

T1S-08

UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA

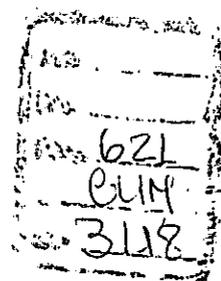


TRABALHO DE LICENCIATURA

**ESTUDO DO EFEITO DA
TEMPERATURA NO RENDIMENTO
DAS CÉLULAS SOLARES**

Por

Julião João Cumbane



621.8.036

**UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA**

TRABALHO DE LICENCIATURA

**ESTUDO DO EFEITO DA
TEMPERATURA NO RENDIMENTO
DAS CÉLULAS SOLARES**

Supervisores:

**dr Boaventura Chongo Cuamba
&
Prof. Doutor Vladimir Tchernych**

MAPUTO, DEZEMBRO, 1994

Aos meus filhos,

**Carmen,
Edson, e
Hamilton,**

**muito sacrificados durante os cinco anos
da minha formação universitária.**

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado com o apoio material e financeiro do Projecto de Investigação em Energia Solar Fotovoltaica, em curso no Departamento de Física da Faculdade de Ciências da Universidade Eduardo Mondlane.

Cabe-me aqui e agora manifestar a minha profunda gratidão ao meu supervisor, dr. Boaventura Chongo Cuamba, por todas as facilidades que me concedeu na utilização dos equipamentos e materiais do projecto que ele coordena, sem os quais este trabalho não teria sido possível. Agradeço igualmente a chefia do Departamento de Física e a Direcção da Faculdade de Ciências, que negociaram este apoio.

Os meus agradecimentos estendem-se ao Prof. Doutor Vladimir Tchernych, outro meu supervisor, e ao dr. Rogério José Uthui, pelas observações e sugestões com me ajudaram a corrigir algumas imprecisões e melhorar o conteúdo deste trabalho.

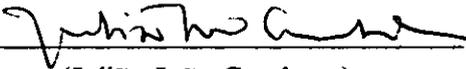
Agradeço ainda aos meus colegas e amigos, Amino Ussene Naran, Adriano Rafael Sacate e Santos Luís Victorinoto, pelo apoio e pronta colaboração que me prestaram.

DECLARAÇÃO DE HONRA

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

Maputo, Dezembro, 1994

O autor



(Julião João Cumbane)

RESUMO

As células solares são dispositivos semicondutores que convertem a energia electromagnética da luz solar em energia eléctrica; elas constituem pois as unidades básicas dos sistemas fotovoltaicos de conversão da radiação solar em electricidade.

Nos últimos anos, a obtenção da energia eléctrica a partir da luz solar, mediante as células solares, está a conhecer maior destaque entre as tecnologias de produção de energia. Este facto está associado à compreensão da dimensão universal dos problemas decorrentes da exploração e utilização dos combustíveis para a obtenção de energia, nomeadamente a depuração das reservas existentes dos combustíveis e a poluição do meio ambiente que lhes está associada.

Vários programas de investigação, desenvolvimento e demonstração (ID&D) foram já estabelecidos em diversos países do mundo, com vista a melhorar os aspectos técnicos, reduzir os custos de produção dos materiais (que são, ainda, bastante elevados) e promover utilização da tecnologia fotovoltaico. O objectivo principal preconizado por estes programas é tornar os sistemas fotovoltaicos competitivos com os sistemas convencionais, mesmo na produção de energia em grande escala.

Dado que os sistemas fotovoltaicos funcionam ao ar livre e, portanto, sujeitos às condições ambientais do local onde são instalados, uma de linha de investigação das características dos dispositivos fotovoltaicos consiste no estudo do efeito das condições ambientais sobre as suas propriedades. Em particular, pretende-se conhecer o efeito dos parâmetros ambientais (irradiância, temperatura, velocidade do vento, humidade do ar) no rendimento dos dispositivos de conversão (células, módulos e painéis solares).

Neste trabalho, é discutido o efeito da temperatura no rendimento de painéis solares, em condições locais. O estudo foi realizado sobre o painel solar do sistema fotovoltaico de bombeamento de água, instalado no campo experimental da Faculdade de Agronomia e Engenharia Florestal (campus universitário), no quadro das actividades do Projecto de Investigação em Energia Solar Fotovoltaica, em curso no Departamento de Física da Universidade Eduardo Mondlane, em Maputo, Moçambique. O painel consiste de 16 módulos M55 da SIEMENS, cada com 36 células solares pseudo-quadradas de silício monocristalino de grau electrónico (Cz-Si), ocupando uma área de 6.25 m². O sistema e as condições ambientais foram monitoradas, medindo a irradiância, temperatura, velocidade do vento, voltagem e corrente eléctrica.

Com base na análise estatística dos dados experimentais obtidos, é mostrado que o rendimento do painel diminui linearmente com o aumento da temperatura.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	3
2.1. Radiação Solar	3
2.1.1. Generalidades	3
2.1.2. Interação da Radiação Solar com a Atmosfera Terrestre	4
2.1.3. Distribuição da Radiação Solar na Superfície Terrestre	6
2.2. Células Solares	7
2.2.1. Generalidades	7
2.2.2. Características Eléctricas	8
2.2.3. Parâmetros Modeladores e sua Influência	11
2.2.4. Rendimento de Conversão	14
3. METODOLOGIA	16
3.1. Equipamento e Montagem	16
3.2. Procedimentos	17
3.3. Resultados	18
4. DISCUSSÃO E CONCLUSÕES	23
5. RECOMENDAÇÕES	24
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	25
APÊNDICES	I
APÊNDICE I	II
APÊNDICE II	III

1. INTRODUÇÃO

A civilização humana está associada à utilização de energia pelo homem para a satisfação das suas necessidades. A primeira forma de energia que o homem aprendeu a utilizar para este fim foi a sua própria força muscular. Mais tarde, ele aprendeu a utilizar outras formas de energia de origem exterior: o fogo, a força dos animais domesticados, do vento e das águas.

A aspiração a uma sociedade mais desenvolvida aumentou a demanda em consumo de energia, o que obrigou o homem a procurar outras fontes de energia e a desenvolver tecnologias para a sua exploração. No século XIX, começou-se a utilizar os combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás natural) para gerar energia eléctrica. Não se colocava então o problema da limitação das reservas existentes dos combustíveis, tampouco se colocava o problema de poluição do meio ambiente que lhes está associado.

A crise do petróleo dos anos setenta veio mostrar que as reservas mundiais dos combustíveis são limitadas. Isto conduziu a uma mudança profunda na economia de produção de energia. Desde então, os custos de produção de energia a partir, por exemplo, do petróleo estão aumentando à taxa de 10 % ao ano[1], e o perigo da extinção da civilização humana devido a poluição do meio ambiente está eminente.

Estes problemas obrigam a uma reflexão muito séria sobre as alternativas aos combustíveis para a obtenção de energia. Esta reflexão resultou já no estabelecimento em vários países do mundo de programas de investigação, desenvolvimento e demonstração (ID&D) de novas tecnologias para a produção de energia a partir de fontes limpas, não poluentes e renováveis.

Entre as novas tecnologias de produção de energia, destaque especial tem merecido a tecnologia fotovoltaica, que permite obter energia eléctrica directamente a partir da luz solar.

No entanto, a obtenção da energia eléctrica mediante a conversão fotovoltaica ainda não é aceite numa base mundial alargada, devido ao facto de que o rendimento de conversão dos dispositivos básicos - as células solares - permanece relativamente baixo e o seu custo de produção por unidade de potência demasiado alto. Isto faz com que esta exija elevados investimentos iniciais de capital, dificultando a sua penetração em aplicações de grande escala. Porém, sistemas fotovoltaicos autónomos¹, para aplicações em locais remotos, são já uma opção economicamente viável em comparação com os sistemas convencionais²[2,3].

Várias características dos dispositivos usados na conversão fotovoltaica da energia solar são já conhecidas, em resultado de estudos realizados em diferentes partes do mundo. Com base nessas características, foram elaborados modelos de dimensionamento de sistemas fotovoltaicos para várias

¹*Sistema fotovoltaico* é um conjunto de todo o equipamento usado na conversão da luz solar em electricidade, incluindo os elementos de carga nos quais esta electricidade é utilizada para produzir o efeito desejado (iluminação, refrigeração, bombeamento de água, etc.). Um sistema fotovoltaico diz-se autónomo quando funciona independentemente de uma rede pública de electricidade.

²*Convencionais* dizem-se os sistemas de produção de energia eléctrica a partir da energia química que se liberta durante a combustão de um combustível fóssil (carvão, petróleo ou gás natural).

aplicações. Tais modelos revelam-se porém bastante simplificados, por não tomarem em consideração muitos dos parâmetros que caracterizam as condições ambientais do lugar onde os sistemas funcionam (temperatura ambiente, velocidade do vento, humidade do ar); a irradiância é o único parâmetro ambiental tomado em conta nesses modelos[4]. Esta situação conduz muitas vezes a erros na análise da adaptabilidade e na avaliação económica da tecnologia fotovoltaica num determinado lugar.

Para uma correcta análise dos custos e do desempenho dos sistemas fotovoltaicos, as características dos dispositivos que os constituem devem ser analisadas no ambiente em que funcionam.

Neste trabalho apresenta-se um estudo sobre o efeito da temperatura no rendimento das células solares em condições locais.

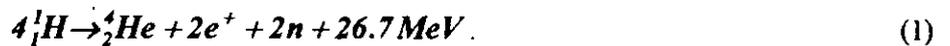
A realização do estudo inseriu-se no quadro das actividades do Projecto de Investigação em Energia Solar Fotovoltaica, em curso no Departamento de Física da Universidade Eduardo Mondlane, em Maputo. Os resultados obtidos neste estudo poderão servir em outros estudos sobre a viabilidade económica e adaptabilidade da tecnologia fotovoltaica em Moçambique.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. Radiação Solar

2.1.1. Generalidades

Chama-se *radiação solar*, à emissão de energia do Sol para o espaço cósmico, mediante ondas electromagnéticas. A energia solar resulta das reacções termonucleares que ocorrem no interior do Sol, das quais a mais importante é a fusão dos núcleos de hidrogénio, formando-se hélio. Este processo compreende três etapas, resumidas na seguinte equação:



A radiação solar é policromática, e no espaço livre possui uma distribuição espectral semelhante à da radiação do corpo negro, a temperatura de 6000 K; mas com modificações devidas a absorção da radiação na atmosfera solar. A curva da distribuição espectral da radiação solar é chamada *espectro solar* (fig.1). Segundo o espectro solar, a maior parte da energia solar é veiculada para o espaço interstelar mediante ondas electromagnéticas de comprimentos de onda entre 0.25 μm e 3.0 μm [5,6].

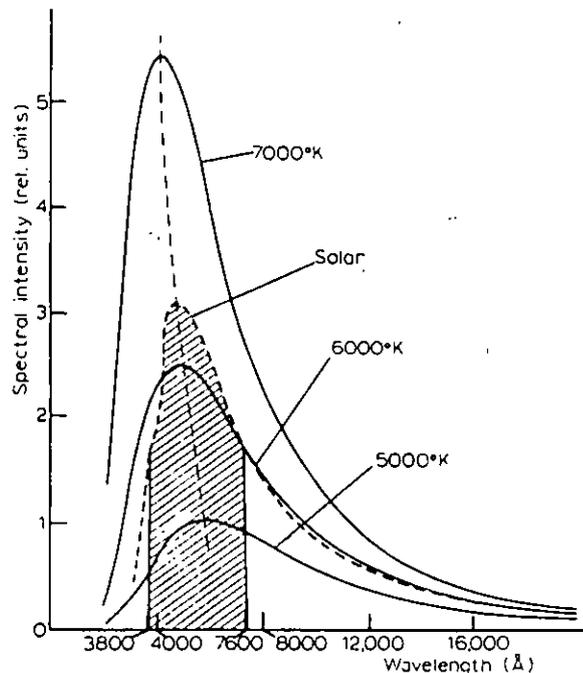


Fig. 1. Espectro solar comparado com os espectros do corpo negro a diferentes temperaturas[5]

A potência de emissão de energia solar é estimada em 3.7×10^{25} W. Desta energia, a Terra recebe somente 1.8×10^{14} W[7], isto é, cerca de 10^{-12} %. Porém, devido à interacção com a atmosfera, nem toda esta

energia atinge a superfície terrestre.

