

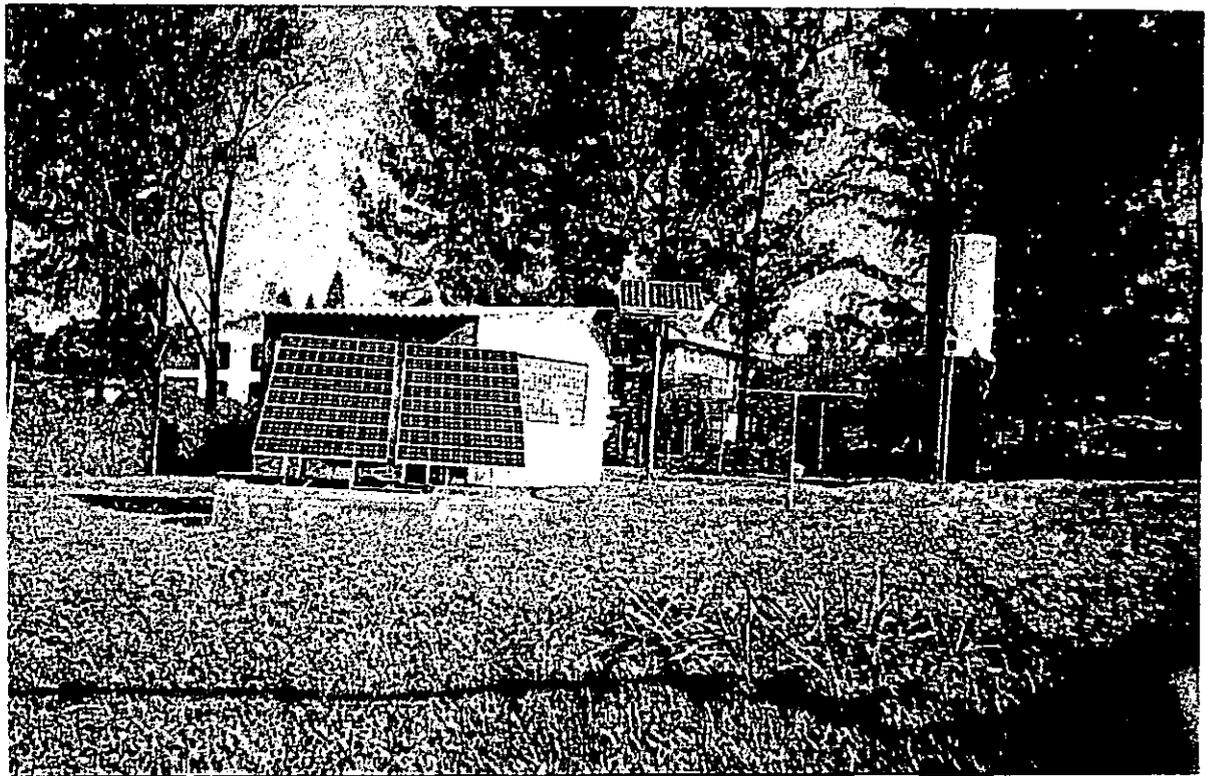


UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE
Faculdade de Ciências
Departamento de Física

Trabalho de Licenciatura

Tema:

**Caracterização de uma estação de bombeamento de água a
energia solar**



Autor:

Humberto Raúl Mutevuie

Maputo, Julho de 1998



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE

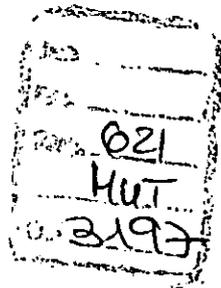
**Faculdade de Ciências
Departamento de Física**

**Trabalho de Licenciatura
Tema:**

**Caracterização de uma estação de bombeamento de água a energia
solar**

Autor:

Humberto Raúl Mutevuie



Maputo, Julho de 1998



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE

Faculdade de Ciências
Departamento de Física

Trabalho de Licenciatura
Tema:

**Caracterização de uma estação de bombeamento de água a energia
solar**

SUPERVISOR:

Prof.Doutor. Boaventura Chongo Cuamba

Maputo, Julho de 1998

**À minha filha Diana, meus pais, meus irmãos
à minha noiva.**

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar os meus sinceros agradecimentos a todos os que me ajudaram a realizar este trabalho, indicando assim o fim de uma das fases mais importantes da vida. Agradeço:

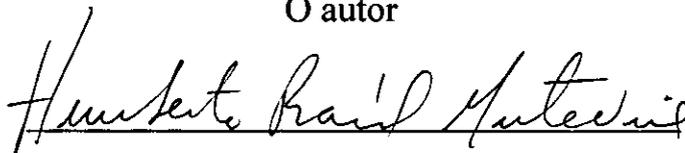
- Ao meu supervisor, Prof. Doutor. Boaventura Chongo Cuamba e ao Prof. Doutor. Rogério Utui pelo apoio técnico, material e moral durante a realização deste trabalho.
- Aos docentes do departamento de física, pela assistência feita durante a realização do curso.
- Ao corpo técnico e administrativo do departamento em particular aos senhores Meneses, Santos Victorino, pelo apoio concedido durante a recolha dos dados e as senhoras Rosa, Etelvina, Otilia e Alice.
- Aos meus colegas Ana Maria, Alberto Macamo, João Lobo, Félix Tomo pela disponibilidade permanente oferecida na resolução de todas questões por mim colocadas.
- Aos meus amigos Abel Mondlane, José Carlos, Afonso Zandamela (postumamente), Alfredo Maússe pela força que me deram.
- Aos casais Massicame (Zeferino), Massunda (Pedro) pela ajuda que me concederam durante os momentos mais difíceis da carreira.
- A toda família Mutevuie e Nhancale por tudo.
- A Deus.

Declaração de honra

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

Maputo, Julho de 1998

O autor


(Humberto Raúl Mutevuie)

RESUMO

Uma estação de bombeamento de água à energia solar é um conjunto de elementos que, tomando como base o efeito fotovoltaico, transforma a energia solar em eléctrica e esta, por sua vez, é transformada em energia potencial gravitacional da água.

Este sistema foi concebido para o abastecimento de água em regiões remotas nos países em desenvolvimento, que dificilmente são alcançadas pela rede eléctrica convencional devido a factores económicos. Por outro lado, o uso desta tecnologia contribui para a preservação do meio ambiente.

Pelo facto destes sistemas funcionarem ao ar livre e estarem, portanto, sujeitos às condições ambientais do local onde estiverem instalados, neste trabalho analisa-se o comportamento da estação de bombeamento de água em condições ambientais locais, baseando-se no parâmetro irradiância. Esta análise foi realizada sobre o sistema de bombeamento de água instalado no campus universitário, no âmbito das actividades do projecto de investigação em energia solar fotovoltaica em curso no Departamento de Física da Universidade Eduardo Mondlane.

O sistema tem quatro componentes principais, nomeadamente: gerador fotovoltaico, inversor, unidade motor/bomba e depósito de água.

As condições ambientais locais foram monitoradas medindo a radiação solar, temperatura, velocidade do vento, voltagem e corrente eléctrica. Com base na análise estatística dos dados experimentais obtidos, conclui-se que o rendimento do sistema de bombeamento de água melhorou bastante nestes últimos anos tendo em conta que nos anos oitenta era de mais ou menos 2% e o actual é de mais ou menos 4%.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO.....	6
2: FUNDAMENTOS TEÓRICOS	7
2.1. RADIAÇÃO SOLAR.....	7
2.2. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.....	10
2.2.1. Gerador fotovoltaico.....	10
2.3. OUTROS COMPONENTES DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO	16
2.3.1. Baterias (acumuladores).....	16
2.3.2. Inversores.....	17
2.3.3. Carga.....	17
3. METODOLOGIA PARA A DETERMINAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE COMPONENTES PRINCIPAIS DO SISTEMA FOTOVOLTAICO.....	18
3.1. BASES TEÓRICAS.....	18
3.2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	20
3.3. DESCRIÇÃO DO MATERIAL USADO.....	20
4. TRATAMENTO DE DADOS E RESULTADOS.....	22
4.1. RELAÇÃO ENTRE IRRADIÂNCIA NO PLANO INCLINADO E NO PLANO HORIZONTAL.....	22
4.2. RELAÇÃO ENTRE IRRADIÂNCIA NO PLANO INCLINADO E ENERGIA GERADA.....	25
4.3. DETERMINAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE CONVERSÃO EM CADA COMPONENTE DO SISTEMA.....	28
4.3. DETERMINAÇÃO DOS ERROS.....	29
5. CONCLUSÕES.....	30
6. LITERATURA.....	31
ANEXOS.....	32

1. INTRODUÇÃO

As fontes não renováveis de energia tais como, petróleo, carvão e gás constituem a base importante para o desenvolvimento da sociedade; no entanto, o seu uso trás consequências desagradáveis ao meio ambiente. Sendo assim, há uma necessidade de procurar fontes alternativas de energia renovável. Grandes esforços estão sendo desenvolvidos em muitos países na investigação de fontes deste tipo de energias, tais como, energia eólica, hídrica e energia solar.

