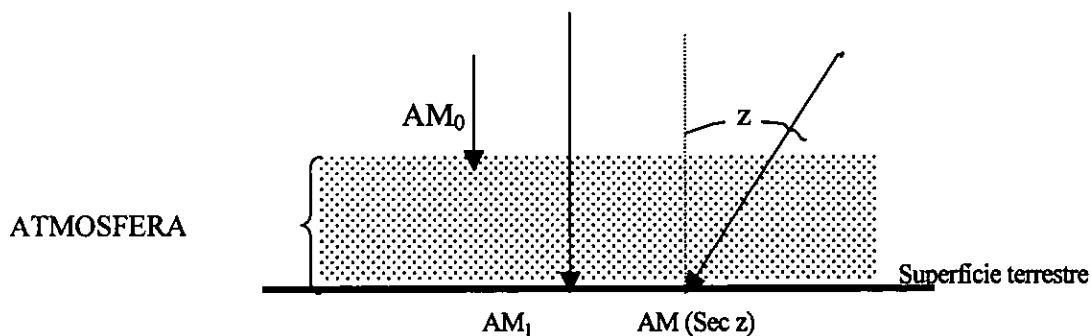
A intensidade e a distribuição espectral da radiação solar que chega à Terra não só depende da composição atmosférica desta, como também da trajectória da radiação através da atmosfera. Os parâmetros mais importantes na atmosfera são a existência de água  $w$ , o coeficiente de turbidez  $B$ , que exprime o efeito do nevoeiro e o espalhamento, a existência do ozono, nublação do céu e o efeito de reflexão na superfície terrestre.

Desde que a radiação alcança a periferia da atmosfera terrestre, a normal à direcção do Sol, depende somente da distância entre a Terra e o Sol. outros efeitos geométricos tal como o ângulo de declínio do Sol, manifestam-se em primeiro lugar pela variação do comprimento da trajectória da radiação através da atmosfera. Se for considerada apenas a radiação directa num ponto receptor na mesma direcção do sol, pode-se descrever o efeito geométrico especificando o ângulo zénite  $z$  do sol que é o ângulo entre o raio que vai da Terra ao Sol e a normal do plano que contém o círculo horizontal. Este ângulo é função do dia, do tempo, da estação do ano, da latitude e da longitude do lugar. Ao meio dia solar real,  $z$  é dado pela seguinte expressão:

$$Z = L - 23.5^\circ \cos(360N/365) \quad (2.1)$$

Onde  $N$  é o numero de dias desde o solstício de verão e  $L$  representa a latitude do lugar em graus. O comprimento da trajectória através da atmosfera é convenientemente descrito em termos de massa equivalente do ar  $m_r$ . O comprimento da trajectória para o ângulo zénite  $z$  é justamente a sec de  $z$  vezes o comprimento da trajectória para  $z = 0$ , e esta massa relativa do ar é definida como sendo  $m_r = \sec z$ .

O espectro solar designado por  $AM(m_r)$  corresponde ao espectro solar específico registado ( onde  $m_r$  é a massa do ar ) e  $AM_0$  é o espectro solar no espaço; o espectro médio da superfície terrestre corresponde aproximadamente a  $AM_2$ . Os espectros  $AM_0$  e  $AM_2$  são comparados na figura 2.3 .



*Figura 2.3. Ilustração do espectro da radiação solar sendo  $AM_0$  no espaço,  $AM_1$  na superfície terrestre para a normal incidente, e  $AM_m$  a superfície com  $m = \sec z$ , onde  $z$  é o desvio da normal incidente. [segundo a fonte 2]*

Na sua trajetória através da atmosfera, a luz solar é modificada devido aos seguintes processos:

- (1) Espalhamento, que é responsável pela cor azul do céu;
- (2) Banda de absorção electrónica, em primeiro lugar no oxigénio, nitrogénio e ozono. Quase toda a radiação ultravioleta, com  $\lambda < 0.29\mu\text{m}$  é absorvida pelo ozono.
- (3) Bandas de absorção vibracional e de rotação molecular, em água e dióxido de carbono. Quase toda a radiação  $\lambda > 3.0\mu\text{m}$  é absorvida pela água ( $\text{H}_2\text{O}$ ) pelo dióxido de carbono ( $\text{C}_2\text{O}$ ) (com excepção da chamada janela atmosférica com muitos comprimentos de ondas longas ).
- (4) Dispersão por aerossóis e por partículas sólidas, (que é maior para o comprimento de ondas curtas).
- (5) Refracção e turbulência que provoca a variação no índice e refracção na temperatura e na pressão.

A radiação total que incide numa superfície horizontal ou na superfície inclinada é denominada de radiação global . A radiação global  $G$  é a soma da radiação directa  $J$  e com a radiação difusa (chamada de céu)  $D$ :

$$G = J + D \quad (2.2)$$

A radiação difusa é o resultado do processo de espalhamento no céu, da reflexão da luz nas nuvens e na superfície da Terra. Nas condições de céu pouco nublado, esta, é muito forte na porção azul do espectro e contribui com cerca de 8-10% da radiação total em dias com uma claridade considerável. Ela tem o máximo em ângulos próximos do zénite.

A Terra recebe uma insolação, que é definida como sendo a medida de energia recebida em  $1 \text{ m}^2$  na superfície horizontal por dia. Esta medida varia de lugar para lugar e de acordo com as diferentes

estações do ano. Sabe-se que em Moçambique a radiação atinge uma média de  $5.0 \text{ kWm}^{-2}$  por dia solar, que é o seu fluxo de densidade máxima numa banda de comprimento de ondas longas entre  $0.3\mu\text{m}$  e  $2.5 \mu\text{m}$ .

## 2.2. GERADOR FOTOVOLTAICO

### 2.2.1. Efeito fotovoltaico.

O efeito fotovoltaico é definido como sendo o surgimento de uma diferença de potencial quando a luz é absorvida por um determinado tipo de material, neste caso um semiconductor. Desta maneira formam-se cargas separadas e se um campo eléctrico estiver presente dentro do semiconductor, os electrões e as lacunas vão mover-se em direcções opostas. Esta separação de cargas resulta na criação de tensão o que é designado de efeito fotovoltaico ou seja, a criação de cargas separadas pela acção da luz. Na figura 2.4 abaixo.

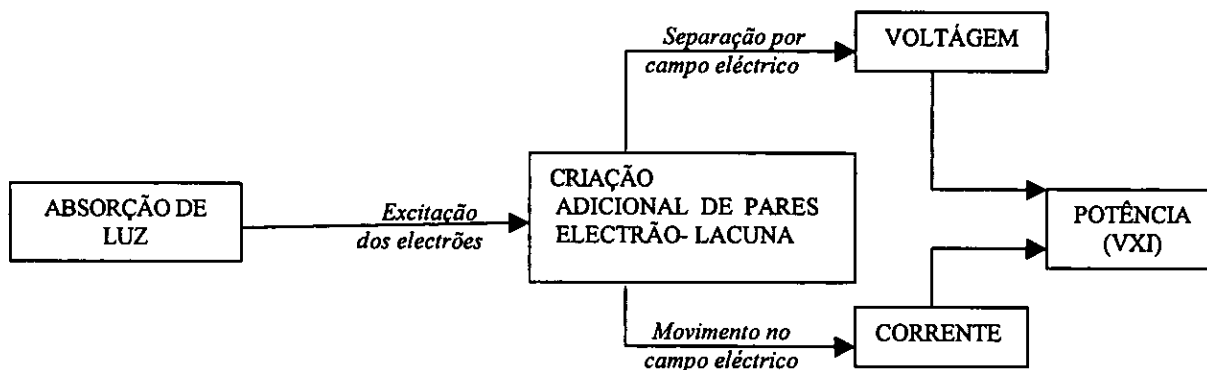
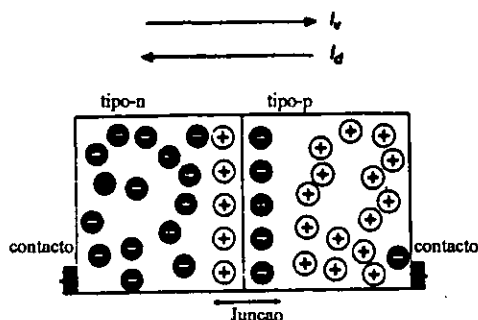


Figura2.4. Esquema representativo do efeito fotovoltaico. [Extraído da fonte 1]

A maneira mais simples de estabelecer um campo eléctrico dentro de um semiconductor é fazer junções p-n. Estas, podem ser realizadas usando um material semiconductor do tipo p que contém impurezas aceitadoras e um material semiconductor do tipo n que contém impurezas doadoras. Considerando a junção intrínseca, e devido a acção da luz, os electrões doadores em excesso no material do tipo n, irão atravessar os aceitadores no material do tipo p e as lacunas atravessam os doadores no material do tipo n. Nesta região em que há trocas de dopantes denomina-se de junção p-n.



*Figura 2.5. Junção fotovoltaica na ausência de luz. [Extraído da fonte 3].*

O estado estável é eventualmente preenchido com o estabelecimento de um campo eléctrico causado pela acumulação de cargas de sinais opostos em cada lado da junção. A figura 2.5 mostra um excesso de carga negativa na parte do tipo n da junção, e positiva na parte do tipo p da junção. Os electrões e lacunas podem ser geradas termicamente ou por meio de luz, e o material torna-se carregado. A absorção da radiação solar em particular, incrementa em grande medida a geração de pares electrão-lacuna adicionando-os aos pares termicamente gerados. Ao criar estas cargas perto da junção p-n, cria-se um campo que se torna uma força electromotriz que mantém as cargas separadas produzindo corrente num circuito fechado externo. A corrente eléctrica alimenta os contactos metálicos nos condutores do tipo p e n para a carga externa (apresentados na figura 2.5).

Nos fotões geradores de carga, estão inclusos o da luz solar, que são os mais dominantes, e estão ainda presentes os fonões termicamente gerados. Na ausência de luz só ocorre geração térmica.