A disponibilidade da radiação solar numa superfície é avaliada através de uma grandeza física especial, chamada *irradiância*, E_e . Por definição, a irradiância é a energia recebida durante 1 s por uma superfície de área unitária, colocada perpendicularmente à direcção de incidência da radiação solar. No espaço livre (o mesmo que vácuo), a meia distância entre o Sol e Terra, o valor medido da irradiância é $1.353 \times 10^3 \text{ Wm}^{-2}$; este valor é chamado *constante solar*.

Na realidade, o valor da irradiância no espaço livre difere da constante solar por $\pm 3.35 \%$, devido as variações da distância entre o Sol e a Terra durante o ano, sendo $1.40 \times 10^3 \text{ Wm}^{-2}$ em 3 de Janeiro e $1.31 \times 10^3 \text{ Wm}^{-2}$ em 6 de Julho; esta é a única variação apreciável da irradiância no espaço livre[5,8].

2.1.2. Interação da Radiação Solar com a Atmosfera Terrestre

Chama-se *atmosfera terrestre*, à massa gasosa que envolve a Terra. Esta massa estende-se desde a superfície terrestre até uma altura de cerca de 100 km, e consiste de uma mistura de gases como N_2 , O_2 , CO , CO_2 , CH_4 , N_2O , cujas concentrações não variam com a altura, e gases não miscíveis como H_2O , O_3 e HNO_3 , cujas concentrações são funções da altura[6,8].

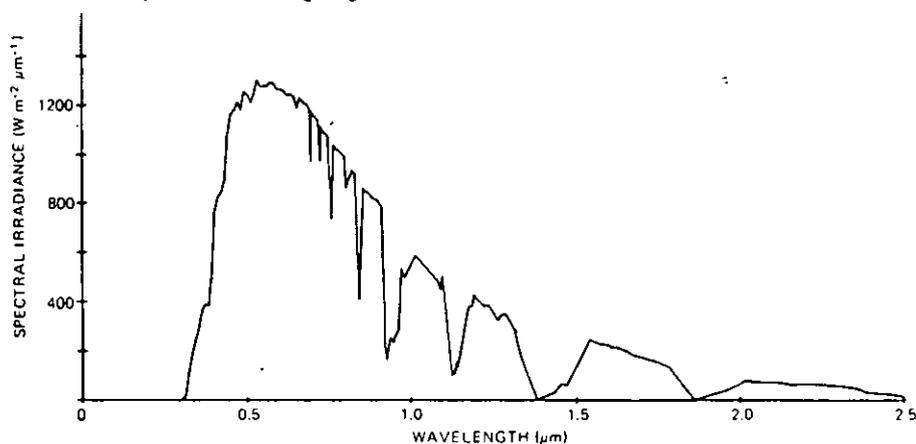


Fig.2. Espectro solar visto na superfície terrestre[5]

A interação da radiação solar com a atmosfera terrestre realiza-se através dos processos de *dispersão* e *absorção*. A dispersão consiste na separação dos componentes da radiação solar em diversos feixes, em virtude da variação da velocidade de propagação das ondas electromagnéticas na atmosfera com o comprimento de onda. Este fenómeno é mais notável na região das ondas curtas do espectro solar e é devido, principalmente, as moléculas de ar e partículas de poeira suspensas na atmosfera.

Na região visível do espectro solar, a luz azul é a que possui menor comprimento de onda, sendo por isso mais dispersa pela atmosfera terrestre; isto explica a cor azul do céu limpo[1,8,9].

A absorção consiste na transferência da energia da radiação solar para a atmosfera. Esta transferência

realiza-se através de vários processos, tais como a fotoionização e o efeito compton. O fenómeno de absorção é mais notável nas regiões ultravioleta ($\lambda < 0.29 \mu\text{m}$) e infravermelha ($\lambda > 3.0 \mu\text{m}$) do espectro solar, na primeira região sendo devido as moléculas de O_3 e, na segunda, as moléculas de H_2O e CO_2 [6,8].

O resultado da interação da radiação solar com a atmosfera terrestre é que a irradiância diminui, passando de $1.35 \times 10^3 \text{ Wm}^{-2}$ à entrada da atmosfera para cerca de $1 \times 10^3 \text{ Wm}^{-2}$ na superfície terrestre, e o espectro solar altera-se consideravelmente (fig.2).

Na realidade, o valor da irradiância reduz-se ainda mais, devido as condições climáticas locais e ao facto de a energia solar só poder ser aproveitada ao nível da superfície terrestre, durante o dia[10].

As alterações do espectro solar pela atmosfera terrestre descrevem-se através de um parâmetro chamado *massa de ar*, m . Este parâmetro define-se como a razão entre a espessura real da atmosfera atravessada por um feixe de radiação solar entre o ponto de observação e o Sol, $|AB|$, e a espessura $|BC|$ que seria atravessada pelo mesmo feixe, se o Sol estivesse no zénite (fig.3):

$$m = \frac{|AB|}{|BC|} = \frac{1}{\cos z} = \sec z. \quad (2)$$

O ângulo z , medido entre a recta que une entre si os centros do Sol e da Terra, passando pelo ponto de observação, e a normal ao plano contendo a linha do horizonte, é chamado *ângulo de zénite*. O ângulo de zénite varia com o tempo do dia, estação do ano, e com a latitude e longitude geográficas do ponto de observação[5].

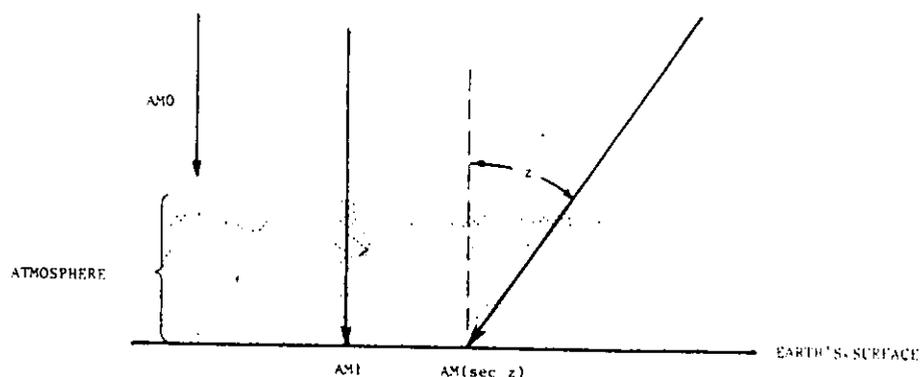


Fig.3. Diagrama auxiliar para a definição da massa de ar[5]

Em termos de massa de ar, um espectro solar específico é denotado AMm (Air Mass m), com $m = \sec z$. No espaço livre considera-se $m=0$, e o espectro solar correspondente é denotado $AM0$. Na superfície terrestre, quando o Sol se encontra no zénite ($z=0$), tem-se que $m=1$, o espectro solar correspondente sendo denotado $AM1$. As características dos dispositivos de conversão da radiação solar ao nível da superfície terrestre são referidas ao espectro padrão, denotado $AM1.5$ (fig. 2).

alterações do espectro solar observado na superfície terrestre. Entre eles, o parâmetro w , proporcional à percentagem do vapor de água na atmosfera, é usado em conjunto com m , na descrição das condições de recepção da radiação solar ao nível da superfície terrestre. Quando $m=0$ e $w=0$, diz-se que as condições de recepção são ótimas ($E_e=1.06 \times 10^3 \text{ Wm}^{-2}$); e quando $m=3$ e $w=5$, as condições são extremamente desfavoráveis ($E_e=0.88 \times 10^3 \text{ Wm}^{-2}$)[10].

2.1.3. Distribuição da Radiação Solar na Superfície Terrestre

Devido ao fenómeno de dispersão, a radiação solar que atinge a superfície terrestre divide-se em duas componentes, directa e difusa. A componente directa é constituída pela radiação proveniente directamente do Sol, e atinge a superfície terrestre sem sofrer dispersão na atmosfera. É esta componente que foi tomada em consideração na definição do parâmetro m (sec. 2.1.2.), o que permite poder usar-se este mesmo parâmetro para descrever, também, a debilitação do feixe de radiação directa pela atmosfera.

A componente difusa é constituída pela radiação que atinge a superfície terrestre proveniente de todos os pontos do espaço, e resulta da dispersão pela atmosfera da radiação solar que atinge a Terra. Esta componente representa, nos dias de céu nublado, toda a energia solar disponível para uso na superfície terrestre.

A quantidade total da energia solar que atinge uma superfície na atmosfera terrestre obtém-se assim somando as componentes directa e difusa da radiação solar; chama-se a esta soma *radiação global*, e no Sistema Internacional das Unidades de Medida (SI) mede-se em Jm^{-2} [1].

Ao longo da superfície terrestre, a radiação global varia com:

- *As condições locais de recepção.* Estas incluem a posição do Sol no céu e o estado da atmosfera terrestre, e descrevem-se através dos parâmetros m e w , que detreminam o espectro solar utilizável.
- *As estações do ano.* Num dado lugar da superfície terrestre, a radiação global varia durante o ano entre dois valores extremos, máximo e mínimo, que ocorrem nos solstícios de verão e de inverno, respectivamente.
- *A latitude geográfica.* Por ser curva a superfície terrestre, a radiação global incidente sobre ela não se distribui uniformemente. A área efectiva atingida pela radiação solar, a uma latitude θ , é dada por:

$$A = A_0 \cos \theta, \quad (3)$$

onde A_0 é a área real da superfície irradiada[8]. Portanto, com o aumento da latitude diminui a área efectiva e, por conseguinte, a energia total recebida pela superfície iluminada pela luz solar. Este problema pode resolver-se, dispondo a superfície receptora inclinada em relação à superfície terrestre, num diedro igual à latitude geográfica do lugar. Este procedimento permite aumentar a área efectiva da superfície receptora e assegurar

sobre ela uma distribuição uniforme da radiação global.

• *A natureza da superfície receptora.* As superfícies reais reflectem uma parte da radiação solar incidente sobre elas, umas mais do que outras. Para a conversão fotovoltaica, têm interesse as superfícies que reflectem o mínimo possível da radiação solar incidente sobre elas.

Todos os factores acima mencionados, condicionam o rendimento de conversão da radiação solar em energia eléctrica, devendo, por isso, serem considerados nos projectos de aplicação da energia solar.

2.2. Células Solares

2.2.1. Generalidades

Uma célula solar é um dispositivo concebido para converter a luz solar directamente em energia eléctrica, aproveitando o efeito fotovoltaico³. Geralmente consiste de uma bolacha (wafer) de material semiconductor convenientemente dopado com impurezas dadoras e aceitadoras, no qual os transportadores livres de carga eléctrica (pares electrão-lacuna) podem ser gerados através da absorção de fotões (quanta de radiação electromagnética) de determinada energia e separados por um campo eléctrico interno. Na fig.4 é apresentado o desenho de uma célula solar típica de silício[5,10,11].