Acredita-se, de acordo com as investigações, que a maior parte das necessidades da energia que se consome na Terra pode ser fornecida a partir de fontes de energias renováveis[7].

Existem duas maneiras de conversão da luz solar: a conversão térmica e a fotovoltaica.

O desenvolvimento das células fotovoltaicas teve início há 140 anos após a descoberta do efeito fotovoltaico em 1839 pelo físico francês Edmund Becquerel quando trabalhava no laboratório de seus pais em França. Este observou que quando a luz incidia sobre um eléctrodo numa solução electrolítica desenvolvia-se uma fotovoltagem. Cerca de 40 anos mais tarde, ou seja em 1877, Adams e Day observaram pela primeira vez um efeito similar em materiais de estado sólido, pouco depois de Smith (1873) ter demonstrado o efeito da fotocondutividade em selénio.

Cedo, os pesquisadores de materiais de estado sólido incluindo Grandal e Schotky, realizaram um trabalho pioneiro em células solares de selénio e de óxido de cobre que foram largamente usadas em registos de exposições fotográficas. Apesar desta demonstração ter sido feita muito cedo, não foi possível a obtenção de geradores fotovoltaicos até serem desenvolvidas as primeiras células de silício em 1954, o início da era moderna da tecnologia fotovoltaica.

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 estar no espaço, foi instalada no Vanguard I, o segundo satélite americano em órbita em 1958.

A tecnologia fotovoltaica está suficientemente desenvolvida, razão pela qual pode desempenhar um papel importante no fornecimento de energia, em áreas remotas nos países em desenvolvimento. Uma das principais condições que merece uma atenção especial nas pesquisas actuais é a

optimização do desempenho dos sistemas baseados nesta tecnologia. A conversão fotovoltaica de energia solar está intimamente ligada ao meio ambiente. Portanto, de uma boa compreensão dos parâmetros ambientais do lugar, resulta que uma operação tecnológica seja essencial para um uso eficiente. Para isso, a monitorização do sistema fotovoltaico é um pré requisito.

Em Moçambique, o programa de pesquisa em tecnologia fotovoltaica iniciou-se em 1991. Foi projectado, instalado e monitorado o funcionamento de um sistema de bombeamento de água usando o efeito fotovoltaico, com capacidade de $848W_p$ na região de Maputo, no campus universitário da U.E.M.

A caracterização compreende a análise detalhada do desempenho da maioria dos componentes do sistema, nomeadamente o gerador, inversor, e a unidade motor/bomba.

Desde que se iniciou a actividade de pesquisa de fotovoltaicos em Moçambique, uma das maiores expectativas é da facilidade de promoção destes, sendo, por outro lado, o objectivo desta pesquisa o de desenvolver um modelo de transferência de tecnologia fotovoltaica eficiente no contexto dos países em desenvolvimento de uma maneira geral e de Moçambique em particular.

O objectivo deste trabalho é estudar o comportamento da estação de bombeamento de água em condições ambientais locais.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. RADIAÇÃO SOLAR.

Chama-se radiação solar à emissão de energia solar para o espaço cósmico, sob forma de ondas electromagnéticas.

O sol é um gigantesco reactor termonuclear que emite energia, aproximadamente como um corpo negro a uma temperatura de 6000K. A energia é emitida principalmente sob forma de radiação electromagnética, que se propaga entre os 30m de onda curta (ondas de rádio) até 1Angstrom de raios X. Contudo, a maior parte da energia solar está na região do visível e perto da região do infravermelho. O sol é responsável por uma série de fenómenos chamados actividade solar e que influenciam o ambiente terrestre.

O espectro do corpo negro da superfície do sol é modificado pela variação da temperatura ao atravessar o disco solar como consequência da atmosfera solar e linhas de absorção de Fraunhofer. A figura 2.1 mostra o espectro solar fora da atmosfera e a figura 2.2 compara o espectro solar a várias curvas do corpo negro.

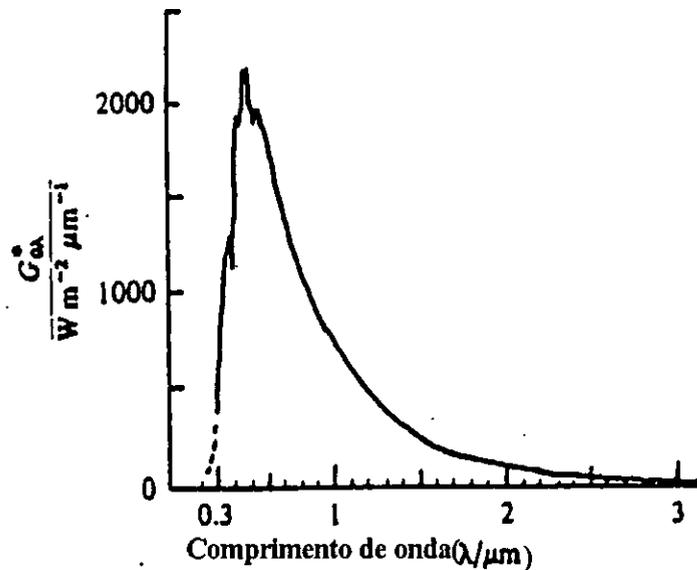


Fig 2.1. Distribuição espectral da radiação solar fora da atmosfera terrestre (segundo a fonte[1]).

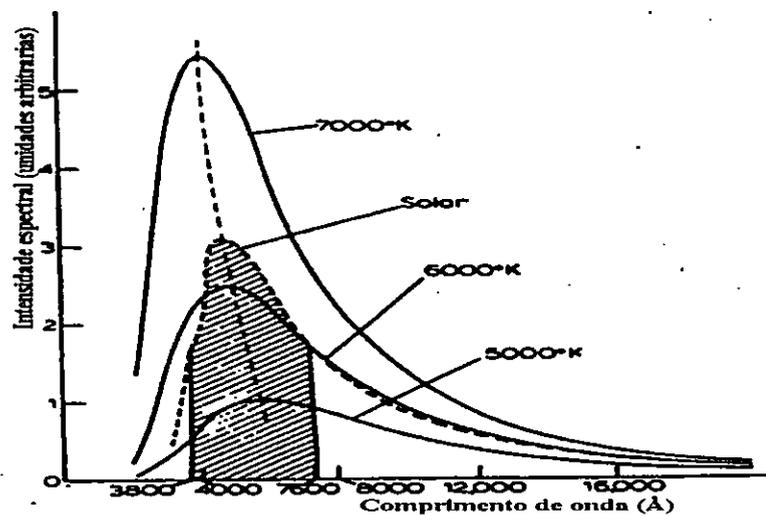


Fig 2.2. Distribuição espectral da radiação solar comparada com a distribuição do corpo negro correspondente a diferentes temperaturas (segundo a fonte [2]).

No espaço externo, 98% da energia total irradiada pelo sol está situada entre 0,25 e 3,0 μm .