### **2.2.2. Requisitos para uma célula solar.**

Uma célula solar capaz de gerar corrente eléctrica é basicamente constituída por:

- Um díodo semiconductor de uma larga área de junção, para colectar tanta luz quanto for possível.
- Contactos eléctricos em cada lado da célula sendo um dos lados, colector de luz incidente, o que implica que os contactos tenham de ser transparentes tanto quanto possível. Pode-se usar para este caso um condutor transparente ou metais finos largamente espaçados. O critério principal para a escolha do material para a célula solar é a análise da sua banda energética, cuja energia requer electrões livres apartir de estados fixos. A tensão que atravessa perpendicularmente as faces da célula no circuito aberto é uma fracção (conhecida como factor de voltagem) de energia da banda proibida.

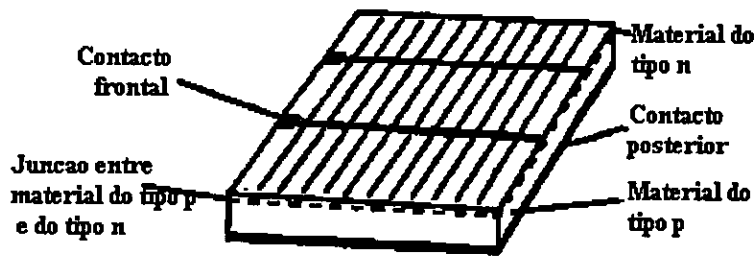


Figura 2.6. Representação de uma célula solar. [Segundo a fonte 1]

### 2.2.3. Modelo de uma célula solar.

Os conversores de energia que produzem electricidade, podem ser geralmente classificados como fontes de tensão ou fontes de corrente como na figura 2.7 abaixo.

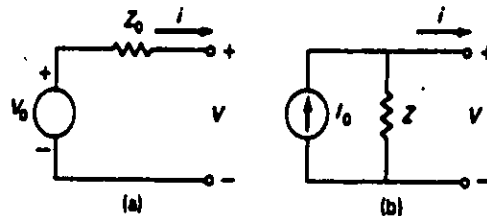


Figura.2.7. Circuito equivalente para a fonte de tensão (a) e para a fonte de corrente (b) [segundo a fonte 4]

Uma célula solar ideal é uma fonte de corrente, mas a célula real é fonte de tensão e de corrente. O circuito equivalente está representado na figura fig. 2.7 de acordo com esta, a corrente útil  $I$  gerada pela célula solar pode ser representada usando a seguinte expressão:

$$I = I_L - I_D - I_{SH}, \quad (2.3)$$

Onde  $I_L$  (A) é fotocorrente,  $I_D$  (A) corrente do diodo e  $I_{SH}$  (A) corrente de ligação a resistência em paralelo  $R_{SH}$  (junção p-n).

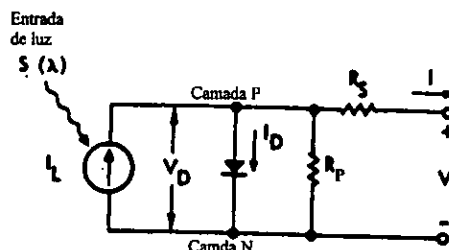


Figura.2.8. Circuito equivalente para uma célula solar. [Segundo a fonte 4]

A equação que descreve o funcionamento de uma célula solar pode ser obtida da teoria do estado sólido e tem a seguinte forma:

$$I = I_L - I_0 \left\{ \exp \left[ \frac{e(V + IR_S)}{AK_B T} \right] - 1 \right\} - \frac{V + IR_S}{R_{SH}} \quad (2.4)$$

Onde:

A – constante arbitrária da curva, que varia entre 1 e 5;

$R_S$  – resistência em série da célula;

$R_{SH}$  – resistência em paralelo da célula;

I – corrente de saída da célula;

$I_L$  – corrente gerada pela luz;

$I_0$  – corrente de saturação de diodo;

e – carga electrónica;

V – tensão na terminal da célula;

$k_B$  – constante de Boltzman.;

T – temperatura absoluta.

$I_0$  é também chamada de corrente de difusão. O seu valor é de cerca de  $10^{-8} \text{ Am}^{-2}$  para células óptimas e  $10^{-7} \text{ Am}^{-2}$  para materiais de silício.

#### 2.2.4. Características eléctricas de uma célula solar.

A característica I-V descreve uma terminal eléctrica de uma célula solar sob influência de condições meteorológicas disponíveis (nível de irradiância e temperatura ambiente). O gráfico  $I=f(V)$  da célula solar ilustrada na figura abaixo passa por três pontos significativos: a corrente de curto circuito  $I_{cc}$ , a tensão de circuito aberto  $V_{ca}$  e a potência máxima em  $P_M$ .

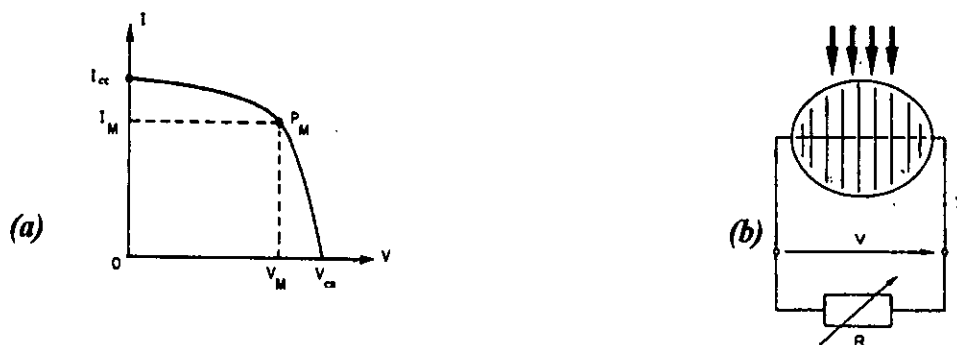


Figura.2.9. (a) Característica I-V da célula solar com a curva constante de potência. (b) Circuito equivalente de um gerador eléctrico. [ Extraída da fonte 4 ].

2.2.4.1. Corrente de curto circuito.

Para  $V=0$ ,

$$I_{CC} = I_f - I_0 \left\{ \exp \left[ \frac{qR_s I_{CC}}{AK_B T} \right] - 1 \right\} - \frac{R_s I_{CC}}{R_p} \quad (2.5)$$

No nível normal de irradiância (sem concentração dos portadores de carga) o efeito da resistência em série é desprezável em condições de curto circuito (ponto  $P_M$  na figura acima) e a corrente de curto circuito pode ser considerada equivalente para a fotocorrente  $I_f$  que é proporcional a irradiância  $E_e$  ( $Wm^{-2}$ ).

$$I_{cc} = I_f = KE_e \quad (2.6)$$

Onde  $K$  é a constante e  $E_e$  ( $Wm^{-2}$ ) é a irradiância.

2.2.6. Tensão de circuito aberto.

A tensão de circuito aberto  $V_{ca}$  corresponde à queda de tensão na junção p-n quando este é atravessado pela fotocorrente  $I_f$ , isto significa que  $I = 0$  na figura 2.7 abaixo. Em condições de circuito aberto, a tensão é dada pela seguinte expressão:

$$V_{ca} = \left( \frac{Ak_B T}{e} \right) \ln \left( \frac{I_f + I_0}{I_0} \right) = \frac{Ak_B T}{e} \ln \left( \frac{KE_e}{I_0} \right), \quad (2.7)$$

O ponto de potência máxima,  $P_{mp}$ , corresponde ao ponto de inflexão da curva I-V. Neste ponto há uma corrente de potência ótima,  $I_{mp}$ , e voltagem de potência máxima  $V_{mp}$ .



Figura 2.10. Célula solar em (a) sob condição de curto circuito e (b) sob condição de circuito aberto.

[Extraído da fonte 4].



Para determinar a qualidade da célula usa-se o factor de Fill, FF, que é a razão entre a potência máxima e o produto  $I_{cc}V_{ca}$ :

$$FF = \frac{V_{mp} I_{mp}}{I_{cc} V_{ca}} = \frac{P_m}{I_{cc} V_{ca}} \quad (2.8)$$

A forma da característica,  $I=f(V)$ , determina o factor de Fill, e este valor é de cerca de 0.7 para células óptimas e é sempre menor que 1.0.

### 2.3. CRITÉRIOS GERAIS A OBSERVAR NA CONSTRUÇÃO DE UMA CÉLULA

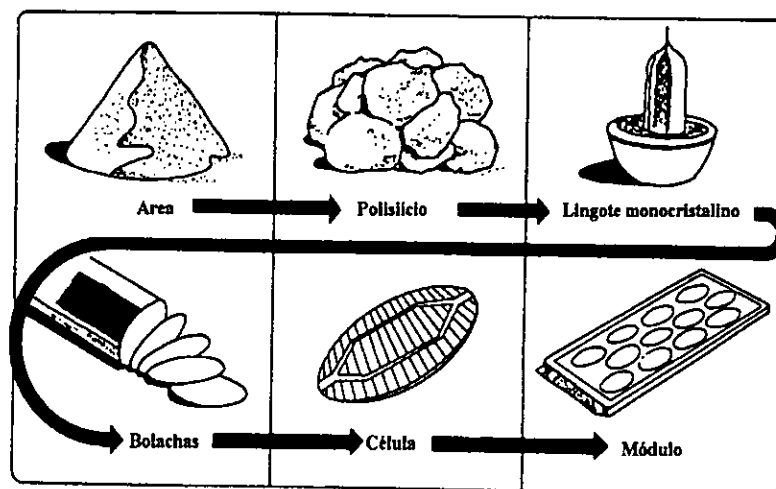
1. A matéria inicial para a construção das células solares deve ser de alta pureza química e com propriedades consistentes.
2. As células devem ser produzidas em massa com custos mínimos, mantendo-se o controle dos processos de produção e dos altos níveis de precisão .
3. produto final deve ter um tempo de vida de pelo menos 20 anos em exposição ao ambiente e mesmo em ambiente hostil. Mesmo sem concentração de insolação a temperatura suportada pela célula deve situar-se num intervalo de  $-30^{\circ}$  à  $+200^{\circ}\text{C}$ . Os contactos eléctricos devem manter-se e todas as formas de corrosão devem ser evitadas. A água, em particular, não deve fazer parte da rede cristalina.
4. No projecto da célula deve haver permissão para a ocorrência de falhas que possam surgir sem que haja uma paragem total do sistema. Deve-se admitir entre as células contactos eléctricos em série e em paralelo para o caso de as células serem defeituosas, impedindo deste modo futuros defeitos em avalanche e consequente falha do sistema.