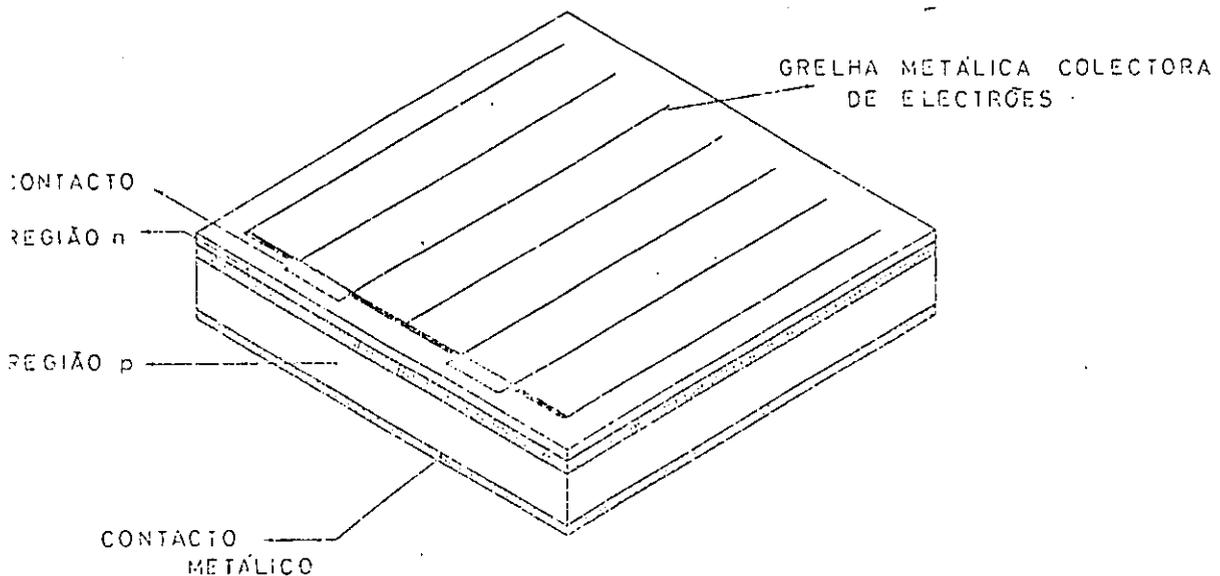


Fig.4. Representação de uma célula solar típica de silício[10,11]

O campo eléctrico interno estabelece-se numa região chamada *junção p-n*, separando dois lados da

³ *Efeito fotovoltaico* é o fenómeno de aparecimento de uma força electromotriz (fem) num semiconductor, quando este é iluminado. Este fenómeno envolve uma transferência directa da energia fotónica da radiação solar para o sistema electrónico do semiconductor, excitando electrões da banda de valência para a banda de condução.

bolacha diferentemente dopados: um dopado com impurezas aceitadoras (lado tipo-p) e o outro com impurezas dadoras (lado tipo-n) (ver fig.5).

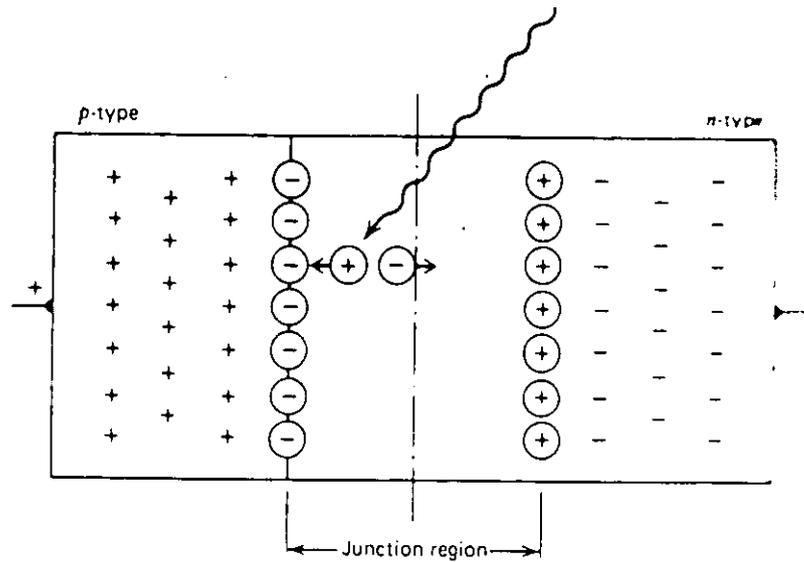


Fig.5. Esquema da região da junção num material semiconductor[11]

Quando uma célula solar é iluminada, a absorção de fótons na região da junção gera um excesso de pares electrão-lacuna. Estes pares são dissociados pelo campo eléctrico interno, dando origem a uma corrente eléctrica através da junção, chamada *corrente de iluminação* ou *fotocorrente*, I_f . Esta corrente pode exprimir-se em função do número total de fótons absorvidos na junção, através da seguinte fórmula:

$$I_f = q \int_0^{\infty} \eta_Q(\lambda) \frac{d\Gamma(\lambda)}{d\lambda} d\lambda, \quad (4)$$

onde q é a carga electrónica, $\eta_Q(\lambda)$ é a eficiência quântica monocromática⁴, e $\frac{d\Gamma(\lambda)}{d\lambda}$ é o fluxo de fótons com comprimentos de onda no intervalo $d\lambda$ do espectro solar[5,10].

2.2.2. Características Eléctricas

Pela sua construção, uma célula solar assemelha-se a um diodo de junção, com uma área útil mais larga do que a dos diodos comuns, utilizados em circuitos electrónicos. Num circuito externo, além da corrente fotogerada que aparece na presença de luz, a célula é percorrida por uma corrente eléctrica chamada *corrente*

⁴ Eficiência quântica, $\eta_Q(\lambda)$, é a razão entre o número de fótons absorvidos e o número de fótons incidentes na junção. A eficiência quântica é uma função dos materiais empregues na junção e do comprimento de onda da radiação incidente[5].

de diodo, I_D . Esta corrente varia com a tensão nos extremos da junção, V , de acordo com a seguinte equação, chamada equação do diodo:

$$I_D = I_o \left[\exp\left(\frac{qV}{Ak_B T}\right) - 1 \right], \tag{5}$$

onde I_o é a corrente inversa de saturação, q é a carga electrónica, A é um factor da geometria da célula, k_B é a constante de Boltzman, e T , a temperatura absoluta da junção[4,5,10].

Portanto, a corrente eléctrica total que se pode obter nos terminais de uma célula solar, incluindo a corrente fotogerada, I_f , e a corrente do diodo, I_D , é

$$I = I_f - I_D. \tag{6}$$

Esta equação permite representar uma célula solar como o gerador eléctrico cujo circuito equivalente está mostrado na fig.6(b), onde R é a carga externa[10].

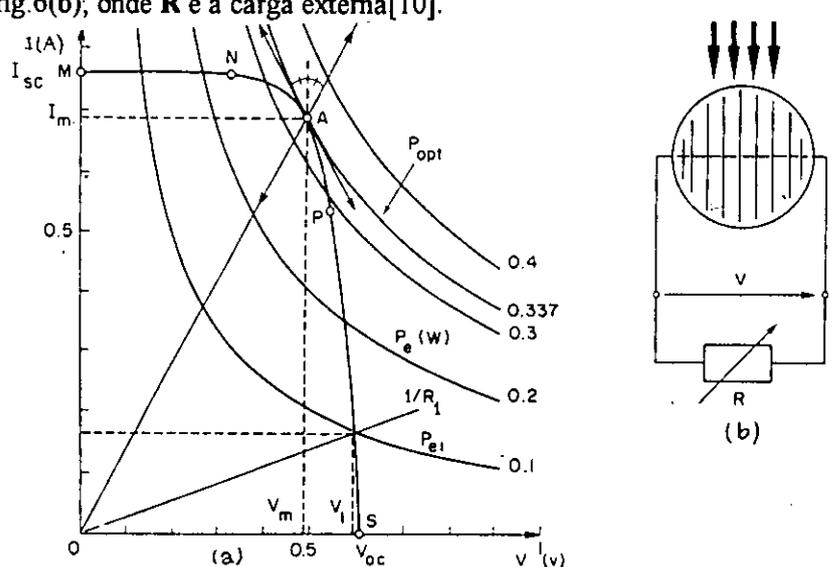


Fig.6. (a) Característica $I-V$ com curvas de $P=Const$, e (b) circuito equivalente de uma célula solar típica[4,10]

A corrente eléctrica que uma célula solar poder fazer passar através duma carga externa é uma função da voltagem nos seus terminais. A curva $I=f(V)$, representando esta dependência, é chamada *caractística I-V* da célula (fig.6(a)).

Com base na sua característica $I-V$, a operação duma célula solar (que é afinal um gerador de energia eléctrica) pode descrever-se facilmente. Os pontos M, N, P e S sobre a característica definem três regiões de operação da célula. Na região MN a célula funciona como uma fonte de corrente, podendo fornecer uma corrente eléctrica praticamente independente da voltagem nos seus terminais. Na região PS a célula funciona como um gerador de tensão, sendo praticamente constante a voltagem nos seus terminais. Finalmente, na

região NP a voltagem e a intensidade da corrente eléctrica, que determinam o ponto de operação da célula solar, dependem da carga conectada aos terminais da célula. Nesta região, à um aumento da voltagem nos terminais da carga corresponde uma diminuição da corrente eléctrica no circuito.

A potência eléctrica transferida por uma célula solar para uma carga é dada por:

$$P = VI, \quad (7)$$

onde V é a voltagem e I a intensidade da corrente eléctrica que definem o ponto de operação. Se a carga tiver uma resistência variável R , o ponto de operação será determinado pela intersecção das características da célula solar e da carga. Para uma carga resistiva, a característica é uma linha recta, chamada *linha de carga*, com coeficiente angular igual a $1/R$. A potência transferida a esta carga depende somente da sua resistência, R , sendo máxima para um valor óptimo, $R=R_{opt}$. Se a resistência de carga for muito menor que este valor, a célula operará na região MN, isto é, como uma fonte de corrente; e se for muito maior, operará na região PS, isto é, como fonte de tensão[4].

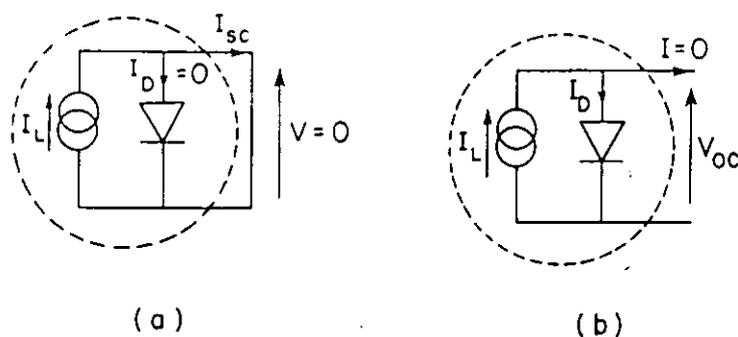


Fig.7. Célula solar: (a) em curto circuito e (b) em circuito aberto[4]

Na região MN, a célula fornecerá uma corrente eléctrica de intensidade máxima $I=I_{sc}$, operando no ponto M. Para este ponto $V=0$, o que implica ser $R=0$; diz-se então que a célula está em curto circuito, sendo o valor I_{sc} chamado *corrente de curto circuito* (short circuit current). Na região PS, a célula imprimirá uma voltagem máxima $V=V_{oc}$, operando no ponto S. A este ponto corresponde o valor de intensidade de corrente eléctrica $I=0$, o que implica ser $R=\infty$; neste caso diz-se que a célula está em circuito aberto, e ao valor V_{oc} chama-se *voltagem de circuito aberto* (open circuit voltage).

Na fig.7 está representado o circuito equivalente de uma célula solar (a) na condição de curto circuito, e (b) na condição de circuito aberto. A voltagem de circuito aberto V_{oc} corresponde à queda de tensão através da junção, quando esta é atravessada pela fotocorrente I_f .