A constante solar é definida como sendo a energia média recebida por uma superfície unitária em 1 segundo, sendo esta superfície colocada perpendicularmente à direcção de incidência da radiação solar. No espaço livre (vácuo) a meia distância entre o Sol e a Terra, o valor medido é de 1.353kWm^{-2} . No entanto a radiação solar real no espaço livre, difere deste valor por $\pm 3,35\%$, devido às variações da distância entre o Sol e a Terra durante o ano. Existem também flutuações na radiação emitida pelo Sol, que estão na ordem de 1.5% . O espectro solar fora da atmosfera terrestre pode ser subdividido em três importantes regiões que são:

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

A intensidade e a distribuição espectral da radiação solar que atinge a superfície da Terra depende da composição da atmosfera assim como do percurso da radiação na atmosfera. Os parâmetros mais importantes da atmosfera que afectam a radiação solar são: água, efeitos de turbidez que exprimem os efeitos do nevoeiro e o relativo espalhamento, o ozono, a escuridão do céu e o efeito da base de reflexão. Efeitos geométricos tais como ângulo de declínio do sol são manifestados pela variação do percurso na atmosfera. Considerando apenas a radiação directa no receptor apontado directamente para o sol, estes efeitos geométricos podem ser quase completamente descritos especificando o ângulo de zénite do sol; que é o ângulo medido entre a recta que une entre si os centros do sol e da terra, passando pelo ponto de observação, e a normal ao ponto contendo a linha do horizonte. O ângulo de Zénite varia com o tempo do dia, estação do ano, e com a latitude e longitude geográficas do ponto de observação.

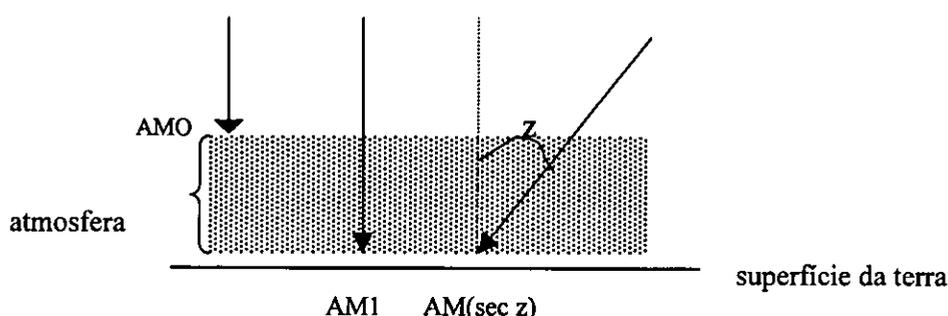


Fig 2.3. Ilustração do espectro da radiação solar designado AM0 no espaço, AM1 na superfície da terra para uma incidência normal e AM(sec z) na superfície da terra onde z é o desvio da normal no ponto de incidência e é designado ângulo de zénite (segundo a fonte[2]).

No seu percurso pela atmosfera a luz do sol é modificada pelos seguintes processos:

- Dispersão da luz solar, que é responsável pela cor azul do céu.
- Bandas de absorção electrónica, principalmente em oxigénio, nitrogénio e ozono. Quase toda a radiação com $\lambda < 0.29 \mu\text{m}$ (região ultravioleta) é absorvida pelo ozono.
- Bandas de absorção rotacional e vibracional em H_2O e CO_2 . Quase toda a radiação com $\lambda > 3.0 \mu\text{m}$ é absorvida por H_2O e CO_2 .
- Dispersão por aerossóis e matéria dispersa.
- Reflexão e turbulência devida à variação do índice de refração com a temperatura e pressão.

A radiação total que incide sobre a superfície horizontal ou inclinada é chamada radiação global, e, é a soma da radiação directa e da radiação difusa. A radiação difusa é o resultado da dispersão no céu e também reflexão da luz do sol nas nuvens e na superfície da Terra. A radiação difusa nas condições de céu pouco nublado é muito forte na porção azul do espectro e contribui em cerca de 8 a 10% da radiação total num dia razoavelmente claro, e é consideravelmente maior para ângulos próximos do zénite.

Insolação é a quantidade de energia recebida numa área de 1 m^2 de superfície horizontal num dia. Ela difere em diferentes regiões e em diferentes estações do ano.

2.2. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.

2.2.1. Gerador fotovoltaico.

2.2.1.1. Considerações básicas.

Uma célula solar é um dispositivo concebido para converter a luz solar em energia eléctrica, através do efeito fotovoltaico. A absorção da luz nos semicondutores gera portadores de carga eléctrica que são electrões e lacunas electrónicas. Se existir um campo eléctrico, isto é, "voltagem", dentro do semiconductor, os electrões e lacunas movem-se em sentidos opostos e esta separação de cargas eléctricas resulta na criação da voltagem. Este é o efeito fotovoltaico.

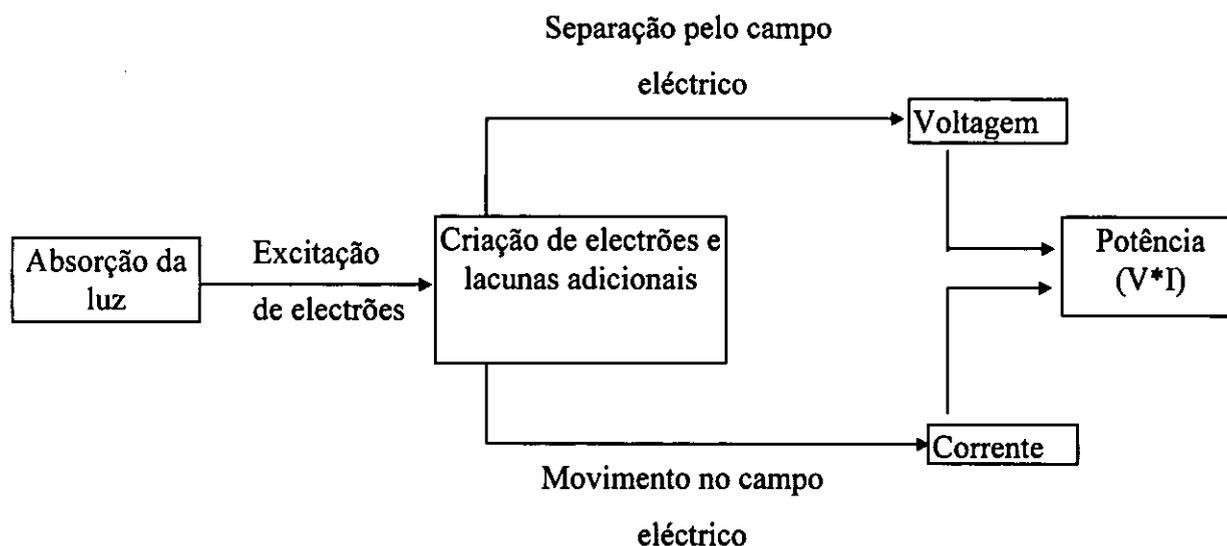


Fig 2.5. Representação esquemática do efeito fotovoltaico (segundo a fonte[2]).

A célula solar consiste geralmente de uma lâmina delgada 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.

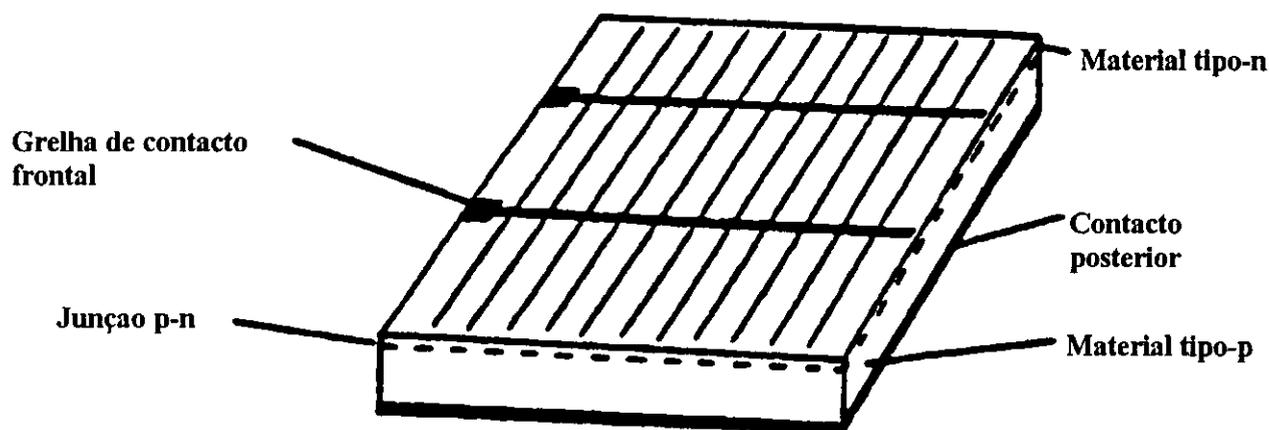


Fig 2.6. Representação de uma célula solar (segundo a fonte[2]).