#### 2.3.1. Processo de manufacturação.

O processo de manufacturação das células fotovoltaicas envolve basicamente três estágios que são os seguintes:

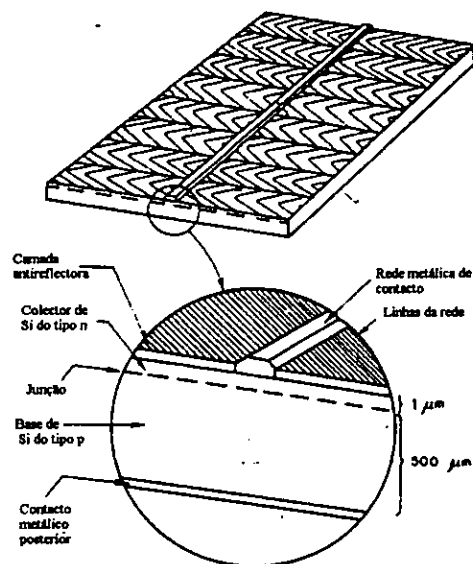
- Preparação do material e emolduramento.
- Processamento da célula.
- Interconecção das células e seu encapsulamento.

O processo tecnológico convencional, demonstrado no diagrama apresentado na fig.2.11. recai basicamente na rede de semicondutores de silício de alta pureza, como os que se encontram disponíveis em desperdícios da indústria electrónica. Neste processo o quartzo como matéria bruta é reduzido à rede metalúrgica de silício, cuja pureza se situa num intervalo entre 98 – 99%.



*Figura.2.11. Processo de fabricação de células solares. [ Segundo a fonte 4]*

Por sua vez a rede metalúrgica de silício é purificada até atingir a chamada rede de semicondutor de silício de alta pureza ou rede electrónica de silício, que é fundida num processo crucial e retirado para formar um lingote de um mono cristal de silício através do uso da tradicional técnica de Czoralski. Os lingotes são cortados em fatias as quais são depois limadas para remover os defeitos causados durante o corte. As fatias são depois processadas em células solares completas realizando a difusão de junção, a elaboração de contactos e superfícies anti-reflectoras e finalmente as células são interconectadas para adquirirem uma tensão praticamente útil. Estas são posteriormente encapsuladas dentro dos módulos usando a técnica de laminação. Na figura 2.12 apresenta-se um exemplo típico de uma célula solar.



*Figura.2.12. Célula solar típica de silício monocristalino de junção p-n. [segundo a fonte 4]*

## 2.4. EFICIÊNCIA DE UMA CÉLULA FOTOVOLTAICA

Os custos do sistema fotovoltaico são em grande medida determinados pela área do colector, que por sua vez, depende da eficiência com que a fracção de radiação solar que alcança a célula solar é convertida em energia eléctrica.

### 2.4.1. Factores que influenciam a eficiência.

A eficiência de uma célula solar, é determinada pelos seguintes factores:

Os fotões luminosos, provenientes da luz solar, cuja energia seja menor que a energia da banda proibida, não são absorvidos e portanto não se convertem em corrente. Para os fotões luminosos que possuem uma energia alta em relação à energia da banda proibida, só parte dessa energia igual a energia da banda proibida será absorvida, sendo a restante dissipada. Estes factores determinam a eficiência máxima possível.

Devido ao facto de as energias em excesso dos fotões se perderem, a eficiência das células só poderá ser alta em materiais cuja energia da banda proibida esteja próxima da média da energia dos fotões da radiação solar.

Algumas perdas são inevitáveis uma vez que os fotões solares alcançam a célula com uma quantidade variada de energia (a cada cor do espectro corresponde uma certa energia). O pico da energia solar situa-se na região do amarelo - esverdeado (com a energia do fotão de cerca de 1.5

eV), o qual está próximo de cerca de 1,45 eV da banda proibida do telurite de cádmio. A largura da banda proibida do silício cristalino é de cerca de 1.1 eV.

Os outros factores de engenharia tais como a reflectância, resistência em série e as recombinações reduzem a eficiência das células actuais para baixo do valor máximo.

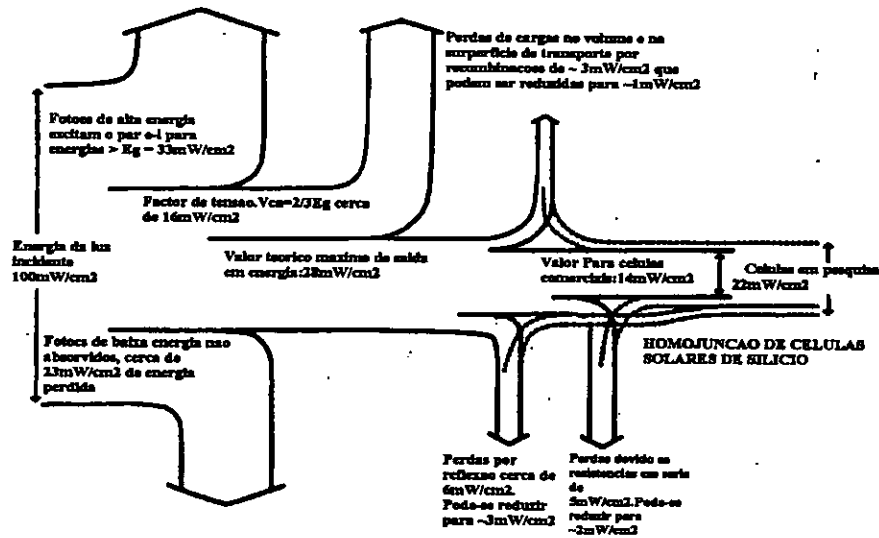


Figura. 2.10. Mecanismo de perdas em homojunções de células solares de silício. [Segundo a fonte]

Para melhorar a eficiência das células solares, muitos limites ao desempenho destas devem ser removidos:

#### 2.4.2 Limites removíveis.

- A luz reflectida, ou perdida, pela superfície da célula pode ser limitada usando variedades de superfícies tratadas.
- As perdas de luz que são reflectidas pelos contactos eléctricos, na parte frontal da célula, podem ser minimizadas redesenhando os eléctrodos ou usando contactos eléctricos transparentes.
- A quantidade de luz que passa através do material semi-condutor sem colisão com electrões pode ser limitada usando materiais selectivos que possuam uma alta capacidade de absorção da luz.
- Os electrões e as lacunas criados pelos fótons podem recombinar-se antes de preencher a junção, não contribuindo deste modo com corrente, se estes preencherem as impurezas ou flutuarem na estrutura cristalina.

- A resistência eléctrica dentro de um semiconductor pode reduzir a energia, mas tais resistências podem ser minimizadas tomando-se uma atenção cuidadosa no desenho das células.
- Os limites impostos na escolha da banda proibida podem ser superados sobrepondo materiais de diferentes bandas proibidas. O topo da junção possui uma largura de banda maior que captura apenas os fotões mais energéticos (luz azul), e admite a passagem de fotões de outras cores para as camadas mais com banda de pouca largura para capturar fotões de menor energia (luz vermelha).

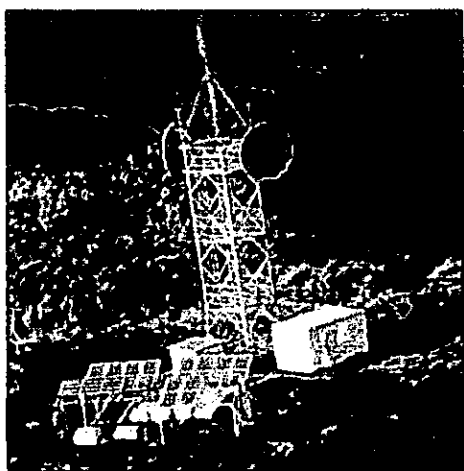
#### *2.4.3. Limites não removíveis.*

As células fotovoltaicas possuem eficiência limitada causada por muitas perdas, sendo algumas dessas perdas evitáveis. Outras são intrínsecas ao sistema. Alguns limites são óbvios e podem ser independentemente controlados, mas os outros são complexos e não podem ser controlados sem produzir efeitos interrelacionados. Por exemplo, incrementando uma concentração dopante pode-se ter ao mesmo tempo um efeito vantajoso e outro prejudicial. Concentrações dopantes de níveis elevados são frequentemente perniciosos para a operação de uma célula solar pois não contribuem para diminuição da resistência do material, alguns (Au, Cu, Ag) difundem-se rapidamente e contribuem para a instabilidade da célula, e podem contribuir para uma recombinação rápida dos pares gerados e reduzir o percurso de difusão das cargas minoritárias.[2]

### **3. APLICAÇÕES**

As maiores aplicações da tecnologia fotovoltaica são as telecomunicações, a iluminação, a electrificação rural, a refrigeração e o bombeamento de água. Com o declínio dos preços dos módulos dos sistemas fotovoltaicos, uma larga área de aplicações tem aumentado consideravelmente. Desde as pequenas e médias instalações para uma rede ampla de sistemas de microondas e agora sistemas fotovoltaicos que competem directamente com geradores a diesel.

### 3.1. TELECOMUNICAÇÕES



As telecomunicações têm tido uma expansão muito rápida e por isso tem-se recorrido a sistemas fotovoltaicos como fonte de energia. Actualmente, repetidores em áreas rurais remotas consomem cerca de 100 Watts para um canal de TV e 1000 canais telefónicos. Estes possuem uma pequena potência requerida que pode ser efectivamente fornecida por um gerador fotovoltaico, de baixo custo e de grande fiabilidade.

*Figura 3.1. Aplicação do sistema fotovoltaico em Telecomunicações [Extraído da fonte 5].*

### 3.2. ILUMINAÇÃO

Em áreas onde não há electricidade, as fontes de luz são lâmpadas de querosene ou velas, tanto para o uso doméstico como para aplicações comerciais. Em geral, a luz proveniente destas fontes é de baixa qualidade e constitui um perigo de um eventual incêndio.