O ponto de operação óptimo é definido por dois valores de voltagem e intensidade de corrente eléctrica, respectivamente, V_{max} e I_{max} , para os quais a potência transferida à carga pela célula solar é máxima. Neste ponto, a característica $I-V$ da célula é tangente à hipérbole $P=Constante$ (fig.6.(a)).

O ponto de operação óptimo de uma célula solar, para uma dada carga, varia com a geometria das suas características I - V . Para descrever a geometria das características I - V duma célula solar utiliza-se o factor de forma, FF (fill factor), definido da maneira seguinte:

$$FF = \frac{V_{max} I_{max}}{V_{oc} I_{sc}} \quad (8)$$

O factor de forma FF indica de quanto a forma da característica I - V duma célula solar se aproxima da forma de um rectângulo; é um parâmetro muito útil para os testes de controlo de qualidade de células solares. Para uma boa célula solar, o factor de forma não menor que 0.7[4,10].

2.2.3. Parâmetros Modeladores e sua Influência

O comportamento eléctrico de uma célula solar é governado por cinco parâmetros, classificados em internos e externos:

(a) Internos

- (i) Resistência série, R_s ;
- (ii) Resistência paralela, R_p ;
- (iii) Corrente de saturação, I_o ;

(b) Externos

- (iv) Irradiância, E_e ; e
- (v) Temperatura, T .

Exceptuando a corrente de saturação I_o e a temperatura T , os restantes parâmetros podem ser considerados independentes entre si, sob condições normais de irradiância (sem focalização)[6].

Na fig. 8 é apresentado o circuito equivalente correspondente.

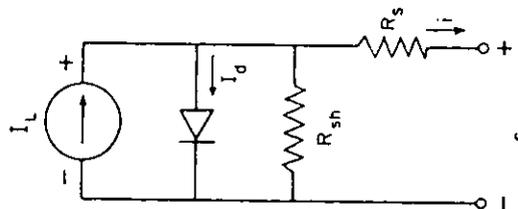


Fig. 8. Célula solar com as resistências série e paralela[4]

As resistências série e paralela alteram o factor de forma FF das características $I-V$ das células solares. Quando estas resistências são consideradas, a equação da característica $I-V$ duma célula solar toma o aspecto seguinte:

$$I = I_f - I_o \left\{ \exp \left[\frac{q(V + R_s I)}{A k_B T} \right] - 1 \right\} - \frac{V + R_s I}{R_p} \quad (9)$$

A resistência R_s é determinada principalmente pelas resistências do contacto inferior e da camada da célula solar situada logo por baixo da superfície do lado da qual deve incidir a radiação (ver o desenho da célula na fig.4). O seu efeito é tornar suave a curvatura das características $I-V$ da célula, na região onde esta funciona como um gerador de tensão (fig.9). A resistência R_p é devida a corrente de fuga na junção, e o seu efeito é acentuar a curvatura das características $I-V$ da célula, na região onde esta funciona como um gerador de corrente eléctrica (fig.10).

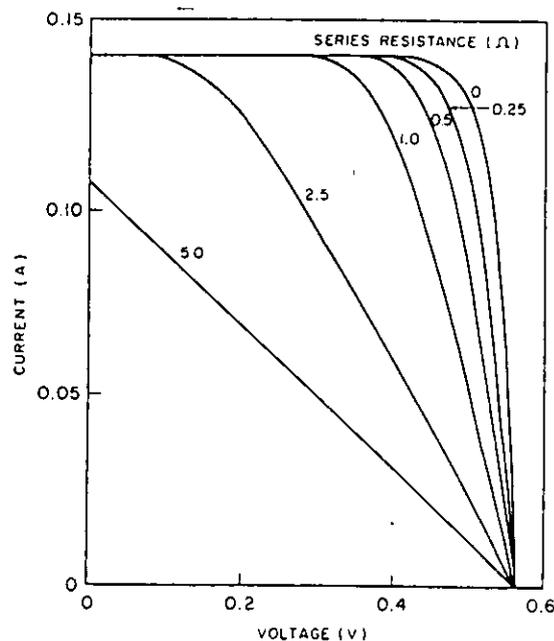


Fig.9. Efeito da resistência série sobre as características $I-V$ duma célula solar[4]

Em condições normais de radiação (sem focalização), o efeito da resistência série sobre as características $I-V$ duma célula solar na condição de curto circuito é desprezível, e a corrente de curto circuito é proporcional à irradiância:

$$I_{sc} = I_f = K E_e, \quad (10)$$

onde K é uma constante de proporcionalidade[4].

A voltagem de circuito aberto exprime-se analiticamente através da expressão

$$V_{oc} = \frac{Ak_B T}{q} \ln\left(\frac{KE_e + I_o}{I_o}\right). \tag{11}$$

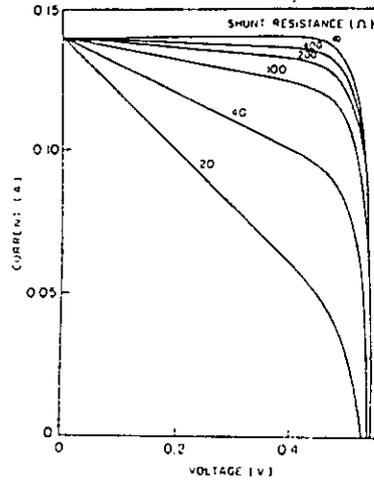


Fig.10. Efeito da resistência paralela sobre as características $I-V$ duma célula solar[4]

Com base nas Eqs (10) e (11), pode-se explicar o efeito dos parâmetros externos E_e e T sobre o comportamento eléctrico duma célula solar da seguinte maneira (ver figs. 11 e 12):

(a) Para níveis baixos de radiação solar, a corrente de curto circuito I_{sc} é proporcional à irradiância; a sua densidade é de cerca de 30 mAcm^2 para uma célula de silício monocristalino, sob a irradiância de 1 kWm^{-2} e temperatura de $25 \text{ }^\circ\text{C}$. O aumento da temperatura da célula provoca um ligeiro aumento da fotocorrente ($0.03 \text{ mA}^\circ\text{C}^{-1} \text{ m}^{-2}$); este aumento da fotocorrente surge em virtude da diminuição da energia da banda proibida com o aumento da temperatura[4,5,10].

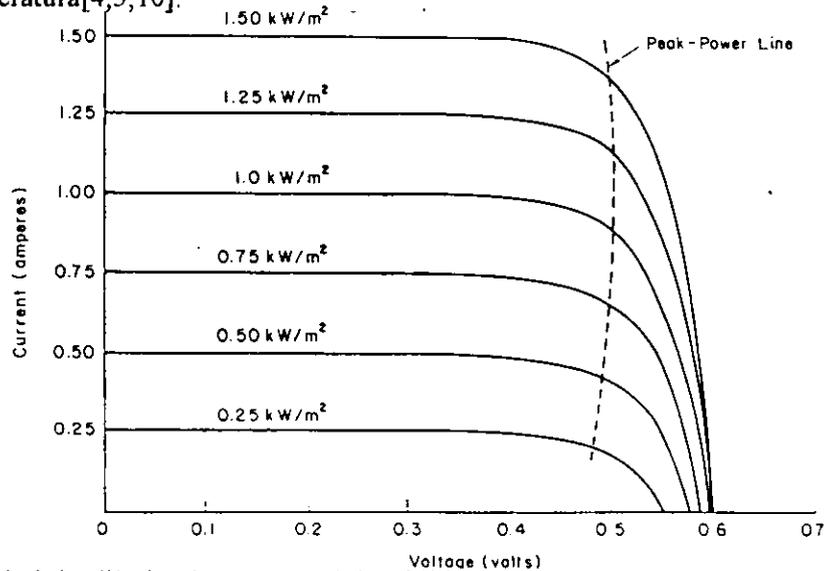


Fig.11. Influência da irradiância sobre as características $I-V$ duma célula solar a temperatura constante[4]

(b) A voltagem de circuito aberto V_{oc} aumenta lentamente com o aumento da irradiância; ela é uma função do material da célula, e o seu valor ronda os 590 mV para uma célula de silício monocristalino sob a irradiância de 1 kWm^{-2} e temperatura de $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Devido ao aumento exponencial da corrente de saturação com o aumento da temperatura da junção, a voltagem V_{oc} diminui linearmente com o aumento da temperatura da célula; entre os $20 \text{ }^\circ\text{C}$ e os $100 \text{ }^\circ\text{C}$, a taxa de diminuição de V_{oc} é de $2 \text{ mV}^\circ\text{C}^{-1}$ [4]

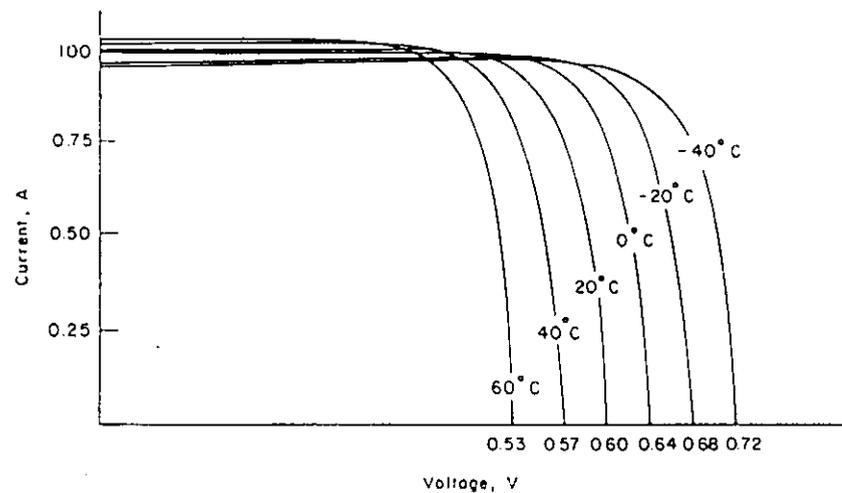


Fig.12. Influência da temperatura sobre as características I - V duma célula solar sob irradiância constante[4]

2.2.4. Rendimento de Conversão

O rendimento de conversão r da energia da luz solar em energia eléctrica, por uma célula solar, é definido pela relação

$$r = \frac{P_e}{P_s} = \frac{VI}{AE_e}, \quad (12)$$

onde $P_e=VI$ é a potência eléctrica transferida pela célula e $P_s=AE_e$, a potência solar recebida na sua área iluminada, A , a uma dada temperatura.

O rendimento de conversão fotovoltaica da radiação solar é uma função do material das células e dos parâmetros que caracterizam as condições em que operam (principalmente, irradiância e temperatura). Na fig.13 estão representadas as curvas típicas de variação do rendimento de conversão com o material e com a temperatura das células.

Valores típicos do rendimento de conversão são 12-15 %, para uma célula solar de silício monocristalino e 9 % para células de silício policristalino[4].

Uma dificuldade fundamental na medição do rendimento das células solares está ligada ao facto de as células possuírem uma resposta espectral muito selectiva, sendo por isso muito sensíveis à composição espectral da radiação solar. Ao ar livre, esta composição varia consideravelmente com o lugar, condições atmosféricas, estação do ano e hora do dia; e em ambiente fechado depende do tipo de simulador utilizado, podendo variar com a acção do equipamento. Se os procedimentos das medições não considerarem estas variações, e a influência de outros como a temperatura, os resultados obtidos poderão ser grosseiramente erróneos.