O campo eléctrico interno estabelece-se numa região chamada junção p-n, separando dois lados da lâmina delgada diferentemente dopados: um, dopado com impurezas aceitadoras (lado tipo p), e o outro, com impurezas dadoras (lado tipo n).

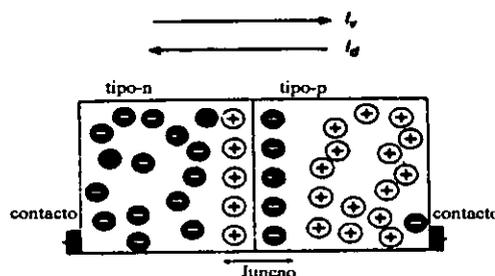


Fig 2.7. Esquema da região da junção num material semicondutor (segundo a fonte[2]).

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).

2.2.1.2. Características eléctricas de um gerador fotovoltaico.

Pela sua construção, uma célula solar assemelha-se a um díodo de junção com uma área útil mais larga do que a dos díodos 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 de díodo (I_0). Portanto, a corrente eléctrica total que se pode obter nos terminais de uma célula solar, incluindo a fotocorrente e a corrente de díodo, é:

$$I = I_f - I_0, \quad (1)$$

Esta equação permite representar uma célula solar como o gerador eléctrico cujo circuito equivalente está mostrado na figura (2.8).

A corrente eléctrica que uma célula solar pode fazer passar através de uma carga externa é uma função da voltagem nos seus terminais. A curva $I = f(V)$, que representa esta dependência, é chamada característica $I - V$ da célula.

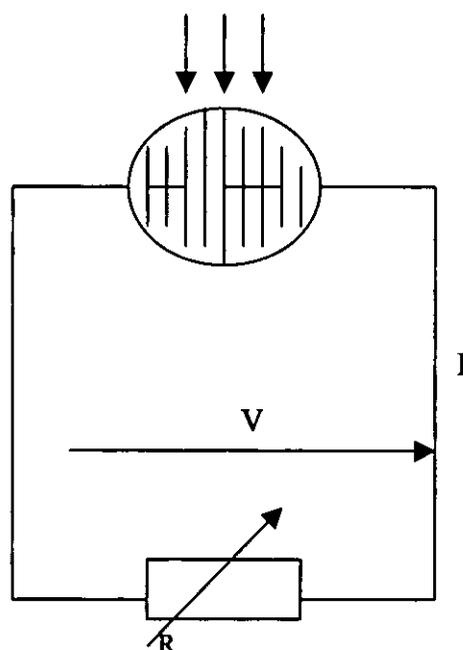


Fig 2.8. circuito equivalente de um gerador eléctrico(segundo a fonte[3])

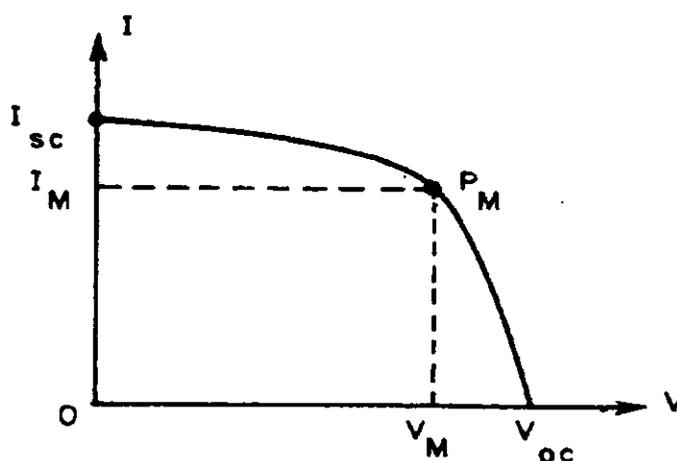


Fig 2.9. característica I-V, (segundo a fonte [2]).

Com base na sua característica $I-V$, a operação de uma célula solar (gerador de energia eléctrica), pode descrever-se facilmente. Nesta característica estão definidos três pontos de operação da célula. No primeiro ponto (I_{sc}), a célula funciona como uma fonte de corrente, podendo fornecer uma corrente eléctrica praticamente independente da voltagem nos seus terminais. No segundo ponto (V_{oc}), a célula funciona como um gerador de tensão, sendo praticamente constante a voltagem nos seus terminais. Finalmente, no ponto (P_M) 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. Neste ponto, um aumento da voltagem nos terminais da carga corresponde a uma diminuição da corrente eléctrica no circuito.

A potência eléctrica transferida por uma célula solar para uma carga é dada pela relação: $P = V * I$,

Os conversores de energia em electricidade podem ser geralmente classificados em fontes de tensão e de corrente.

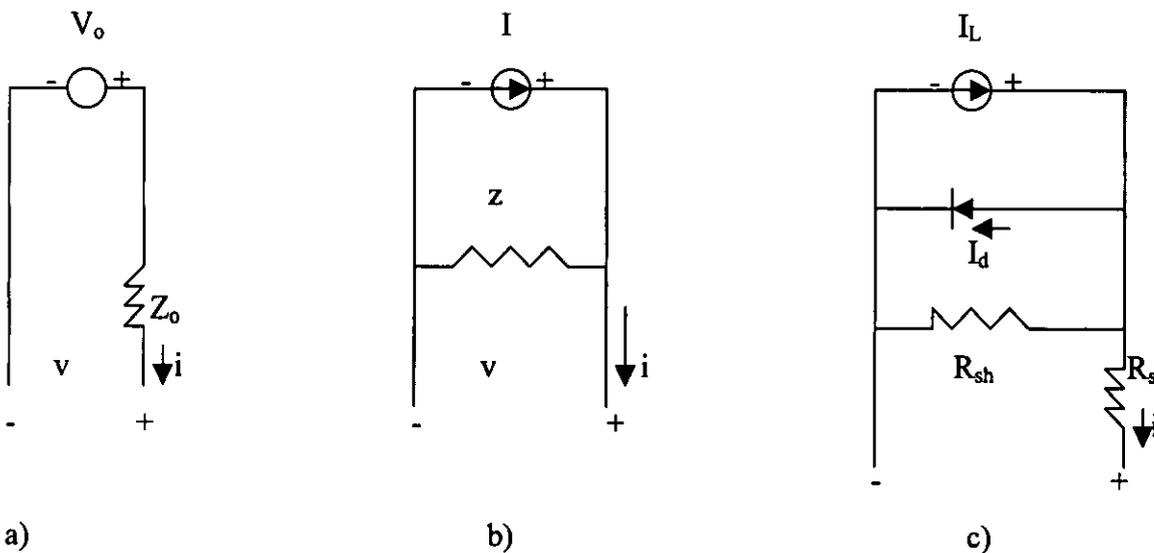


Fig 2.10. Diagrama eléctrico funcionando como a) gerador de tensão, b) gerador de corrente, c) gerador fotovoltaico (segundo a fonte[3]).

A equação de uma célula fotovoltaico é representada da seguinte maneira:

$$I = I_L - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{e(V + IR_S)}{AK_B T} \right] - 1 \right\} - \frac{V + IR_S}{R_{SH}} \quad (2)$$

Onde:

- A - é uma constante própria da curva arbitrária que varia entre 1 e 5.
- T - temperatura absoluta do painel.
- V - voltagem das células.
- I - corrente das células.
- e - carga do electrão.
- R_s - resistência em série.
- K_B - constante de Boltzman.
- I₀- corrente de saturação do díodo.
- I_L- corrente gerada pela luz.
- R_{SH}- resistência em paralelo.

I_0 é também chamado corrente de difusão. Seu valor é de cerca de $10^{-8} A/m^2$ para boas células e $10^{-7} A/m^2$ para material de silício. As características eléctricas de uma terminal de células solares sob influência de condições meteorológicas variáveis (nível de irradiância, temperatura ambiente) podem ser descritas pela sua característica I-V como mostra a figura (2.9). Esta figura ilustra três pontos significativos :

- 1º Corrente de curto circuito I_{SC} .
- 2º Voltagem do circuito aberto V_{OC} .
- 3º O ponto de potência máxima P_M .

A corrente de curto circuito (I_{SC}) é a corrente medida na terminal da célula solar, quando a voltagem é zero; ($V=0$). Onde:

$$I_{SC} = I_L = KE_e, \quad (3)$$

Nesta equação K é uma constante e E_e é a irradiação.