A iluminação proveniente de um sistema fotovoltaico tem se tornado disponível desde os últimos 5 anos, com os produtores destes sistemas a oferecerem dois tipos básicos de unidades fotovoltaicas, uma para áreas de iluminação e outras para aplicações domésticas. Estes sistemas consistem de módulos fotovoltaicos, reguladores simples de tensão, um cronómetro comutável uma lâmpada de sódio ou de vapor de mercúrio.

### 3.3. ELECTRIFICAÇÃO RURAL

Há hoje duas aproximações principais usadas na electrificação rural: redes de electrificação, extensivas, para cobrir muitas áreas seleccionadas, ou o gerador a diesel que é instalado para servir uma rede muito pequena a qual não está conectada à rede principal. Essas duas aproximações têm sido associadas a problemas económicos e técnicos. Estender a rede para distâncias ainda maiores tem sido uma opção muito dispendiosa, uma vez que os consumidores são poucos. Isto produz um factor de consumo muito baixo.

Os geradores a diesel requerem um abastecimento constante de combustível o que pode representar problemas para áreas remotas. Nas mesmas áreas o sistema fotovoltaico pode ser uma óptima alternativa a uma central diesel. A escolha depende fundamentalmente de problemas associados com a extensão da rede opcional e da opção a uma pequena central a diesel.

### 3.4. REFRIGERAÇÃO.

A maioria das doenças endémicas podem ser actualmente controladas nos países em desenvolvimento através da imunização dos seres humanos e dos animais por vacinação. É muito importante que as vacinas sejam mantidas a temperaturas muito baixas (usualmente abaixo de 5°C). Usualmente nem sempre é possível manter estas temperaturas ao nível das zonas rurais onde se usa na maior parte dos casos pequenos refrigeradores que usam geradores de querosene.

O gerador fotovoltaico tem mostrado um grande potencial para um melhor desempenho, e com custos bastante baixos, de grande fiabilidade e de um período de vida longo em comparação aos refrigeradores com geradores a diesel ou a querosene.

### 3.5. BOMBEAMENTO DE ÁGUA



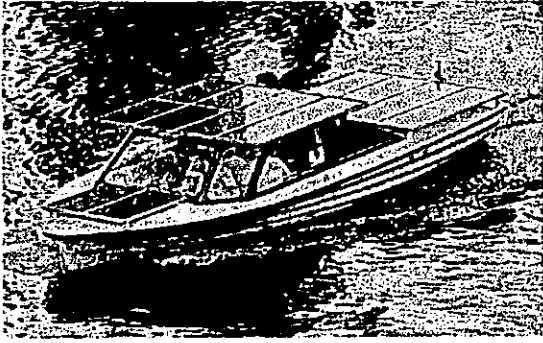
Cerca de metade da população mundial não possui um sistema adequado de abastecimento de água. A produção de alimentos é de longe a actividade mais importante em muitas regiões e a irrigação é essencial para produção destes mesmos alimentos. O bombeamento de água é portanto uma necessidade básica para uma larga escala de população rural a nível mundial que vivem em zonas tropicais ou subtropicais.

*Figura 3.2. Sistema de bombeamento de água à energia solar. [Extraído da fonte 5]*

Tradicionalmente a água é trazida a superfície a mão ou com ajuda de animais, enquanto que a principal fonte de energia mecanizada para áreas rurais no mundo são motores de combustão interna. Existem outros mecanismos como o uso da energia eólica e actualmente o uso do sistema fotovoltaico.

O sistema fotovoltaico tem se tornado um atractivo na área de bombeamento de água nas zonas rurais nos países em desenvolvimento pois este não depende de combustíveis mas apenas da luz solar, este é confiável e requer pouca manutenção e também tem sido fácil armazenar a água devido a natureza variável da luz solar. Os sistemas fotovoltaicos podem competir nesta área com as bombas a diesel e em muitas vilas são necessários apenas geradores de pouca potência e uma pequena área de painel.

### 3.6. OUTRAS APLICAÇÕES



*Figura 3.3. Uso de tecnologia fotovoltaica na área de transportes. [Segundo a fonte 5]*

Existem outras aplicações nos quais os fotovoltaicos podem contribuir em larga escala, tais como baterias de carga, energia para a televisão e rádios em áreas rurais nos países em desenvolvimento, ajuda a navegação, protecção de condutas. São também usados em produtos de consumo tais como calculadoras, relógios, etc.

## 4. METODOLOGIA PARA ANÁLISE DA DEGRADAÇÃO DAS CÉLULAS SOLARES.

### 4.1 MÉTODO GERAL

O desempenho de um módulo fotovoltaico é determinado pela exposição deste à luz do sol estável (em condições naturais ou de simulações) traçando-se a característica de tensão-corrente (I-V), para um determinado valor de radiação e de temperatura. Em condições padrão esses valores são de  $1000\text{Wm}^{-2}$  e  $25^{\circ}\text{C}$  de temperatura.

#### 4.1.1. Requisitos gerais para as medições

- a) As temperaturas devem ser medidas com uma precisão de  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ .
- b) A corrente e a tensão devem ser medidos com precisão de  $\pm 0.5\%$ , usando eléctrodos com terminais do módulo e da célula de referência

#### 4.1.2. Característica tensão corrente para a luz natural do Sol

Medições realizadas com a luz natural do Sol requerem condições de radiação estáveis, com flutuações menores que  $\pm 1\%$ . Para objectivos de avaliação, a radiação deve estar pelo menos à  $800\text{Wm}^{-2}$ . O procedimento usado é o seguinte:

- (a) Monta-se a célula de referência próxima e de modo coplanar ao módulo numa plataforma facilmente ajustável e conectam-se estes a instrumentos de teste como se mostra na figura 4.1



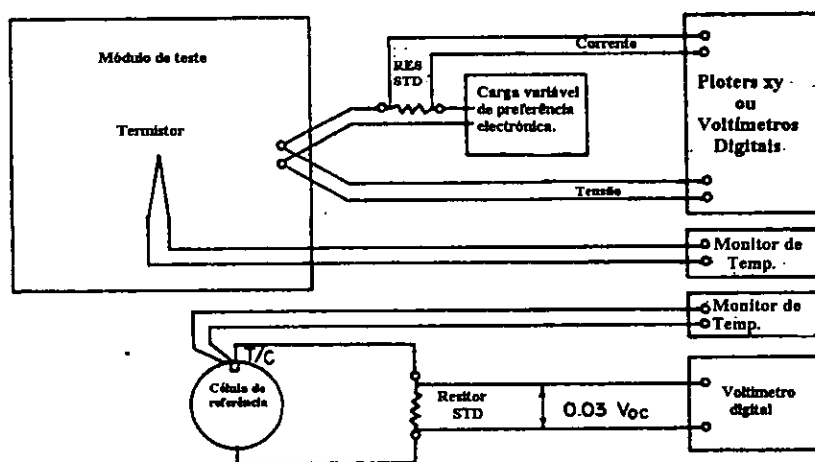


Figura 4.1. Módulo de teste com a célula de referência. [Extraído da fonte 4]

(b) Orientar a célula de referência e o referido módulo no plano normal (dentro de um ângulo de  $\pm 10^\circ$ ) para radiação solar directa .

(c) Proteger o módulo do sol e do vento até a sua temperatura tornar-se igual à temperatura ambiente.

d) Remove-se a protecção do módulo e inicia-se o registo das características I-V e da temperatura do módulo. Ao mesmo tempo, regista-se a corrente de curto circuito e temperatura da célula de referência. Se a temperatura da célula de referência for diferente em mais de  $2^\circ\text{C}$  em relação a temperatura anteriormente calibrada, deve-se realizar um ajustamento adequado ao valor de calibração .

(e) Converter a característica medida para a radiação e temperatura desejáveis.

#### 4.1.3. Conversão da característica tensão-corrente

A característica tensão-corrente, representada na figura 2.6, medida pode ser convertida para condições padrão de teste, ou outras temperaturas e radiações que estejam num intervalo de  $\pm 30\%$  do nível em que as medições forem feitas, aplicando as seguintes equações :

$$I_2 = I_1 + I_{cc} \left[ \left( \frac{I_{cc}}{I_{mr}} \right) - 1 \right] + \alpha(T_2 - T_1) \quad (4.1)$$

$$V_2 = V_1 - R_s(I_2 - I_1) - KI_2(T_2 - T_1) + \beta(T_2 - T_1) \quad (4.2)$$

Onde  $I_1$ ,  $V_1$  são coordenadas do ponto da característica medida,  $I_2$ ,  $V_2$  são coordenadas do ponto correspondente da característica convertida,  $I_{cc}$  é a corrente de curto circuito medida no módulo,  $I_{mr}$ , corrente de curto circuito da célula de referência,  $I_{cr}$  corrente de curto circuito da célula de referência nas condições padronizadas ou de radiação desejada,  $T_1$  é a temperatura do módulo medida,  $T_2$  é outra temperatura padrão,  $\alpha$  e  $\beta$  são coeficientes de corrente e de tensão do módulo as condições padrão ou as condições de radiação desejada. Dentro de um intervalo de temperatura de interesse ( $\beta$  é negativo),  $R_S$  é resistência interna em série do módulo e  $K$  é o factor de correcção da curva.

## 4.2. MÉTODO EXPERIMENTAL ESCOLHIDO

### 4.2.1. Descrição do método.

A conversão eficiente pode ser calculada como a taxa de potência eléctrica óptima  $P_{opt}$  fornecida pela célula, proveniente da irradiação solar,  $E_e$ , recebida a uma dada temperatura como se mostra na formula seguinte:

$$\eta = \frac{P_{opt}}{AE_e} \quad (4.3)$$

Onde a potência óptima  $P_{opt}$  é dada em Watts, a irradiância  $E_e$  em Watts por metro quadrado e  $A$  é a área da célula em metros quadrados.

Este método embora não ofereça uma precisão desejada como no método anterior do cálculo da característica tensão-corrente, foi escolhido devido ao facto de não possuímos instrumentos de precisão para o método anterior. Os módulos em teste apresentavam no início, uma eficiência de aproximadamente 12%, e atendendo a diversos factores ambientais e o longo tempo de uso, esta eficiência pode sofrer redução .