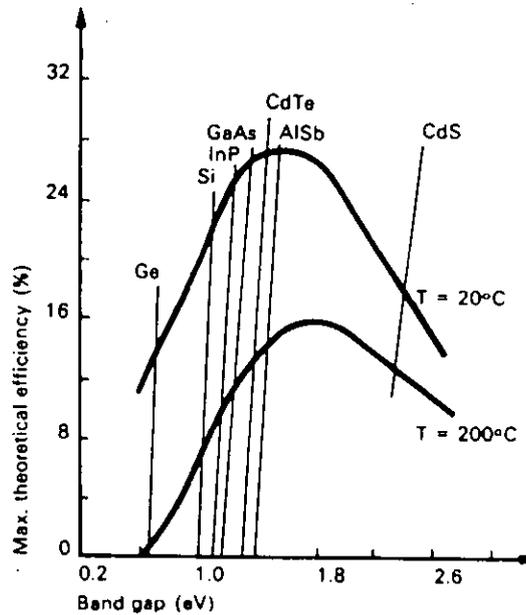


Fig.13. Variação do rendimento de conversão fotovoltaica com o material e com a temperatura[9]

Para superar esta dificuldade, o rendimento das células solares é calculado expondo-as à luz estável (natural ou artificial), a uma temperatura conhecida, e traçando as suas características $I-V$, ao mesmo tempo que se mede a irradiância, usando um piranómetro construído na base do mesmo material das células. Este instrumento tem essencialmente a mesma resposta espectral como a célula testada, de modo que o rendimento calculado é automaticamente relacionado a um só espectro solar de referência, eliminando-se os efeitos das variações do espectro solar natural ou simulado.

O espectro solar de referência foi estabelecido por consenso internacional como correspondendo às condições de AM1.5 e irradiância de 1 kWm^{-2} . A potência de saída de uma célula solar sob estas condições, a uma temperatura de $25 \text{ }^\circ\text{C}$ e voltagem nominal (voltagem de circuito aberto), é a sua potência nominal, frequentemente chamada *potência de pico* (peak power).

3. METODOLOGIA

3.1. Equipamento e Montagem

O equipamento utilizado neste estudo está integrado no sistema fotovoltaico experimental de bombeamento de água que funciona no campo experimental da Faculdade de Agronomia e Engenharia Florestal, no campus universitário, em Maputo. Este sistema, cujo diagrama funcional em blocos está representado na fig.14, foi instalado no quadro das actividades do Projecto de Investigação em Energia Solar Fotovoltaica que está sendo levado a cabo pelo Departamento de Física da Universidade Eduardo Mondlane.

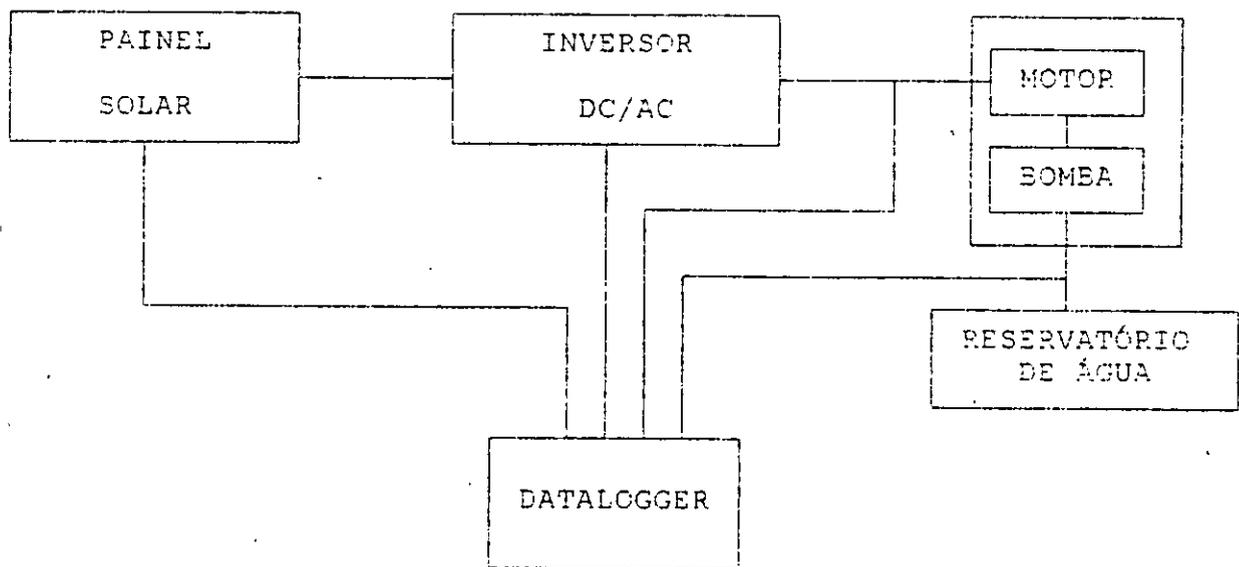


Fig.14. Diagrama de blocos do sistema fotovoltaico de bombeamento de água em que foram realizadas as medições

O painel solar, que é a parte básica do sistema, é constituído por 16 módulos M55 da SIEMENS, cada um composto por 36 células pseudo-quadradas de silício monocristalino de grau electrónico (electronic grade silicon, Cz-Si), interligadas em série, ocupando uma área de 6.25 m². O painel está virado para o norte e inclinado 30 ° (latitude aproximada de Maputo) em relação ao plano horizontal. A potência de pico do sistema é de cerca de 800 W_p (=140 V x 20 A).

Nas medições foi usado o seguinte equipamento:

- dois sensores de radiação solar (LI-200SZ), um para a medição da irradiância no plano horizontal e, o outro, no plano do painel;
- dois sensores de temperatura (105T), um para a medição da temperatura ambiente e, o outro, da temperatura do painel;
- um anemómetro (A100R), para a medição da velocidade do vento; e
- uma unidade programável (Datalogger, 21X Micrologger), para a leitura e processamento da informação dos sensores, bem como a medição da voltagem e da corrente eléctrica à saída do painel.

Para evitar os efeitos devidos as variações do espectro solar no local, foram utilizados para a medição da irradiância, sensores de radiação fabricados a partir do mesmo material das células solares, isto é, Cz-Si.

3.2. Procedimentos

Durante 30 dias (de 15 de Agosto à 15 de Setembro, 1994), foram realizadas medições regulares de:

- irradiância (no plano horizontal e no do painel);
- temperatura (do ar e do painel);
- velocidade do vento;
- voltagem e corrente eléctrica (à saída do painel).

O registo das medições foi efectuado com o auxílio do datalogger, programado para ler os valores dos parâmetros de interesse de 5 em 5 segundos, calcular e registar as médias dos valores observados passado uma hora. Os resultados obtidos foram usados no cálculo de:

- potência solar que atinge o painel, P_s ;
- potência eléctrica tirada do painel, P_e ; e
- rendimento do painel, r

As fórmulas usadas nestes cálculos foram as seguintes:

$$P_s = AE_{ep}; \quad (13)$$

$$P_e = VI; \text{ e} \quad (14)$$

$$r = \frac{P_e}{P_s} \times 100\% = \frac{VI}{AE_{ep}} \times 100\%, \quad (15)$$

onde A é a área total ocupada pelas células solares; E_{ep} é a irradiância no plano do painel solar; e V e I são, respectivamente, a tensão e a corrente eléctrica à saída do painel.

Os dados da experiência foram analisados, usando métodos da Estatística Matemática. São seguintes as operações efectuadas com base nestes dados:

- (a) Construção das curvas experimentais de variação da irradiância nos planos horizontal e do painel, respectivamente, E_{eh} e E_{ep} ; das temperaturas do ar e do painel, respectivamente, T_a e T_p ; e do rendimento do painel, r , em função da hora de registo, HR.
- (b) Análise da correlação entre as temperaturas do ar e do painel, e entre o rendimento e estas temperaturas.
- (c) Cálculo dos coeficientes de regressão da temperatura do painel sobre a do ar, e do rendimento sobre as temperaturas do ar e do painel.
- (d) Construção das rectas empíricas de regressão da temperatura do painel sobre a temperatura do ar, e do rendimento sobre as temperaturas do ar e do painel.

3.3. Resultados

Nas tabelas A1-A8 do apêndice I estão apresentados os dados experimentais obtidos em 7 dias típicos, seleccionados entre os 30 que duraram as observações. Netas tabelas, além das colunas contendo os valores das grandezas envolvidas no cálculo de P_e , P_s e r , foram incluídas as colunas dos valores correspondentes da irradiância no plano horizontal, E_{eh} ; das temperaturas do ar e do painel, respectivamente, T_a e T_p ; e da diferença entre estas temperaturas, $dT=T_p-T_a$.

Analisados os dados experimentais, obtiveram-se os seguintes resultados.

No apêndice II estão representadas as curvas experimentais de variação da irradiância nos planos horizontal e do painel; das temperaturas do ar e do painel em função da hora de registo, abreviada HR, (figs A1-A4). Estas curvas mostram que os parâmetros ambientais (E_{eh} , E_{ep} e T_a) e a temperatura do painel tomam valores máximos no período das 9.00 às 16.00 horas. Durante este período, não é clara a correlação entre o rendimento do painel e aqueles parâmetros, razão pela qual somente os dados experimentais registados neste período foram considerados no estudo do efeito da temperatura sobre o rendimento das células solares (do painel).

As figuras 15-19 mostram que os parâmetros ambientais (E_{eh} , E_{ep} e T_a), a temperatura e o rendimento do painel tomam valores máximos no intervalo das 9.00 às 16.00 horas. O efeito da temperatura no rendimento do painel foi analisado com respeito aos valores registados neste período.

Na tabela 1 são apresentados os coeficientes de correlação calculados entre as grandezas T_a , T_p e r , cada uma com todas as outras, no período considerado. Segundos os valores nesta tabela, existe uma forte correlação linear entre as temperaturas do ar e do painel, e entre o rendimento do painel e estas temperaturas; a correlação entre as temperaturas é positiva, enquanto entre estas e o rendimento, é negativa.

Na tabela 2 são apresentados os resultados do cálculo de regressão linear de T_p sobre T_a , de r sobre T_p e sobre T_a . A tabela inclui uma coluna com os erros padrão associados aos coeficientes calculados. Com base nos dados desta tabela 2, escrevem-se as seguintes equações de regressão linear de T_p sobre T_a , r sobre T_p , e r sobre T_a :

$$T_p = 1.602T_a - 6.871 \quad (16)$$

$$r = -0.023T_p + 12.038 \quad (17)$$

$$r = -0.039T_a + 12.208 \quad (18)$$

Os gráficos correspondentes são apresentados nas figuras 20-22.