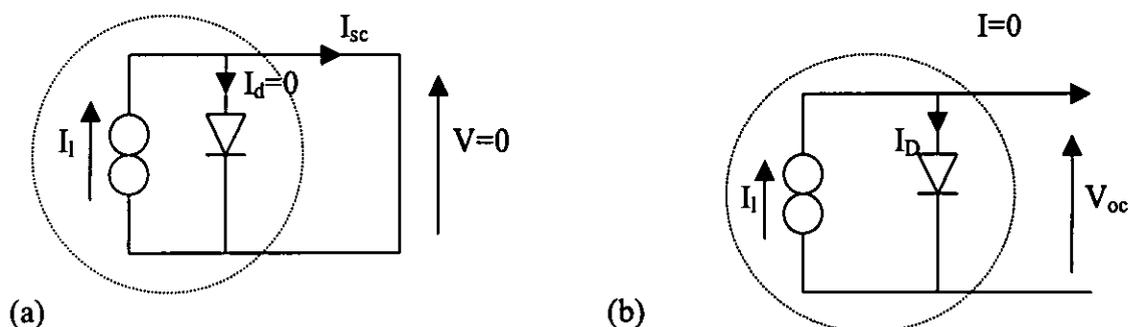


Fig 2.11. célula solar (segundo a fonte[3]). a)Representa a célula solar em curto circuito, b)Representa a célula solar em circuito aberto.

A voltagem de circuito aberto V_{OC} corresponde à queda de tensão através da junção p-n quando esta é atravessada pela luz geradora de corrente I_L , isto significa que $I=0$.

Em circuito aberto, a voltagem (V_{OC}) pode ser expressa da seguinte maneira:

$$V_{oc} = \frac{AK_B T}{e} \ln \left(\frac{I_L + I_0}{I_0} \right) = \frac{AK_B T}{e} \ln \left(\frac{KE_e}{I_0} \right), \quad (4)$$

O ponto de potência máxima, P_M , ocorre na inflexão da curva $I-V$. Neste ponto obtém-se a corrente óptima, I_M , e a máxima voltagem, V_M .

A potência de pico (Peak power) é a potência óptima fornecida por uma célula a partir de uma irradiância de 1kW/m^2 a uma temperatura de 25°C .

A eficiência é dada pelo quociente entre potência eléctrica óptima (P_{opt}) fornecida pela célula e a irradiância E_e recebida a uma determinada temperatura da célula; isto é:

$$\eta = \frac{P_{opt}}{AE_e}, \quad (5)$$

Onde:

P_{opt} (Watt) - Potência óptima. E_e (W / m^2) - Irradiância.

A (m^2) - Área da célula.

O valor teórico máximo da eficiência das células solares é de 35%.

Para controlar a qualidade da célula determina-se o Fill factor (FF), pela expressão:

$$FF = \frac{V_M I_M}{V_{oc} I_{Sc}}, \quad (6)$$

Este factor tem um valor de 0,7 para células boas e é sempre menor que 1,0.

2.3. OUTROS COMPONENTES DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO.

2.3.1. Baterias (acumuladores).

Tendo em conta que o período de insolação é limitado e, considerando que a corrente eléctrica é necessária durante a ausência do sol, surgiu a necessidade de construir elementos capazes de armazenar a tensão gerada durante o dia que são as baterias ou acumuladores. As baterias podem ser do tipo níquel-cádmio, níquel-ferro, chumbo-ácido e sódio-enxofre. Deste conjunto de baterias os tipos mais usados para sistemas fotovoltaicos são as baterias de chumbo-ácido com ácido sulfúrico como electrólito e as baterias de níquel-cádmio com hidróxido de potássio como electrólito.

2.3.2. Inversores.

As células solares são dispositivos que geram corrente contínua (DC). Tendo em conta que existem elementos que consomem apenas corrente alternada (AC), surgiu uma necessidade de construir aparelhos que têm a função de converter a corrente contínua produzida pelas células (gerador fotovoltaico) em corrente alternada que é consumida pela carga. A voltagem de uma fonte de corrente contínua é normalmente de 12, 24, 48 ou 100V, enquanto que na saída do inversor tem-se tipicamente, 110 ou 240V. A frequência de saída é de 50-60Hz. As ondas no inversor podem ter a forma quadrangular, sinusoidal ou de degraus. A eficiência dos inversores está entre 95-97%. Enquanto algum equipamento de corrente alternada, tal como uma lâmpada, opera razoavelmente com a onda de forma quadrangular, outros elementos como o motor de (AC) funcionarão com uma baixa eficiência dissipando muito calor. Isto porque, a onda quadrada apresenta variações bruscas (interrupções) que causam vibrações nos motores. Para a conversão da corrente contínua das fontes fotovoltaicas em corrente alternada foi desenvolvida a técnica de modulação do pulso. Nesta técnica, o pulso padrão é gerado desligando e ligando o interruptor na frequência que é consideravelmente alta que a frequência de saída.

2.3.3. Carga.

Todo o elemento que consome a potência gerada por qualquer dispositivo é designado por carga. Constituem cargas os seguintes elementos: lâmpadas, electrodomésticos e, para este caso, a unidade motor/bomba. As cargas transformam energia eléctrica num outro tipo de energia.

A unidade motor/bomba converte a energia eléctrica (AC) em energia potencial gravitacional da água. Para esta experiência, usou-se uma unidade submersa motor/bomba. Este é do tipo motor de indução também conhecido por motor assíncrono. Nestes motores, a energia eléctrica é transmitida dum sistema fixo para um sistema móvel, ou reciprocamente, por fenómenos de indução mútua.

Pelo facto do sistema induzido ou rotor não ser alimentado por nenhuma fonte de energia eléctrica exterior, mas ser apenas percorrido por correntes induzidas nele pelo campo girante produzido pelo indutor ou estator, estes motores são designados por motores de indução. Como nestas máquinas a velocidade do rotor não está rigidamente ligada à velocidade do campo girante indutor, são também chamados motores assíncronos.

O funcionamento destes motores é muito semelhante ao funcionamento dos transformadores, tomando em consideração a transformação da energia eléctrica em energia mecânica no veio da máquina.

- **Sistema de bombeamento de água.**

Nos sistemas de bombeamento de água, o uso de baterias e reguladores da voltagem pode ser eliminado pela cuidadosa escolha, de componentes do sistema. Uma ligação directa entre os módulos fotovoltaicos e a bomba faz com que o sistema seja simples e autónomo. Reparações e manutenção são reduzidas para o mínimo. Além disso, o sistema começa a bombear no início do dia e termina no fim da tarde sem nenhuma intervenção externa e opera com uma boa adaptação à energia solar disponível. Com estas características, o sistema torna-se apropriado para regiões rurais nos países em desenvolvimento, onde há poucos técnicos que possam operar e fazer a manutenção dos sistemas que funcionam na base dos combustíveis. A figura 2.4 ilustra um esquema de uma estação de bombeamento de água à energia solar, onde cada componente é basicamente um conversor de energia pois, a energia é recebida pelo painel sob forma de radiação e sai pela bomba sob forma de água.

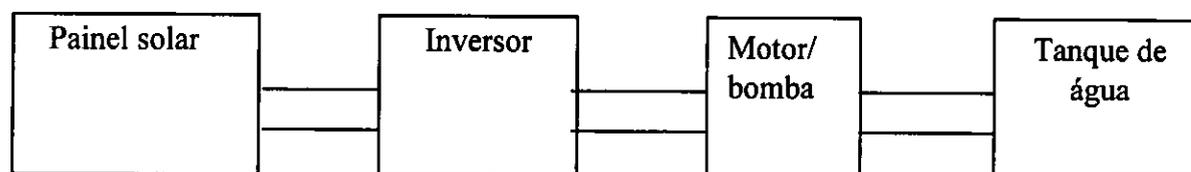


Fig 2.4. esquema de um sistema de bombeamento de água a energia solar.

3. METODOLOGIA PARA A DETERMINAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE COMPONENTES PRINCIPAIS DO SISTEMA FOTOVOLTAICO.