Para calcular a eficiência escolhe-se alguns dias de cada mês onde a radiação solar e a temperatura do dia tenham produzido uma potência satisfatória, soma-se a energia da radiação solar dada em (kWhm<sup>-2</sup>) ao longo das horas em que se produz uma potência útil, e soma-se a potência útil do dia, sendo a eficiência dada pela equação (4.3).

Sabe-se que a área da célula é de 102,9cm<sup>2</sup>, então, a área do painel solar, em estudo, será o produto da área  $A$  da célula pelo número de células dentro do módulo e pelo número de módulos no painel ou seja: 16x3 x12x102,9cm<sup>2</sup>.  $\eta$  determina a eficiência da célula durante o dia.

Para analisar a degradação ambiental das células solares de silício cristalino em estudo, faz-se a análise do gráfico de eficiência, traçado com base nos resultados obtidos.

#### 4.2.2. Descrição do material usado.

Foram usados painéis solares com um total de dezesseis módulos e 36 células perfazendo uma área de 5.927m<sup>2</sup> posicionados num ângulo de 30°, componentes do sistema de monitorização que são os sensores de radiação (2 piranômetros estando um no plano inclinado do painel e outro no plano horizontal), 2 termopares, Datalogger e computador. A figura 4.2 ilustra o esquema montado para um sistema de bombeamento de água subterrânea com uma capacidade de 10m<sup>3</sup> por dia para uma comunidade de 250 pessoas.

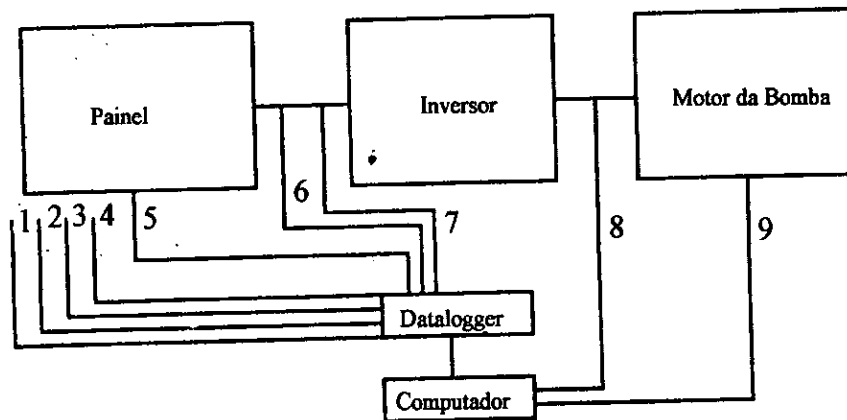


Figura 4.2. Esquema de medição da eficiência de um sistema de bombeamento de água. [Extraído da fonte 1]

#### Legenda

- |  |                                  |
|--|----------------------------------|
| 1. Radiação solar na superfície horizontal . | 5. Temperatura da célula .       |
| 2. Radiação solar no plano inclinado.        | 6. Tensão .                      |
| 3. Temperatura ambiente.                     | 7. Corrente .                    |
| 4. Velocidade do vento .                     | 8. Corrente alternada de saída . |
|  | 9. Fluxo bombeado.               |

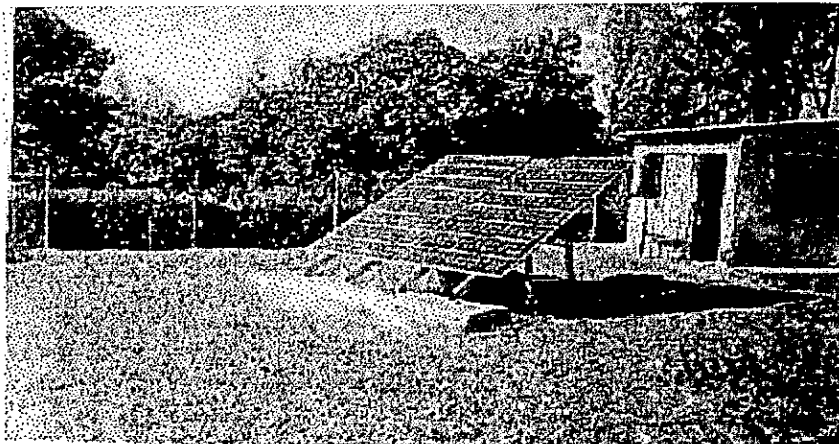


Figura 4.3. Gerador fotovoltaico usado na experiência.

## 5. TRATAMENTO DE DADOS COLHIDOS E DISCUSSÃO DE RESULTADOS.

A actividade de pesquisa teve lugar durante o período de 1 de Julho de 1997 a 30 de Junho de 1998. O *datalogger* do tipo *Campbell Scientific 21X* permitiu a recolha de dados instantâneos medidos pelos sensores em cada 5 segundos (da irradiância, temperatura, velocidade do vento, tensão contínua, corrente contínua, e energia). Em cada hora esses dados eram internamente processados pelo *datalogger* a fim de se obter as médias horárias. Alguns dados, como o fluxo de água, foram lidos directamente no contador de água, por dificuldades de funcionamento deste instrumento em ligação com o *datalogger*.

Os dados gerados pelo *datalogger* eram regularmente transferidos para um computador do tipo PC para a sua análise. A folha de cálculo *EXCEL for Windows 95* foi usada para fins de análise dos dados. Nas próximas secções são apresentados os resultados mais importantes.

### 5.1. APRESENTAÇÃO DE DADOS COLHIDOS PELO DATALOGGER E EFICIÊNCIA CALCULADA

Na tabela a seguinte tem-se a eficiência correspondente a um dia normal (céu limpo).

TABELA.5.1. Média de radiação e eficiência por hora de um dia. (12 de Julho de 1997).

Horas	Radiação Horizontal (W/m <sup>2</sup> )	Eficiência do painel durante o dia (η%)
05.00	0.313	0.000
06.00	0.345	0.000
07.00	3.856	6.900
08.00	113.7	10.80
09.00	294.5	11.98
10.00	453.6	11.90
11.00	569.2	11.60
12.00	632.3	11.20
13.00	629.0	11.30
14.00	564.1	11.10
15.00	428.4	11.30
16.00	235.8	11.10
17.00	28.51	9.100
18.00	2.338	0.000
19.00	0.342	0.000

Nas primeiras horas da manhã e no final do dia, o índice de radiação solar é fraco e não estimula a produção de electricidade, por isso a eficiência neste período é igual a zero. A medida que a radiação solar aumenta ao longo do dia, a eficiência é rapidamente incrementada atingindo valores máximos e diminuindo em seguida a medida que diminui o índice de radiação. Nesta tabela, observa-se o valor máximo de eficiência as 9 horas e logo verifica-se uma diminuição gradual apesar do índice de radiação continuar a subir, pois nesta altura a temperatura também aumenta tornando-se prejudicial ao bom desempenho da célula.

**TABELA.5.2** Médias diárias escolhidas da radiação, temperatura, energia e eficiência colhidas em cada mês, durante o período de 1 de Julho de 1997 a 30 de Junho de 1998. (Foram escolhidos três dias de céu limpo)

Ano	Dia/Mês	Radiação Horizontal (k W/m <sup>2</sup> )	Radiação no Plano Inclinado (kW/m <sup>2</sup> )	Temperatura Ambiente (em°C)	Temperatura do painel. (em°C)	Energia. (kWh)	Eficiência do painel η(%)
1997	02 – Jul.	3.856	6.082	21.12	30.45	4.111	11.40
1997	12 – Jul.	3.953	6.137	22.65	31.68	4.152	11.41
1997	15 – Jul.	3.919	6.010	21.68	30.84	4.011	11.26
1997	03 – Ago.	4.617	6.729	21.80	29.31	4.535	11.38
1997	07 – Ago.	4.696	6.666	21.78	30.66	4.469	11.31
1997	24 – Ago.	4.697	6.067	23.79	33.87	4.110	11.49
1997	06 – Set.	4.975	6.090	27.41	34.28	4.040	11.19
1997	16 – Set.	4.291	6.273	24.28	33.48	4.241	11.41
1997	18 – Set.	6.180	7.267	24.72	34.54	4.820	11.19
1997	03 – Out.	6.089	6.618	27.34	35.17	4.479	11.42
1997	06 – Out.	5.747	6.193	24.68	28.02	4.153	11.31
1997	18 – Out.	6.659	6.939	22.87	32.27	4.627	11.25
1997	01 – Nov.	7.261	6.975	25.95	33.92	4.641	11.25
1997	02 – Nov.	6.689	6.535	29.11	36.64	4.382	11.31
1997	19 – Nov.	7.439	6.781	25.44	33.84	4.443	11.06
1997	09 – Dez.	7.494	6.775	28.25	37.49	4.456	11.09
1997	20 – Dez.	6.880	7.763	26.77	35.74	4.549	11.15
1997	21 – Dez.	7.468	6.528	26.69	33.78	4.331	11.19
1998	04 – Jan.	6.885	6.493	28.19	36.83	4.277	11.11
1998	05 – Jan.	7.268	6.598	28.79	36.86	4.305	11.01
1998	13 – Jan.	7.016	6.416	28.18	35.41	4.212	11.08
1998	01 – Fev.	6.348	6.220	28.46	36.29	4.064	11.02
1998	02 – Fev.	6.516	6.313	29.66	37.28	4.082	10.91
1998	13 – Fev.	6.612	6.523	30.17	38.91	4.269	11.04
1998	01 – Mar.	6.110	6.481	30.95	39.52	4.226	11.00
1998	02 – Mar.	673.4	7.146	30.51	37.32	4.628	10.93
1998	14 – Mar.	5.637	6.232	27.31	30.71	4.139	11.21
1998	19 – Abr.	4.997	6.064	26.57	34.79	4.077	11.34
1998	21 – Abr.	4.679	6.205	26.57	34.07	4.196	11.41
1998	23 – Abr.	4.905	6.582	27.27	34.34	4.428	11.35
1998	10 – Mai.	4.450	6.395	26.65	30.02	4.401	11.61
1998	12 – Mai.	4.249	6.253	24.47	30.62	4.193	11.31
1998	14 – Mai.	4.119	6.125	23.26	31.13	4.114	11.33
1998	07 – Jun.	3.895	6.099	23.75	30.80	4.055	11.22
1998	16 – Jun.	3.728	5.780	21.45	30.35	3.853	11.25
1998	18 – Jun.	3.647	5.657	24.16	32.58	4.055	11.38
Mínimo		3.647	5.657	21.12	28.02	3.853	10.91
Máximo		7.494	7.763	30.95	39.52	4.820	11.61
Média		5.575	6.445	25.91	33.72	4.281	11.24

Na tabela 5.3 estão apresentadas as médias mensais de temperatura do painel, radiação no plano inclinado, potência e eficiência segundo os dados da tabela acima dada.