Tabela 1. Coeficientes de correlação

	T_a (°C)	T_p (°C)	r (%)
T_a (°C)	1	0.88	-0.82
T_p (°C)	0.88	1	-0.76
r (%)	-0.82	-0.76	1

Tabela 2. Coeficientes de regressão

		Coeficiente	Erro padrão
T_p sobre T_a	Termo livre	-6.87	8.19
	Termo da variável independente	1.60	0.31
r sobre T_p	Termo livre	12.04	0.46
	Termo da variável independente	-0.02	0.01
r sobre T_a	Termo livre	12.21	0.46
	Termo da variável independente	-0.04	0.02

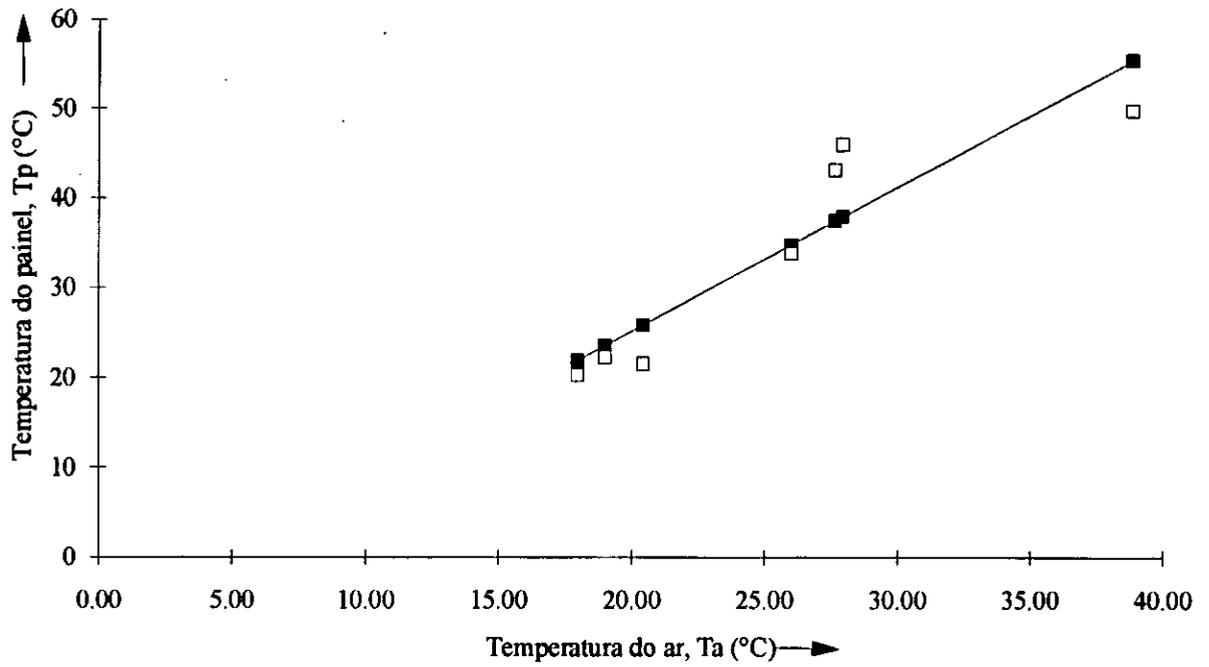


Fig. 15. Recta empírica de regressão de T_p sobre T_a

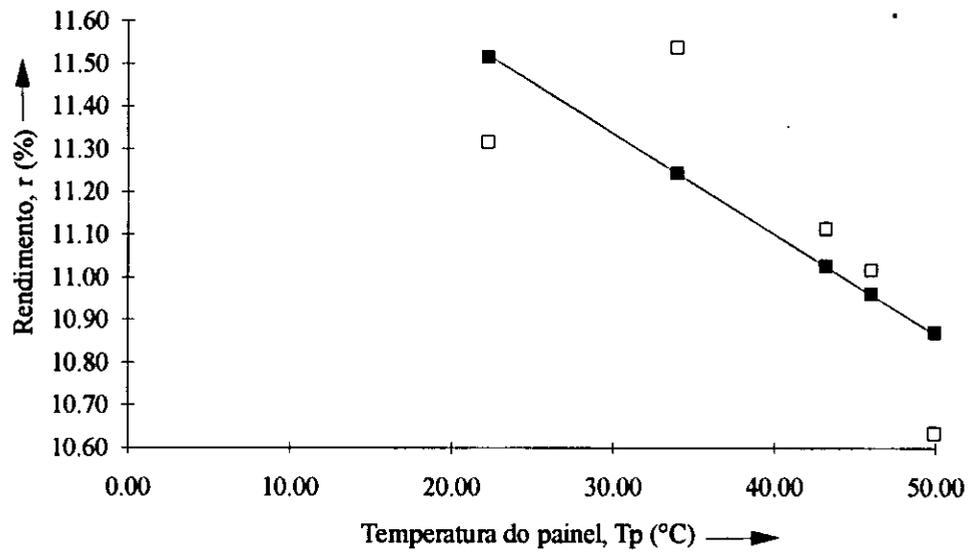


Fig. 16. Recta empírica de regressão de r sobre T_p

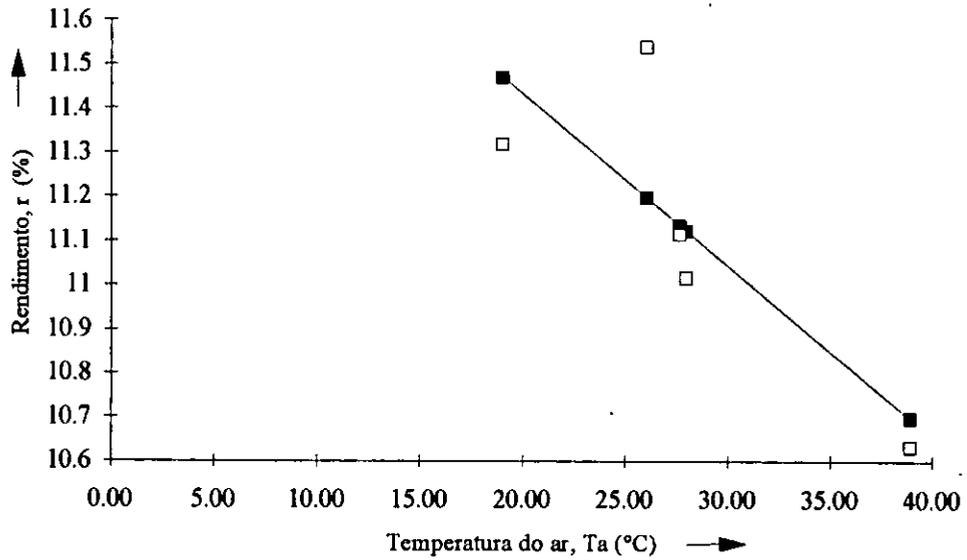


Fig.17. Recta empírica de regressão de r sobre T_a

A seguir apresentam-se as curvas de rendimento do painel em função da hora de registo, para três dias típicos.

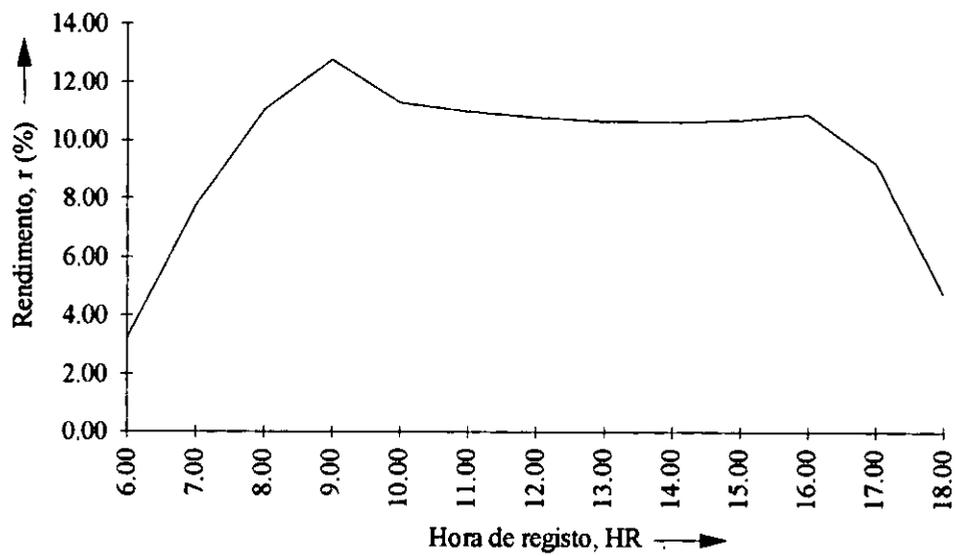


Fig.18. Curva de rendimento do painel num dia quente ($T_a=38.90$ °C e $T_p=49.87$ °C)

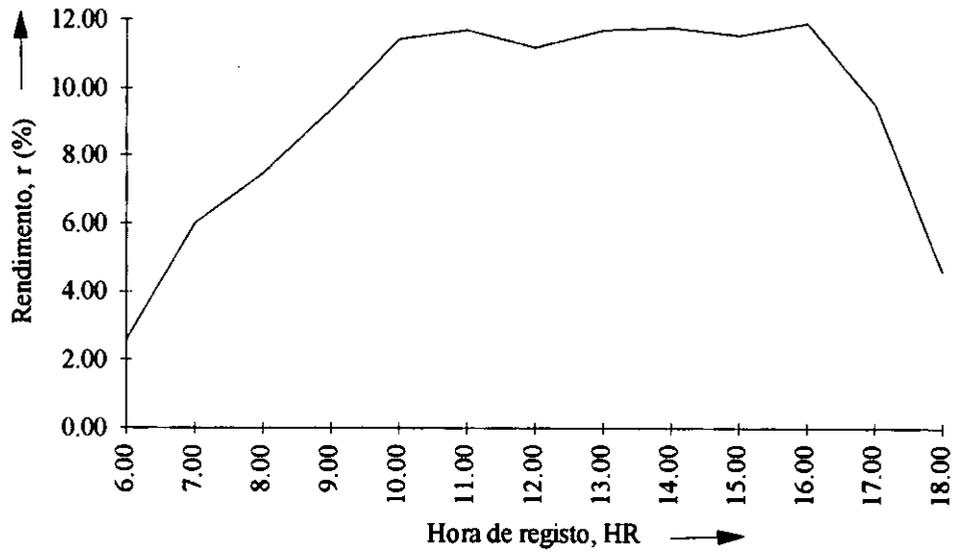


Fig.19. Curva de rendimento do painel num dia normal (céu limpo, $T_a=26.00$ °C e $T_p=33.93$ °C)



Fig.20. Curva de rendimento do painel num dia frio (céu nublado, $T_a=17.98$ °C e $T_p=20.23$ °C)

4. DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

Os resultados da análise dos dados experimentais mostram que o rendimento do painel testado neste estudo varia entre 2 e 14 % no período das 6.00 às 18.00 horas, em dependência das condições ambientais (figs. 19-21). No período das 9.00 às 16.00 horas, foi observada uma diminuição linear do rendimento à razão de $0.039 \% \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ com a temperatura do ar, e $0.023 \% \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ com a temperatura do painel; as temperaturas do ar e do painel variavam no mesmo período entre 18-40 $^\circ\text{C}$ e entre 20-50 $^\circ\text{C}$, respectivamente (figs. 17 e 18).

A dependência da temperatura do painel em função da temperatura do ar foi também analisada. O resultado encontrado é que, no mesmo período das 9.00 às 16.00 horas, a temperatura do painel é uma função linear da temperatura do ar (fig. 16); a razão de aumento encontrada é de 1.602 $^\circ\text{C}$ da temperatura do painel para cada 1 $^\circ\text{C}$ da temperatura do ar.

Estes resultados concordam qualitativamente com os reportados na literatura. Porém, os valores obtidos neste estudo não são comparáveis aos reportados noutros estudos do género, em virtude de serem diferentes as variáveis escolhidas para análise. De facto, em muitos estudos do efeito da temperatura no rendimento das células solares não se usa a temperatura do painel para referir a temperatura das células (na presença de luz, a temperatura das células é sempre mais alta que a do painel), como foi feito neste estudo. Além disso, a variável dependente frequentemente considerada, não é o rendimento de conversão em si mesmo como se fez aqui, mas a voltagem de circuito aberto (V_{oc}) ou a potência eléctrica transferida às cargas (P)[4].

5. RECOMENDAÇÕES

O potencial de energia solar em Moçambique é grande, devido a boa localização geográfica do país. No entanto, em virtude de a tecnologia fotovoltaica ser ainda muito cara, e também devido a falta de conhecimento daquelas aplicações em que ela é já economicamente viável ou competitiva com os sistemas a diesel, ainda não existe uma política governamental para a exploração da energia solar no país.

No "workshop" recentemente organizado pelo Projecto de Investigação em Energia Solar (de 03 à 08 de Outubro, 1994), várias instituições nacionais mostraram o seu interesse na utilização da energia solar fotovoltaica. O Instituto do Desenvolvimento Rural (INDER) e o Instituto Nacional de Hidrografia e Navegação (INAHINA), por exemplo, já têm projectos de utilização da energia solar em curso.