3.1. BASES TEÓRICAS.

A eficiência de qualquer dispositivo é dada pela razão entre energia ou potência útil que sai do dispositivo num determinado intervalo de tempo (Δt) e energia ou potência que entra no dispositivo durante o mesmo intervalo de tempo (Δt). Esta relação pode ser representada pela expressão:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{E_{out}}{E_{in}} \quad (8)$$

Este conceito pode ser usado para determinar a eficiência do gerador fotovoltaico, inversor e da unidade motor/ bomba. A eficiência do gerador fotovoltaico pode ser expressa como:

$$\eta_{\text{gerador}} = \frac{I_{dc} \cdot V_{dc}}{A \cdot E_e}; \quad (9)$$

Onde :

E_e - irradiância . I_{dc} - corrente produzida pelas células.

A - área das células. V_{dc} - voltagem criada pelas células.

Da mesma forma, a eficiência do inversor pode ser determinada da seguinte forma:

$$\eta_{\text{inversor}} = \frac{I_{ac} \cdot V_{ac}}{I_{dc} \cdot V_{dc}}; \quad (10)$$

Onde:

I_{ac} - é corrente alternada.

V_{ac} - é voltagem de corrente alternada.

Finalmente a eficiência da unidade motor/bomba será:

$$\eta_{\text{motor / bomba}} = \frac{E_{\text{hidraulica}}}{E_{ac}}; \quad (11)$$

Onde:

$E_{\text{hidraulica}}$ - é a energia potencial da água.

E_{ac} - é a energia que sai do inversor .

A eficiência global do sistema obtém-se achando o produto das eficiências das componentes; assim :

$$\eta_{\text{global}} = \eta_{\text{gerador}} \cdot \eta_{\text{inversor}} \cdot \eta_{\text{motor / bomba}}; \quad (12)$$

3.2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.

Devido à insuficiência de dados causada pela avaria do leitor da corrente alternada (AC), por um lado, e a possibilidade de ter valores de energia já calculados automaticamente, por outro lado, as fórmulas da eficiência reduzem-se a:

- Eficiência do gerador:

$$\eta_{gerador} = \frac{P_{dc}}{A.E_e}, \quad (13)$$

Onde:

P_{dc} = é potência de corrente contínua.

- Eficiência da unidade motor/bomba:

$$\eta_{motor / bomba} = \frac{mgh}{P_{out} * 3,6 * 10^3}, \quad (14)$$

Onde:

m- massa total da água bombeada.

g- aceleração de gravidade.

h- altura em que se encontra armazenada a água em relação ao nível hidrodinâmico.

O valor $3,6 * 10^3$ usa-se para converter a energia de Watt-hora para Joule (tendo em conta que 1Wh corresponde a $3,6 * 10^3$ J).

E, finalmente, a eficiência global do sistema incluindo o inversor será:

$$\eta_{global} = \eta_{gerador} * \eta_{motor / bomba}; \quad (15)$$

3.3. DESCRIÇÃO DO MATERIAL USADO.

Para esta análise, usou-se um equipamento que está integrado no sistema fotovoltaico experimental de bombeamento de água instalado no Campus universitário da U.E.M, em Maputo. O sistema foi projectado para fornecer água a uma comunidade de 250 pessoas, e tem uma potência de pico de 848 Wp, fornecendo em média $10m^3$ de água por dia. A figura 3.1 ilustra o sistema fotovoltaico experimental de bombeamento de água instalado no Campus universitário da U.E.M.

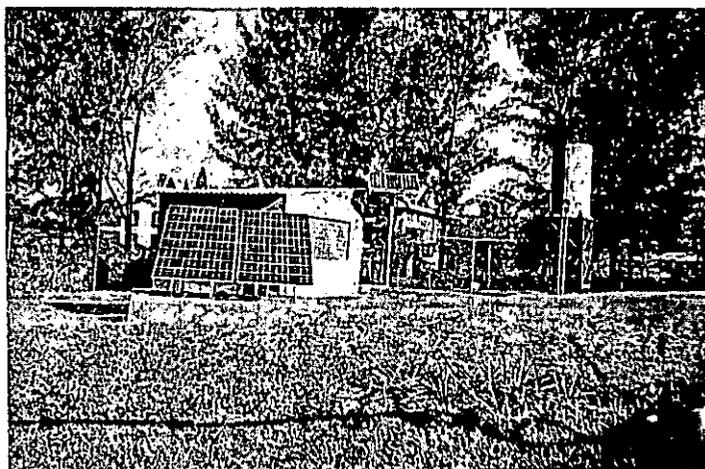


Fig 3.1. Sistema fotovoltaico experimental de bombeamento de água instalado no Campus Universitário da U.E.M

O sistema é constituído pelos seguintes elementos:

- Um painel solar constituído por 16 módulos tendo cada módulo 36 células, interligadas em série com uma área de $16 * 36 * 102,9 \text{ cm}^2$ ($5,92704\text{m}^2$).
- Um Inversor.
- Uma unidade submersa motor /bomba (à 32 m de profundidade).
- Um *datalogger*.
- Um computador do tipo PC.

segundo mostra a figura 3.2.

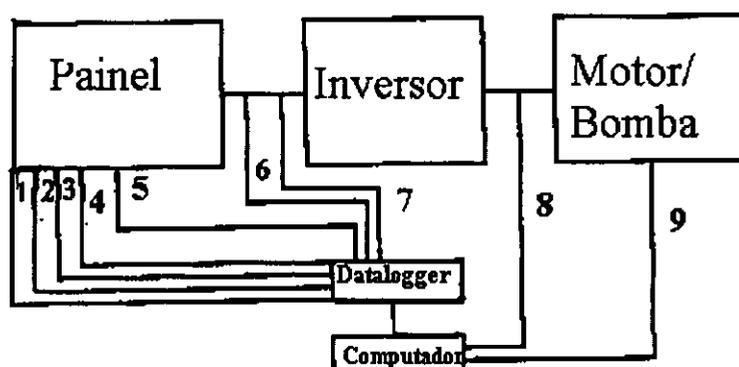


Fig 3.2. Esquema de medição da eficiência de um sistema de bombeamento de água.

Legenda

1. Irradiância no plano horizontal.
2. Irradiância no plano inclinado.
3. Temperatura ambiente.
4. Temperatura do painel.
5. Velocidade do vento.
6. Tensão (V_{dc}).
7. Corrente contínua (I_{dc}).
8. Energia gerada pela corrente alternada.
9. Volume de água.

4. TRATAMENTO DE DADOS E RESULTADOS.

A actividade de pesquisas teve lugar durante o período de 12 meses (de 1 de Julho de 1997 a 30 de Junho de 1998). O *datalogger* Campbell scientific 21X permitiu a recolha de dados instantâneos medidos pelos sensores de 5 em 5 segundos (Irradiância, Temperatura, Tensão, Corrente, Velocidade do vento e energia). Em cada hora esses dados eram internamente processados pelo *datalogger* afim de se obter 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 guardados 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.

4.1. RELAÇÃO ENTRE IRRADIÂNCIA NO PLANO INCLINADO E NO PLANO HORIZONTAL.

Um dos parâmetros principais nos sistemas fotovoltaicos é a irradiância. Durante as análises este parâmetro é lido nos planos horizontal e inclinado. Sendo assim há uma necessidade de analisar a sua dependência. As figuras 4.1 e 4.2 mostram a relação entre a irradiância no plano inclinado e no plano horizontal para dois dias de céu limpo e correspondentes a estações do ano diferentes.

Tabela 4.1. Dados obtidos a 19/10/1997.