**TABELA 5.3.** Médias mensais da radiação e temperatura para e eficiência calculada no plano inclinado, para dias de céu limpo extraídas da tabela 5.2.

Ano	Mês	Radiação Plano Inclinado do Painel. (kW/m <sup>2</sup> )	Temperatura do Painel em (°C)	Energia (kWh)	Eficiência do painel η%
1997	Jul.	6.076	30.99	4.091	11.36
1997	Ago.	6.487	31.28	4.371	11.39
1997	Set.	6.543	34.10	4.367	11.26
1997	Out.	6.583	31.82	4.420	11.33
1997	Nov.	6.758	34.80	4.489	11.21
1997	Dez.	7.022	35.67	4.445	11.11
1998	Jan.	6.502	36.37	4.265	11.07
1998	Fev.	6.352	37.49	4.138	10.99
1998	Mar.	6.620	35.85	4.331	11.05
1998	Abr.	6.284	34.40	4.234	11.37
1998	Mai.	6.438	30.59	4.236	11.42
1998	Jun.	5.845	31.24	3.988	11.28
Valor Médio		6.459	33.72	4.281	11.24

A variação da eficiência ao longo do ano é quase insignificante e depende da quantidade de radiação no plano inclinado do painel e da temperatura do mesmo. Como exemplos, observa-se nos meses de Agosto de 1997 uma eficiência de ~11.4% e Junho de 1998 uma eficiência de ~11.3%. Os valores de temperatura neste caso são quase os mesmos sendo ~31°C para os dois meses, no entanto, a radiação é alta em agosto com cerca de 6.5kWh/m<sup>2</sup> e baixa em Junho com cerca de 5.8 kWh/m<sup>2</sup>. Num outro exmplo nos meses de Agosto 1997 cuja eficiência é de ~11.4% e Janeiro de 1998 com ~11.1%, neste caso o índice de radiação é de ~6.5kWh/m<sup>2</sup> para os dois meses e a temperatura é baixa em Agosto com cerca de 31°C, e alta em Janeiro com cerca de 36°C.

A eficiência mais baixa registada foi de 10.99% no mês de Fevereiro 1998 onde a temperatura do painel subiu até ~37.5°C sendo esta, a média de temperatura mais alta registada. A eficiência mais alta foi de 11.42% registada em Maio de 1998 onde a temperatura foi até ~30.6°C. Para estes dois casos o índice de radiação foi de ~ 6.4 kWh/m<sup>2</sup>. No mês onde o índice de radiação registado foi o mais alto, em Dezembro de 1997, a eficiência foi de ~11.0% pois a temperatura do pinel também foi alta ~36°C.

## 5.2. CÁLCULO DE ERROS.

Usando a teoria de erro, calcula-se os erros absolutos e relativos da eficiência e tem-se :

### *Erro de eficiência*

$\Delta E_{\eta} = 0.105$  Erro Absoluto.

$\Delta \eta = 11.24$  Valor médio da eficiência.

$$E_r = \frac{\Delta \eta}{\eta} = 0.009 = 0.9\% \sim 1\%$$

### *Erro do painel*

$E_r V_{DC} = 0.005\%$  [Segundo a fonte 1]

$E_r I_{DC} = 0.005\%$  [Segundo a fonte 1]

$\Delta E_{E_e} = 0.269$  Erro Absoluto

$\Delta E_e = 6.445$  Valor Médio.

$$E_r = \sqrt{\left(\frac{\Delta V_{DC}}{V_{DC}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I_{DC}}{I_{DC}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta E_e}{E_e}\right)^2} = \sqrt{(0.0005)^2 + (0.0005)^2 + (0.04)^2} = 0.04 = 4.0\%$$

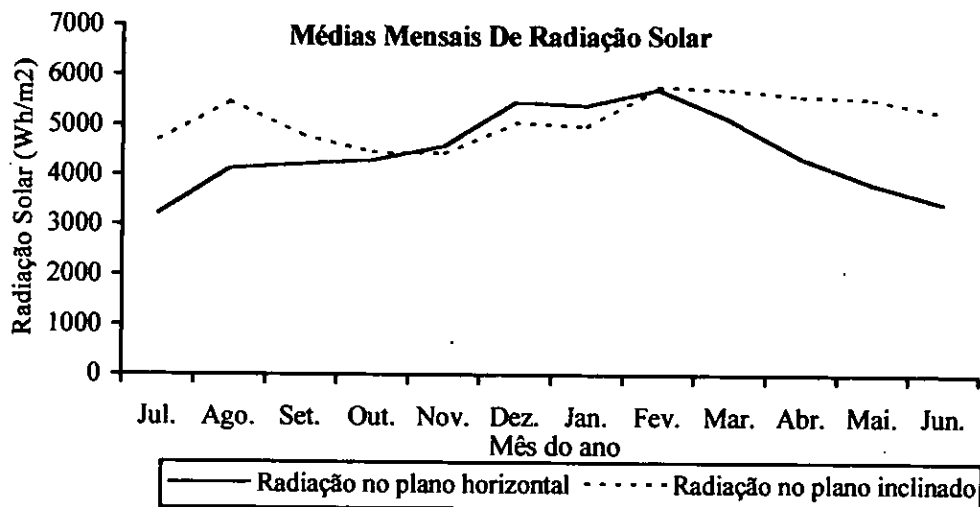
De acordos com os dados extraídos da tabela 4.2 e os erros aqui calculados a eficiência média do painel durante o período em análise é de  $\eta\% = (11.24 \pm 0.09)\%$ .

**TABELA. 5.4.** Médias mensais de temperatura e de radiação correspondente a todos os dias de cada mês, durante o período de 1 de Julho de 1997 a 30 de Junho de 1998.

Tempo	Médias Diurnas Mensais		Médias Nocturnas Mensais		Médias Mensais de Temperatura		Médias Mensais de Radiação Solar		
	Temperatura ambiente (°C)	Temperatura do painel. (°C)	Temperatura ambiente. (°C)	Temperatura do painel (°C)	Temperatura ambiente (°C)	Temperatura do painel. (°C)	Radiação horizontal [kWh/(m <sup>2</sup> /dia)]	Radiação no plano inclinado. [kWh/(m <sup>2</sup> /dia)]	
1997	Jul.	21.91	28.74	16.77	15.96	19.13	21.76	3.213	4.693
1997	Ago.	23.37	30.43	18.15	17.17	21.54	24.67	4.117	5.475
1997	Set.	32.07	35.24	20.09	19.39	22.58	25.29	4.212	4.796
1997	Out.	24.09	29.51	20.14	19.49	22.22	24.83	4.289	4.455
1997	Nov.	25.97	31.58	22.23	21.79	24.22	27.11	4.582	4.441
1997	Dez.	26.57	32.44	22.84	22.34	25.58	28.97	5.456	5.035
1998	Jan.	28.54	35.14	24.48	24.05	26.83	30.41	5.387	4.966
1998	Fev.	29.00	36.67	24.73	24.16	27.08	31.09	5.717	5.769
1998	Mar.	29.25	37.08	24.25	23.59	26.75	30.57	5.116	5.707
1998	Abr.	27.17	34.56	22.60	21.87	24.96	28.27	4.344	5.576
1998	Mai.	25.04	31.83	19.92	19.02	22.41	25.26	3.828	5.521
1998	Jun.	25.53	30.37	17.82	16.85	20.33	22.79	3.426	5.231
	Mínimo	21.91	28.74	16.77	15.96	19.13	21.76	3.213	4.441
	Máximo	32.07	37.08	24.73	24.16	27.08	31.09	5.717	5.769
	Médio	26.54	32.80	21.17	20.47	23.64	26.75	4.474	5.139