Para servir estes e outros potenciais interessados na utilização da energia solar com informações indispensáveis para a realização dos seus projectos, é necessário que estudos do género se extendam a todo o país.

A utilização da energia solar é a alternativa mais viável para se conseguir um desenvolvimento rápido e equilibrado do país. É pois necessário o estabelecimento de programas de investigação com carácter nacional na área de energia solar. A Universidade Eduardo pode promover esta ideia, apresentando aos órgãos de soberania do estado propostas de programas de acção nesta área, a serem realizadas pelo Departamento de Física.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Plante R. H., (1983), Solar Domestic Hot Water: A Practical Guide to Installation and Understanding, 332 pp New York, John Wiley & Sons.
- [2] Paes P. S. e Aguiar R., (1993), "I&D em energia solar Fotovoltaica no DER/LNETI", Revista de energia solar e biogás, nº 27, pp 65-72.
- [3] Karim A. N. M. and Rahman Md. M., (1993), "Cost effective analysis on the suitability of photovoltaic pumping systems in Bangladesh", Solar Energy Materials and Solar Cells, vol 30, nº 2, pp 117-188.
- [4] Lasnier F. and Ang T. G., (1990), Photovoltaic Engineering Handbook, 548 pp, Bristol, Adams Hilger.
- [5] Fahrenbruch A. L. and Bube R. H. (1983), Fundamentals of Solar Cells: Fotovoltaic Solar Energy Conversion, 559 pp, Boston, Academic Press.
- [6] Prasad C. R. *et al.*, (1987), "Computation of Difuse Solar Radiation", Solar Energy, vol 39, nº 6, pp 521-532.
- [7] Alonso M. and Finn E. J., (1975), "Nuclear Processes" In: Fundamental University Physics, vol 3, 7ª ed, pp 328-375, Reading, Addison-Wesley Publishing Company.
- [8] Crawley G. M., (1975), Energy, 337 pp, New York, Mcmillan Publishing Co.
- [9] Palz W. (1978), Solar Electricity: An Economic Approach to Solar Energy, 292 pp, London, Butter Worths.
- [10] Alcácer L. e Guimarães L., (1982), "Conversão Fotovoltaica da Energia Solar" In: Seminário sobre Tecnologias das Novas Energias, 95 pp, Lisboa, LNETI.
- [11] McDaniels D. K., (1979), The Sun: Our Future Energy Resource, 2ª ed, 346 pp, New York, John Wiley & Sons.

APÊNDICES

Apêndice I

Tabelas de dados experimentais

TABELAS.XLS

Tabela A 1

HR	Ech (Wm-2)	Eep (Wm-2)	Ta (°C)	Tp (°C)	dT (°C)	V (V)	I (A)	Pe (W)	Ps (W)	r (%)
6.00	0.79	0.94	17.62	17.47	-0.15	10.51	0.01	0.09	5.88	1.61
7.00	21.90	22.38	17.35	17.56	0.21	90.40	0.10	8.68	139.88	6.20
8.00	51.44	53.10	17.03	17.64	0.61	97.50	0.29	28.08	331.88	8.46
9.00	72.30	69.89	17.18	18.28	1.10	102.70	0.57	58.95	436.81	13.50
10.00	202.00	206.50	17.96	20.96	3.00	115.30	1.27	146.89	1,290.63	11.38
11.00	188.20	189.90	19.01	22.28	3.27	112.40	1.20	134.32	1,186.88	11.32
12.00	114.00	114.80	18.57	20.58	2.01	101.70	0.66	66.92	717.50	9.33
13.00	82.50	83.00	18.11	19.48	1.37	100.10	0.52	52.45	518.75	10.11
14.00	101.70	101.10	18.32	20.09	1.77	101.00	0.56	56.96	631.88	9.02
15.00	78.30	79.80	17.93	19.33	1.40	100.60	0.51	51.41	498.75	10.31
16.00	75.10	75.20	17.78	19.19	1.41	105.90	0.44	46.28	470.00	9.85
17.00	34.80	34.92	17.90	18.50	0.60	100.50	0.15	15.08	218.25	6.91
18.00	5.18	5.31	17.94	17.77	-0.17	51.16	0.02	1.18	33.18	3.55
Máximos	202.00	206.50	19.01	22.28	3.27	115.30	1.27	146.89	1,290.63	13.50

Tabela A2

HR	Ech (Wm-2)	Eep (Wm-2)	Ta (°C)	Tp (°C)	dT (°C)	V (V)	I (A)	Pe (W)	Ps (W)	r (%)
6.00	3.16	3.48	24.94	23.45	-1.49	28.17	0.02	0.42	21.72	1.95
7.00	64.01	73.20	25.71	25.17	-0.54	104.00	0.32	33.49	457.50	7.32
8.00	242.40	268.60	27.95	31.02	3.07	120.10	1.51	181.59	1,678.75	10.82
9.00	399.10	450.00	25.26	33.29	8.03	131.00	2.46	322.39	2,812.50	11.46
10.00	580.30	661.20	25.79	37.71	11.92	127.60	3.69	470.84	4,132.50	11.39
11.00	663.60	756.00	27.16	41.17	14.01	123.10	4.31	530.19	4,725.00	11.22
12.00	720.00	828.00	27.66	43.15	15.49	121.60	4.73	575.17	5,175.00	11.11
13.00	742.00	856.00	27.57	42.63	15.06	121.10	4.93	596.90	5,350.00	11.16
14.00	641.80	751.00	26.94	40.36	13.42	124.60	4.25	528.93	4,693.75	11.27
15.00	451.20	537.40	25.33	35.68	10.35	129.40	2.97	384.06	3,358.75	11.43
16.00	326.20	399.40	24.19	31.02	6.83	130.70	2.14	279.96	2,496.25	11.22
17.00	128.20	158.50	22.78	25.45	2.67	111.40	0.85	94.13	990.63	9.50
18.00	15.69	17.76	21.77	21.31	-0.46	74.50	0.07	5.14	111.00	4.63
Máximos	742.00	856.00	27.95	43.15	15.49	131.00	4.93	596.90	5,350.00	11.46

Tabela A3

HR	Ech (Wm-2)	Eep (Wm-2)	Ta (°C)	Tp (°C)	dT (°C)	V (V)	I (A)	Pe (W)	Ps (W)	r (%)
6.00	5.04	5.35	20.13	19.37	-0.76	38.86	0.03	0.97	33.44	2.90
7.00	90.10	95.30	20.67	21.01	0.34	106.60	0.49	52.45	595.63	8.81
8.00	242.80	263.30	22.69	26.54	3.85	119.40	1.54	183.52	1,645.63	11.15
9.00	443.90	489.00	25.13	34.67	9.54	130.10	2.72	353.35	3,056.25	11.56
10.00	609.70	679.20	27.08	42.29	15.21	126.20	3.77	475.90	4,245.00	11.21
11.00	717.00	804.00	27.96	45.99	18.03	121.40	4.56	553.58	5,025.00	11.02
12.00	759.00	853.00	28.17	45.54	17.37	122.10	4.82	588.64	5,331.25	11.04
13.00	736.00	833.00	27.78	43.73	15.95	123.20	4.70	579.41	5,206.25	11.13
14.00	649.70	743.00	27.51	42.24	14.73	123.50	4.21	520.18	4,643.75	11.20
15.00	502.20	578.70	26.61	38.78	12.17	130.80	3.09	404.04	3,616.88	11.17
16.00	312.70	362.90	25.38	33.51	8.13	126.70	1.99	252.51	2,268.13	11.13
17.00	121.20	140.10	23.66	27.04	3.38	110.70	0.73	81.03	875.63	9.25
18.00	17.94	19.50	22.44	22.37	-0.07	77.50	0.07	5.66	121.88	4.64
Máximos	759.00	853.00	28.17	45.99	18.03	130.80	4.82	588.64	5,331.25	11.56

TABELAS.XLS

Tabela A4

HR	Ech (Wm-2)	Eep (Wm-2)	Ta (°C)	Tp (°C)	dT (°C)	V (V)	I (A)	Pe (W)	Ps (W)	r (%)
6.00	4.10	4.23	22.14	21.67	-0.47	40.07	0.02	0.68	26.43	2.58
7.00	43.72	43.57	22.40	22.49	0.09	104.70	0.16	16.33	272.31	6.00
8.00	64.82	63.51	22.97	24.65	1.68	115.00	0.26	29.67	396.94	7.47
9.00	141.70	140.00	23.73	26.71	2.98	104.90	0.78	81.93	875.00	9.36
10.00	246.60	245.80	24.75	30.09	5.34	118.10	1.49	175.61	1,536.25	11.43
11.00	315.10	313.70	25.21	32.18	6.97	123.90	1.85	229.59	1,960.63	11.71
12.00	222.40	215.70	24.59	29.16	4.57	113.00	1.34	150.86	1,348.13	11.19
13.00	358.90	354.40	25.69	32.27	6.58	127.50	2.03	259.21	2,215.00	11.70
14.00	379.90	387.60	25.89	32.92	7.03	128.10	2.23	285.53	2,422.50	11.79
15.00	375.10	405.10	26.00	33.93	7.93	128.70	2.27	292.15	2,531.88	11.54
16.00	321.10	349.00	25.47	32.75	7.28	125.30	2.07	259.75	2,181.25	11.91
17.00	137.50	155.60	23.91	27.31	3.40	110.90	0.84	92.71	972.50	9.53
18.00	18.33	20.21	22.51	22.42	-0.09	80.50	0.07	5.80	126.31	4.59
Máximos	379.90	405.10	26.00	33.93	7.93	128.70	2.27	292.15	2,531.88	11.91

Tabela A5

HR	Ech (Wm-2)	Eep (Wm-2)	Ta (°C)	Tp (°C)	dT (°C)	V (V)	I (A)	Pe (W)	Ps (W)	r (%)
6.00	5.57	5.86	19.29	17.38	-1.91	42.17	0.03	1.18	36.60	3.23
7.00	75.50	81.40	21.66	20.88	-0.78	108.20	0.37	39.49	508.75	7.76
8.00	255.00	270.30	25.31	28.34	3.03	119.80	1.56	186.65	1,689.38	11.05
9.00	438.40	447.50	28.99	33.94	4.95	130.50	2.74	357.57	2,796.88	12.78
10.00	633.50	694.40	32.36	39.88	7.52	125.50	3.90	489.95	4,340.00	11.29
11.00	746.00	832.00	34.90	44.38	9.48	119.20	4.80	572.16	5,200.00	11.00
12.00	791.00	878.00	37.02	47.53	10.51	117.70	5.03	591.80	5,487.50	10.78
13.00	748.00	838.00	38.37	48.68	10.31	117.30	4.76	558.35	5,237.50	10.66
14.00	657.80	745.00	38.90	49.87	10.97	116.30	4.26	495.09	4,656.25	10.63
15.00	526.30	598.00	35.26	47.07	11.81	125.30	3.19	400.08	3,737.50	10.70
16.00	331.20	379.50	29.02	36.75	7.73	125.40	2.06	258.70	2,371.88	10.91
17.00	119.30	135.60	25.05	27.21	2.16	108.30	0.72	78.30	847.50	9.24
18.00	18.68	20.22	23.99	23.73	-0.26	78.90	0.08	6.00	126.38	4.74
Máximos	791.00	878.00	38.90	49.87	11.81	130.50	5.03	591.80	5,487.50	12.78