Ano	Dia do Ano	Hora	Irradiância no plano Horizontal (W/m^2)	Irradiância no plano inclinado (W/m^2)	Temperatura ambiente ($^{\circ}C$)	Temperatura do painel ($^{\circ}C$)	Energia (kWh)
1997	19-Out	0500	0.403	0.432	15.94	15.66	0.000
1997	19-Out	0600	9.880	11.16	16.04	15.07	0.005
1997	19-Out	0700	121.6	102.9	18.49	18.11	0.063
1997	19-Out	0800	362.7	353.6	21.21	25.72	0.252
1997	19-Out	0900	670.8	645.7	24.90	36.31	0.452
1997	19-Out	1000	857.0	858.0	27.15	43.57	0.582
1997	19-Out	1100	971.0	1019	27.67	47.23	0.660
1997	19-Out	1200	989.0	1024	27.40	46.19	0.668
1997	19-Out	1300	981.0	1013	27.23	45.34	0.664
1997	19-Out	1400	881.0	913.0	26.60	43.53	0.604
1997	19-Out	1500	717.0	740.0	25.92	39.79	0.505
1997	19-Out	1600	504.8	511.1	24.68	34.72	0.336
1997	19-Out	1700	88.50	99.00	21.96	23.65	0.020
1997	19-Out	1800	14.32	16.63	20.81	20.00	0.006
1997	19-Out	1900	0.703	0.803	20.36	18.74	0.000

Irradiância no plano inclinado e no plano horizontal

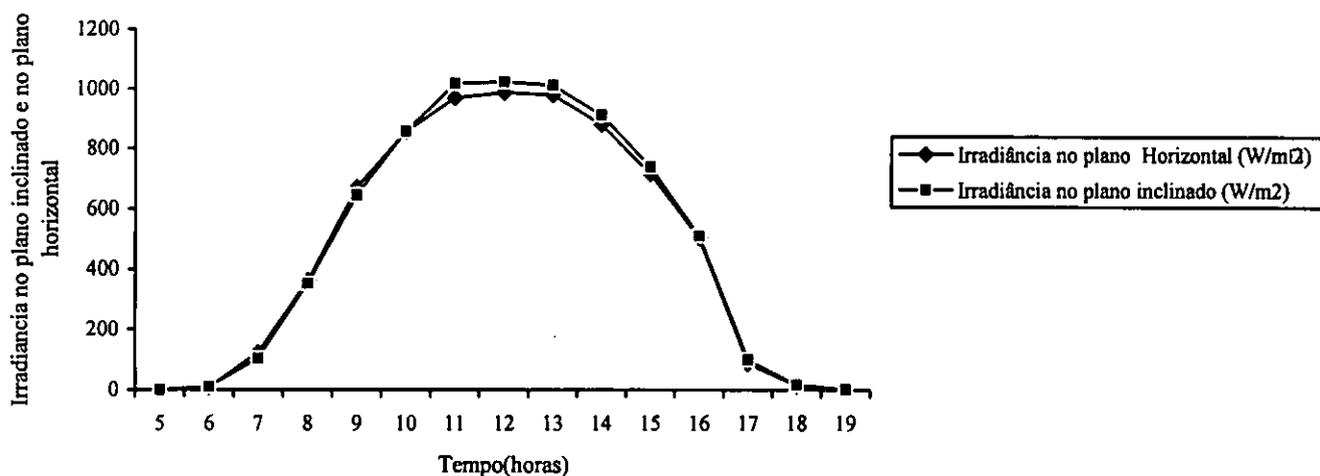


Fig 4.1. Relação entre irradiância no plano inclinado e no plano horizontal no dia 19/10/97

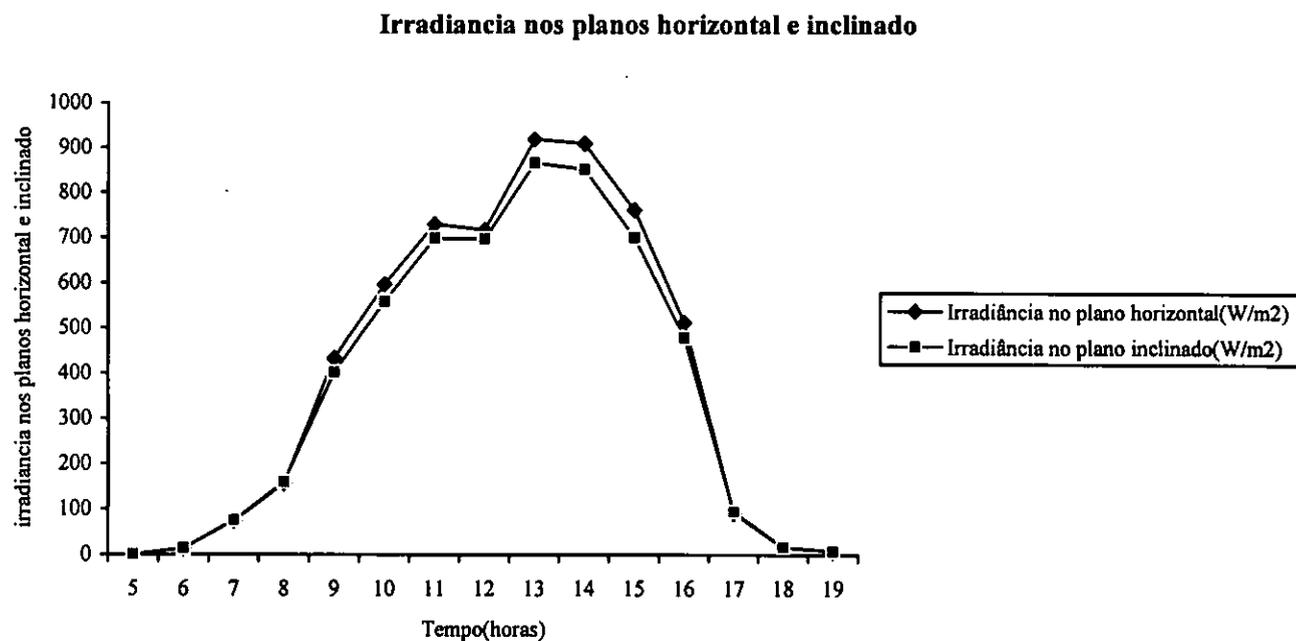


Fig 4.2. Relação entre irradiância no plano inclinado e no plano horizontal no dia 9/1/1998.

Tabela 4.2. Valores médios mensais de irradiância.

Ano	Mês	Irradiância no plano horizontal (Wh/m ² /dia)	Irradiância no plano inclinado (Wh/m ² /dia)
1997	Jul.	3213	4693
1997	Ago.	4117	5475
1997	Set.	4212	4796
1997	Out.	4289	4455
1997	Nov.	4582	4441
1997	Dez.	5456	5035
1998	Jan.	5387	4966
1998	Fev.	5717	5769
1998	Mar.	5116	5707
1998	Abr.	4344	5576
1998	Mai.	3828	5521
1998	Jun.	3426	5231

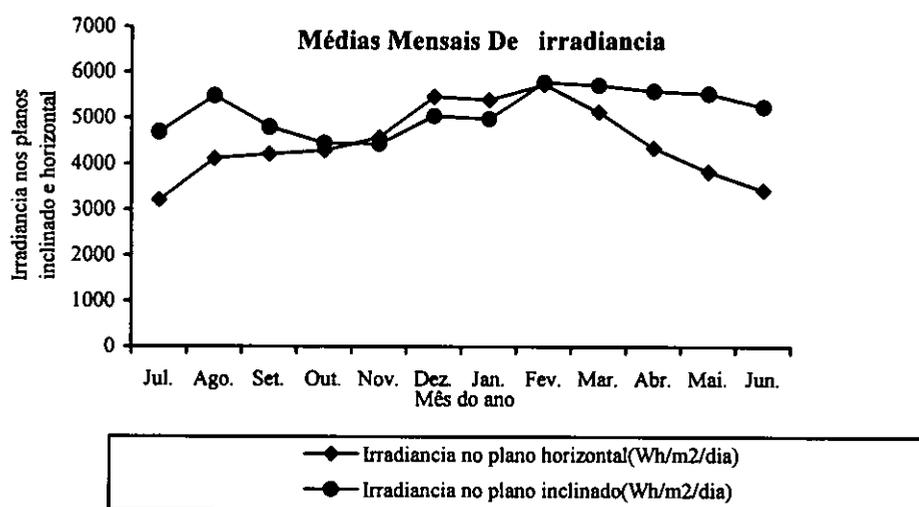


Figura 4.3. Relação entre irradiância no plano inclinado e no plano horizontal ao longo de um ano, período que se estende de 1 de Julho de 1997 a 30 de Junho 1998.

A tabela 4.2 fornece-nos as médias mensais de irradiância ao longo do período de análises que foi de 1 ano. Com estes dados traçam-se as curvas apresentadas na figura 4.3. De acordo com a figura o índice de irradiância absorvido pelo painel é geralmente mais alto que o da irradiância no plano horizontal, pelo facto de absorver a radiação difusa. Porém observa-se que em alguns meses do verão a irradiância absorvida é maior no plano horizontal que no plano inclinado.