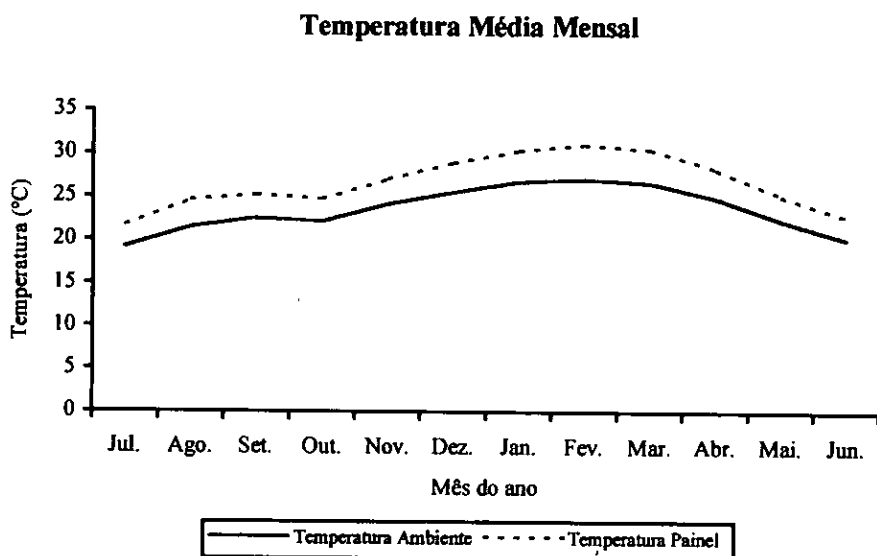


### 5.2.1 Apresentação de gráficos dos resultados obtidos.



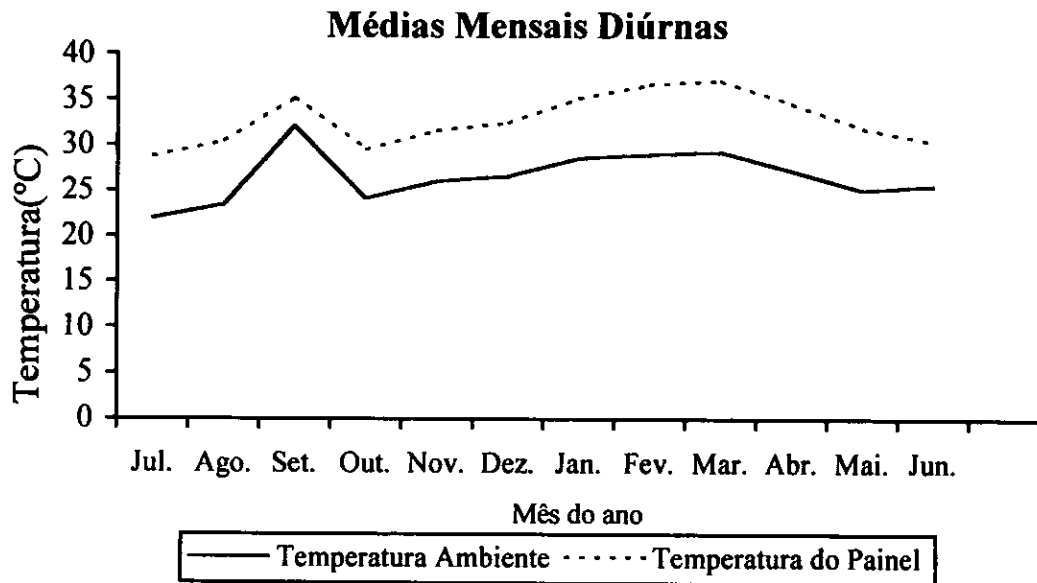
**Figura.5.1.** Variação comparativa da radiação solar no plano inclinado e no plano horizontal ao longo de um ano, período que se estende de 1 de Julho de 1997 a 30 de Junho de 1998. (Tabela 5.4).

O índice de radiação absorvido pelo painel é geralmente mais alto que o da radiação horizontal devido ao facto deste absorver também radiação difusa excepto nalguns meses de verão em que a radiação directa é mais alta que a absorvida pelo painel. Isto deve-se ao ângulo de inclinação do painel pois no inverno a radiação cai directamente no plano inclinado.



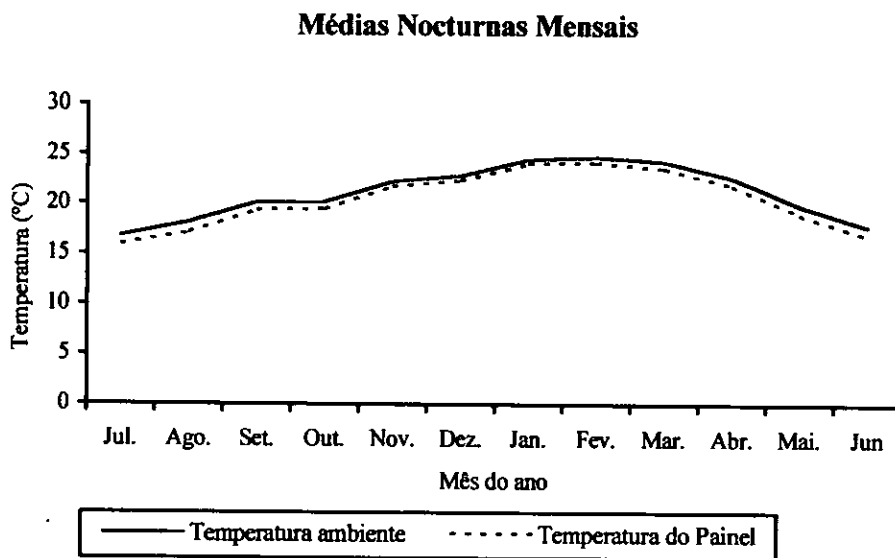
**Figura.5.2:** Variação comparativa de temperaturas do ambiente e do painel ao longo 12 mensais correspondente ao período de 1 de Julho de 1997 a 30 de Junho de 1998. (Tabela 5.4).

A temperatura ambiente e a do painel, ao longo do ano, sofrem as mesmas flutuações de acordo a estação do ano, subindo no verão e descendo no inverno, sendo a do painel sempre mais que a temperatura ambiente.



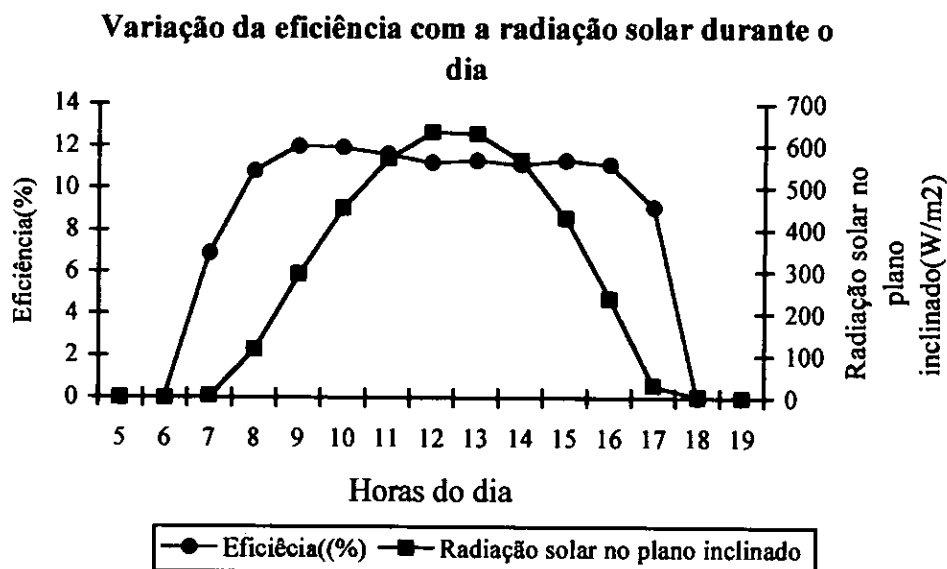
**Figura 5.3.** Variação comparativa de temperaturas do ambiente e do painel diurnas ao longo de 12 meses correspondente ao período de 1 de Julho de 1997 a 30 de Junho de 1998. (Tabela 5.4).

Durante o dia a temperatura do painel é mais alta pois neste período o painel encontra-se em funcionamento. Também neste caso se verificam flutuações de acordo com a estação do ano.



**Figura 5.4.** Variação comparativa de temperaturas nocturnas do ambiente e do painel ao longo de 12 meses correspondente ao período de 1 de Julho de 1997 a 30 de Junho de 1998. (Tabela 5.4).

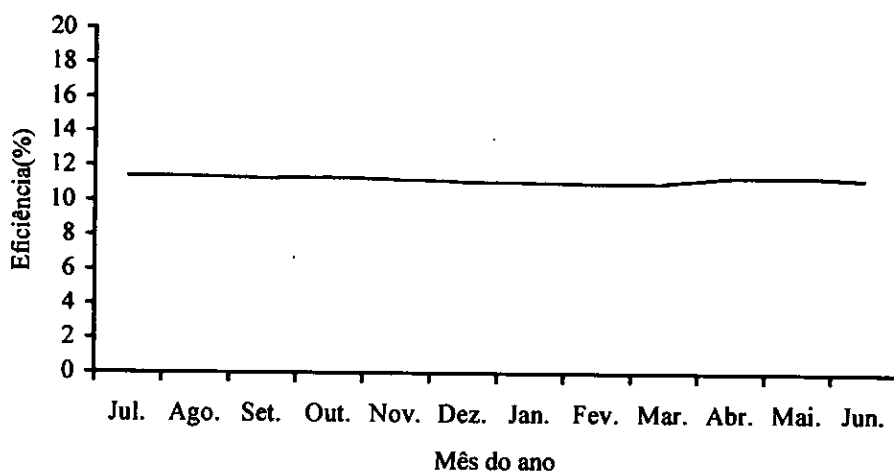
As flutuações no período nocturno, tanto para a temperatura ambiente como para a do painel, estão também relacionadas com a estação do ano mas, neste caso, a temperatura ambiente é sempre mais alta que a do painel pois nesta altura o painel não gera potência.



**Figura 5.5.** Varição da eficiência com a radiação solar ao longo do dia 12 de Julho de 1997 (tabela 5.1)

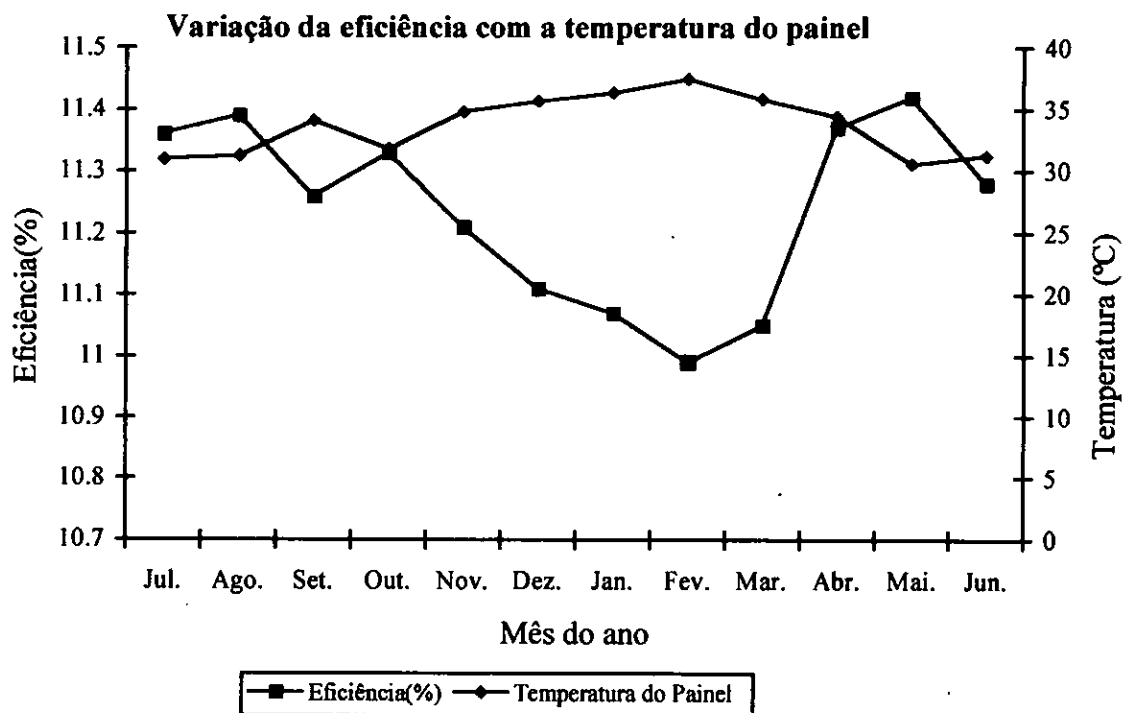
Nas primeiras horas e no final do dia, a eficiência é igual a zero pois o índice de radiação não é suficiente para estimular a produção de electricidade, mas a medida que o índice sobe para níveis desejáveis ao funcionamento do painel, a eficiência é rapidamente incrementada atingindo valores máximos entre o índice máximo de radiação solar as doze horas. Nesta altura observa-se um ligeiro declínio da curva de eficiência e voltando a subir no início da descida a curva de radiação e descendo logo em seguida a medida que diminui o índice de radiação.