Tabela A6

HR	Ech (Wm-2)	Eep (Wm-2)	Ta (°C)	Tp (°C)	dT (°C)	V (V)	I (A)	Pe (W)	Ps (W)	r (%)
6.00	1.48	1.63	19.00	18.70	-0.30	17.49	0.01	0.23	10.17	2.24
7.00	15.24	15.41	19.40	19.28	-0.12	88.40	0.07	6.01	96.31	6.24
8.00	44.07	45.72	20.21	20.50	0.29	105.40	0.19	19.60	285.75	6.86
9.00	36.28	35.14	21.49	21.42	-0.07	98.60	0.18	17.55	219.63	7.99
10.00	91.60	97.30	20.43	21.56	1.13	107.00	0.55	58.42	608.13	9.61
11.00	89.00	89.40	19.17	20.40	1.23	107.10	0.48	50.87	558.75	9.10
12.00	73.60	73.90	18.30	18.89	0.59	109.50	0.39	42.38	461.88	9.17
13.00	112.80	112.80	17.69	19.20	1.51	107.00	0.67	71.16	705.00	10.09
14.00	89.40	90.90	17.64	18.88	1.24	106.00	0.52	55.23	568.13	9.72
15.00	43.32	43.99	18.13	18.83	0.70	106.70	0.18	19.42	274.94	7.06
16.00	69.72	71.30	18.93	19.75	0.82	104.40	0.39	40.72	445.63	9.14
17.00	13.81	14.00	18.57	18.59	0.02	93.20	0.06	5.59	87.50	6.39
18.00	3.75	3.73	18.36	18.07	-0.29	45.35	0.02	0.86	23.31	3.70
Máximos	112.80	112.80	21.49	21.56	1.51	109.50	0.67	71.16	705.00	10.09

TABELAS.XLS

Tabela A7

HR	Ech (Wm-2)	Eep (Wm-2)	Ta (°C)	Tp (°C)	dT (°C)	V (V)	I (A)	Pe (W)	Ps (W)	r (%)
6.00	0.73	0.88	15.38	15.11	-0.27	14.97	0.01	0.12	5.49	2.18
7.00	23.61	24.80	15.39	15.26	-0.13	85.20	0.13	10.91	155.00	7.04
8.00	87.70	90.40	16.04	17.10	1.06	110.50	0.51	56.80	565.00	10.05
9.00	32.28	33.50	15.83	15.96	0.13	107.10	0.13	14.03	209.38	6.70
10.00	123.70	127.70	16.21	17.37	1.16	106.00	0.82	86.71	798.13	10.86
11.00	65.27	67.89	16.38	17.14	0.76	107.70	0.36	39.20	424.31	9.24
12.00	72.80	77.90	16.44	17.12	0.68	104.50	0.48	50.16	486.88	10.30
13.00	78.80	82.10	16.37	16.79	0.42	97.70	0.54	53.05	513.13	10.34
14.00	143.90	148.30	17.34	18.89	1.55	113.60	0.89	101.10	926.88	10.91
15.00	114.30	116.10	17.98	20.23	2.25	101.30	0.75	76.38	725.63	10.53
16.00	86.30	90.00	18.12	19.42	1.30	97.60	0.57	55.73	562.50	9.91
17.00	50.20	53.48	18.27	18.97	0.70	112.40	0.24	26.64	334.25	7.97
18.00	18.19	22.60	18.19	17.93	-0.26	82.00	0.09	7.30	141.25	5.17
Máximos	143.90	148.30	18.27	20.23	2.25	113.60	0.89	101.10	926.88	10.91

Tabela A8. Resumo dos valores máximos registados durante 7 dias típicos

HR	Ech (Wm-2)	Eep (Wm-2)	Ta (°C)	Tp (°C)	dT (°C)	V (V)	I (A)	Pe (W)	Ps (W)	r (%)
11.00	188.20	189.90	19.01	22.28	3.27	112.40	1.20	134.32	1,186.88	11.32
12.00	720.00	828.00	27.66	43.15	15.49	121.60	4.73	575.17	5,175.00	11.11
11.00	717.00	804.00	27.96	45.99	18.03	121.40	4.56	553.58	5,025.00	11.02
15.00	375.10	405.10	26.00	33.93	7.93	128.70	2.27	292.15	2,531.88	11.54
14.00	657.80	745.00	38.90	49.87	10.97	116.30	4.26	495.09	4,656.25	10.63
10.00	91.60	97.30	20.43	21.56	1.13	107.00	0.55	58.42	608.13	9.61
15.00	114.30	116.10	17.98	20.23	2.25	101.30	0.75	76.38	725.63	10.53

Apêndice II

Curvas Experimentais de Irradiância e Temperatura

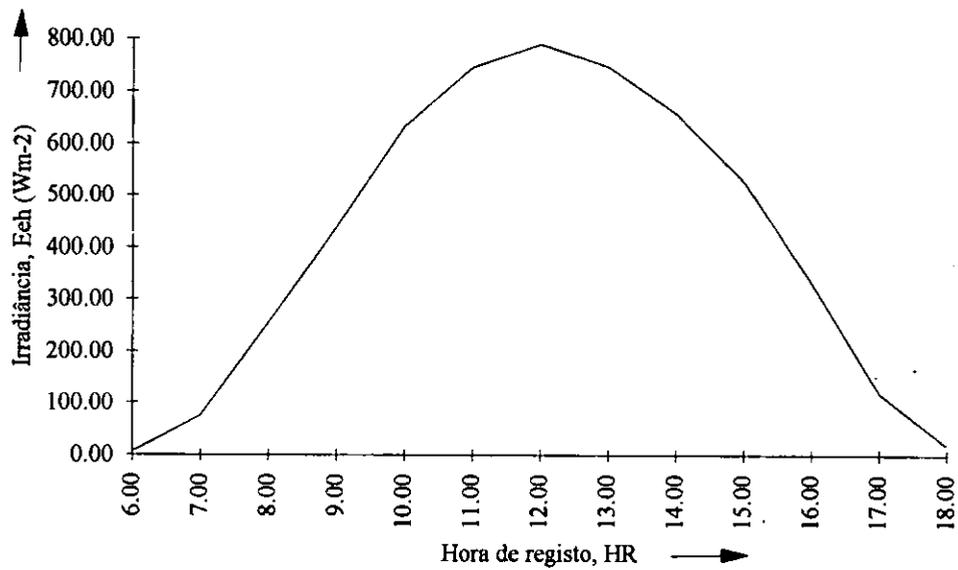


Fig.A1. Variação da irradiância no plano horizontal em função da hora de registo

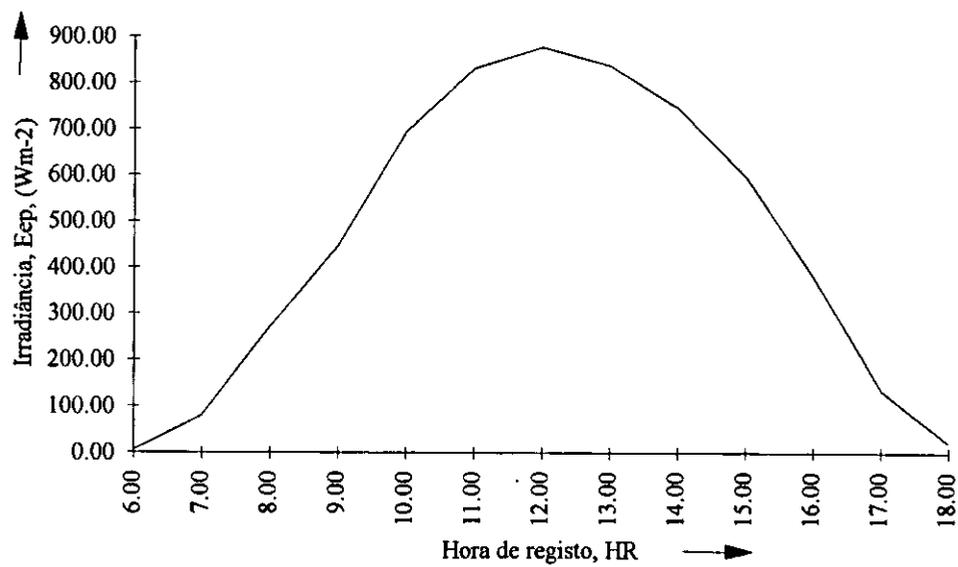


Fig.A2. Variação da irradiância no plano do painel em função da hora de registo

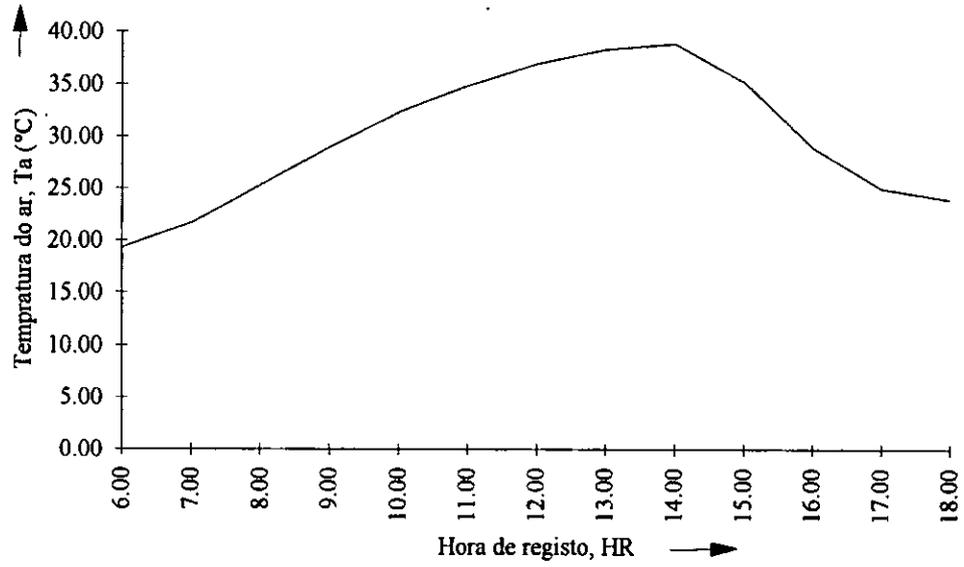


Fig.A3. Variação da temperatura do ar em função da hora de registo

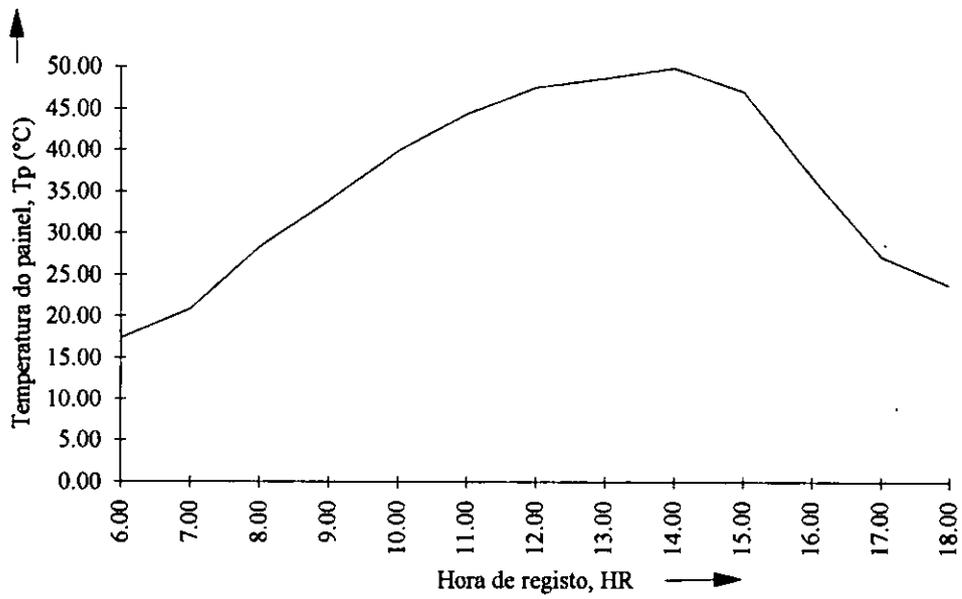


Fig.A4. Variação da temperatura do painel em função da hora de registo