**Gráfico de Eficiência**



**Figura 5.6.** Variação da eficiência ao longo de 12 meses correspondente ao período de 1 de Julho de 1997 a 30 de Junho de 1998. (Tabela 5.2).

A variação dos valores de eficiência ao longo do ano foi praticamente insignificante como se pode mostrar nesta figura.



**Figura 5.7.** *Variação comparativa entre temperatura do painel e de eficiência do painel no intervalo de variações de 10.7% a 11,5%, ao longo de 12 meses correspondente ao período de 1 de Julho de 1997 a 30 de Junho de 1998. (Tabela 5.2)*

A tensão, na célula, diminui 0.5% para cada grau acima da temperatura padrão de 25°C [7]. Experimentalmente  $I_{cc}$  para células ótimas de Si é aproximadamente constante com um incremento lento da temperatura. O decréscimo da tensão de circuito aberto e do factor de Fill (ff), provêm da variação na densidade das cargas. O valor da corrente das cargas minoritárias  $I_0$  é exponencialmente incrementada com o decréscimo do valor  $1/T$  causando o decréscimo quase linear da tensão de circuito aberto  $V_{ca}$ , por outro lado próximo dos 25°C, a eficiência decresce a uma taxa de -0.05% para cada grau Celsius ou seja [2].  $\frac{\Delta \eta}{\Delta T} = -0.05\%$

A variação da tensão com a temperatura é demonstrada na equação seguinte:

$$V_{ca} = \left( \frac{kT}{q} \right) \ln \left( \frac{I_{cc}}{I_0} \right) \quad (5.1)$$

Para as células solares de homojunção a base de silício a eficiência é dada na equação a seguir:

$$\eta_s = \frac{V_{ca} I_{cc}}{P_m} ff \quad (5.2)$$

## 6. CONCLUSÕES

1. Durante o período experimental, que durou de 1 de Julho de 1997 a 30 de Junho de 1998, a média anual de radiação solar calculada foi de  $4.47 \text{ kWh}/(\text{m}^2/\text{dia})$ , sendo o valor máximo de  $7.49 \text{ kWh}/(\text{m}^2/\text{dia})$  observado à 09 de Dezembro de 1997 e a média mensal mínima observado foi de  $3.21 \text{ kWh}/(\text{m}^2/\text{dia})$  em Julho de 1997. U.M. Gómez [1] achou uma média de  $4.93 \text{ kWh}/(\text{m}^2/\text{dia})$  usando dados de 10 anos, período que decorreu desde 1973 a 1982, colectados pelo Instituto de Meteorologia. No trabalho de Gómez o mínimo observado foi de  $3.03 \text{ kWh}/(\text{m}^2/\text{dia})$  em Julho de e o máximo de  $7.75 \text{ kWh}/(\text{m}^2/\text{dia})$  em Dezembro. Num outro trabalho de B. C. Cuamba [1] que durou 6 meses período que vai de 1 de Janeiro a 30 de Junho de 1995, o valor médio observado foi de  $4.63 \text{ kWh}/(\text{m}^2/\text{dia})$ , sendo o máximo de  $6.27 \text{ kWh}/(\text{m}^2/\text{dia})$  e o mínimo mensal de  $3.35 \text{ kWh}/(\text{m}^2/\text{dia})$ . No presente trabalho, os dados obtidos possuem uma boa aproximação em relação aos resultados anteriormente descritos e as diferenças encontram-se dentro dos limites de variação da radiação solar. Por outro lado conclui-se que a radiação solar é alta e propícia para o desenvolvimento da tecnologia fotovoltaica, pois a média mensal mínima requerida para um desempenho efectivo, é de  $2.8 \text{ kWh}/(\text{m}^2/\text{dia})$ .

2. A eficiência das células solares é baixa no verão apesar da radiação solar ser alta. Isto deve-se provavelmente a temperaturas altas verificadas neste período. O valor mínimo observado foi de 10.9% a 2 de Fevereiro de 1998 onde a temperatura foi de  $29,66^\circ\text{C}$ , para a temperatura máxima que foi de  $30,95^\circ\text{C}$  a 1 de Março de 1998 a eficiência atingiu os 11%. No inverno ou na transição de uma estação para outra, a eficiência volta a subir atingindo níveis consideravelmente bons sendo o valor máximo atingido neste período o de 11.61% observado a 10 de Maio de 1998 a uma temperatura de  $26,65^\circ\text{C}$  aproximada a temperatura padrão de  $25^\circ\text{C}$  óptima para um desempenho efectivo das células solares. No período experimental observou-se uma média de 11.24%, sendo a média mensal mais alta de 11.42% observada em Maio de 1998 e a média mensal mais baixa a de 10.99 observada em Fevereiro de 1998.

Da análise gráfica dos dados de eficiência, verifica-se que não houve uma degradação apreciável durante o período experimental, e as flutuações verificadas correspondem as diferentes estações ao longo do ano. A conversão eficiente durante o dia inicia e termina com um valor de zero. Na transição do dia para a noite e vice-versa existe radiação que é registada pelos piranómetros mas a sua intensidade é bastante pequena para estimular a produção de electricidade. por isso a electricidade é praticamente nula embora a radiação seja diferente de zero. Durante a noite, não se considera a eficiência, pois a radiação solar é igual a zero.

## 7. BIBLIOGRAFIA

- [1]. Boaventura Chongo Cuamba "Studies of the Performance on a Photovoltaic Power Plant in a Southern Africa Environment" University of Northumbria at Newcastle. Doctoral Thesis (1996).
- [2] Alan L. Fahrenbruch, Richard H. Bube "Fundamentals of Solar Cells, Photovoltaic Solar Energy Conversion", Academic Press, INC. (1983).
- [3] T. B. J. H. Kelly, A. K. N. Redy, R. H. Williams "Renewable Energy", An Earthscan/Island Press Original (1993)
- [4] F. Lasnier and T. G. Ang "Photovoltaic Engineering Handbook", Adam Higler. (1990)
- [5]. M.S.Imamura, P.Helm and W.Palz "Photovoltaic System Tecnology", A European Handbook (1992)
- [6] John Twidell, Tony Weir "Renewable Energy Resources", E & FN SPON An Imprint of Chapman & Hall. (Reimpressão 1996).
- [7]. Robert Hill, Phil O'Keefe and Colin Snape "The Future of Energy Use", Earthscan Publication Ltd. (Reprinted in 1996)
- [8]. D.A.Bradley "Power Electronics", Department of Engineering University of Lancaster, Van Nostrand Reinhold (International),(1990).
- [9]. William C. Vergara "Electronics in everyday things", Harper & Row, Publishers; New York, Evanston, and London (1961).
- [10]. Osman E.O. El Safi "The Use of Power Electronic Interface in the Efficacious Utilisation of Power in Photovoltaics Pumping Systems", Ph.D. Thesis, Newcastle upon Tyne Polytechnic(1990).
- [11]. O. Ichikura, M. Maeda, H. Takahashi and K. Murakami "European Photovoltaic Solar Energy" Conference and Exhibition,(12-16 October 1992).
- [12] B.W.Williams "Power Electronics; Devices, Drivers, Applications and Passive Components",(1992) 2<sup>nd</sup> Edition

## 8. ANEXOS

### *Gerador fotovoltaico*

O gerador fotovoltaico instalado no campus universitário é constituído de dois painéis ligados entre si em paralelo, contendo cada um 8 módulos do tipo M55 ligados entre si em série, fabricados pela Siemens Solar Ltd e adquirido em 1993. A potência máxima de cada módulo em condições padrão de teste era de 53W, a tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ) de 21.7V e a corrente de curto circuito ( $I_{sc}$ ) de 3.05A, respectivamente. Cada módulo contém 36 células de silício cristalino, tendo cada célula uma área de  $102.9\text{cm}^2$ , todas conectadas em série. Cada módulo tem dimensões de 1293mmX330mm, contendo um diodo de protecção do módulo contra a polarização inversa da corrente. O gerador possui uma ligação a terra para proteger o painel contra relâmpagos indirectos. O suporte do gerador, é uma estrutura de metal inoxidável, fixado a uma base de betão, com capacidade para suportar uma velocidade de vento de 200Km/h. O gerador foi ajustado com uma inclinação de  $30^\circ$  com a face virada para o norte.

TABELA .A: Características importantes de instrumentos de medição usados. [1]

Tipo de Medições	Tipo de dispositivos de medições	Precisão
Irradiância solar	Piranómetro de silício cristalino do tipo Campbell Scientific SP1110	3.0%
Temperatura	Sonda de termopar do tipo Campbell Scientific 105T	0.5%
Corrente contínua (dc)	Resistência shunt com dispositivos do tipo 5B30-03	0.05%
Tensão contínua (dc)	Ponte de resistência com dispositivos do tipo 5B31-03	0.05%