4.2. RELAÇÃO ENTRE IRRADIÂNCIA NO PLANO INCLINADO E ENERGIA GERADA.

Destes dados fez-se a selecção de dois dias com o mesmo período de insolação e que apresentam rendimentos diferentes no que diz respeito à quantidade de água bombeada. Esta escolha tem como objectivo a análise da influência da quantidade de irradiância recebida no sistema. Os dados são apresentados nas tabelas que se seguem assim como os gráficos correspondentes à relação entre a irradiância no plano inclinado e energia. A tabela 4.1 apresenta os dados recolhidos no dia 19/10/1997 correspondentes a um bombeamento de 16.6m^3 de água. Em contrapartida, a tabela 4.3 apresenta os dados recolhidos no dia 17/10/1997 correspondentes a um bombeamento de 8.4m^3 de água.

Irradiância no plano inclinado e energia gerada

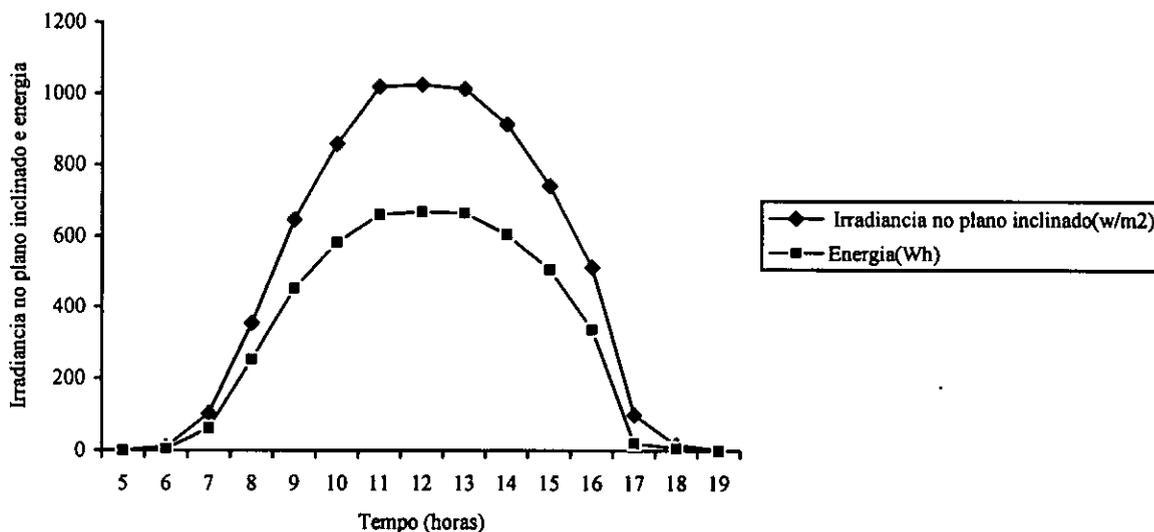


Fig 4.4. Relação entre irradiância no plano inclinado e energia a 19/10/1997 (dia número 292)

Tabela 4.3. Dados obtidos a 17/10/1997.

Ano	Dia do ano	Hora	Irradiância no plano horizontal (W/m ²)	Irradiância no plano inclinado (W/m ²)	Temperatura ambiente (°C)	Temperatura do painel (°C)	Energia (kWh)
1997	17-Out	0500	0.277	0.536	15.37	15.31	0.000
1997	17-Out	0600	23.58	23.83	15.44	15.52	0.008
1997	17-Out	0700	105.1	105.2	16.30	17.49	0.053
1997	17-Out	0800	166.7	164.6	17.32	19.70	0.107
1997	17-Out	0900	177.9	191.1	17.77	19.60	0.137
1997	17-Out	1000	630.5	640.8	22.11	29.99	0.455
1997	17-Out	1100	643.5	659.6	24.65	37.18	0.451
1997	17-Out	1200	331.8	334.3	21.28	28.16	0.244
1997	17-Out	1300	478.6	487.6	23.23	31.73	0.349
1997	17-Out	1400	639.2	664.0	25.19	37.10	0.455
1997	17-Out	1500	588.7	623.1	24.58	36.15	0.429
1997	17-Out	1600	516.0	536.0	24.27	35.08	0.354
1997	17-Out	1700	98.60	111.8	20.78	22.46	0.028
1997	17-Out	1800	31.68	35.69	20.00	20.09	0.016
1997	17-Out	1900	0.671	0.710	19.63	19.16	0.000

A irradiância é um parâmetro que afecta o desempenho de um sistema que funciona na base de células solares. Desta maneira, ela determina a produção de energia. Sendo assim, há uma

necessidade de analisar a relação entre ela e a energia produzida. Esta análise é feita no período em que se observa a insolação. A figura 4.4 corresponde aos dados apresentados na tabela 4.1 e faz referência à relação entre irradiância no plano inclinado (plano do painel) e energia no dia 19/10/1997. Esta relação é analisada tomando como base as médias horárias fornecidas pelo datalogger. A figura 4.5 corresponde à relação entre irradiância no plano inclinado e energia no dia 17/10/1997 e cujos dados são fornecidos pela tabela 4.3.

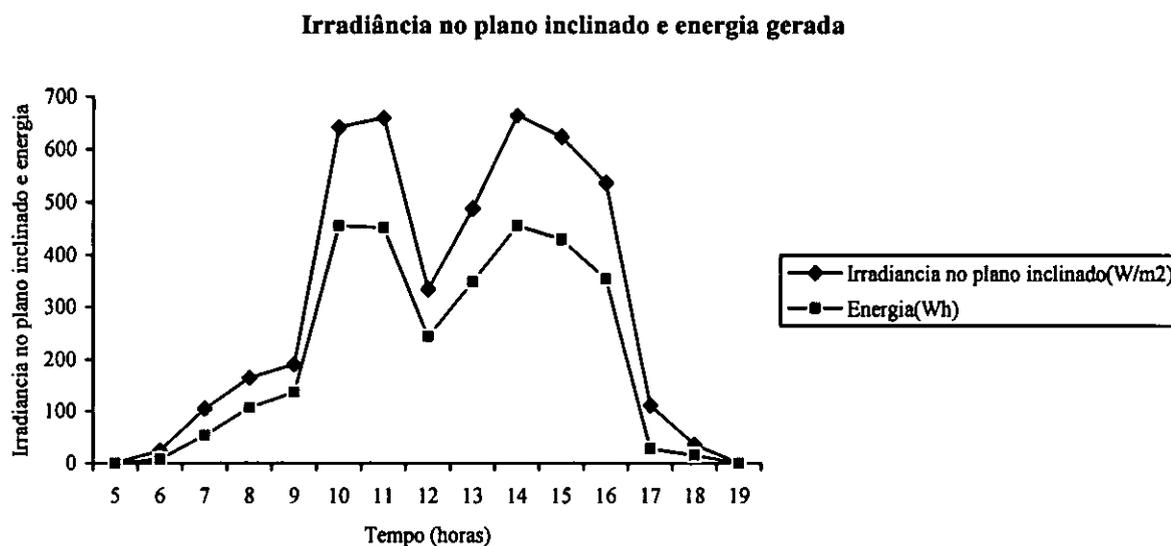


Fig 4.5. Relação entre irradiância no plano inclinado e energia a 17/10/1997 (dia número 290)

Tabela 4. 4. Valores totais de irradiância, energia e volume de água.

Dia	Irradiância total no plano inclinado (W/m ²)	Energia total (kWh)	Volume de água (m ³)
17-Out	4578.33	3.086	8.4
19-Out	7308.325	4.817	16.6

As figuras 4.4 e 4.5 mostram claramente a relação que existe entre a irradiância no plano inclinado e a energia. De acordo com o que se observa, a irradiância no plano inclinado é proporcional a energia gerada.

4.3 .DETERMINAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE CONVERSÃO EM CADA COMPONENTE DO SISTEMA.

Baseando-se na expressão (5) e nos resultados das medições, foi determinada a eficiência de conversão de cada elemento incluindo a eficiência global de acordo com o que mostra a tabela 4.5 das eficiências mensais. De salientar que neste estudo não se faz referência à eficiência do inversor devido a danificação do leitor de potência de corrente alternada. O gráfico 4.6 é referente à tabela 4.5.

Tabela 4.5. Eficiências médias mensais das componentes do sistema.

Mês	$\eta_{\text{painel}}(\%)$	$\eta_{\text{motor/bomba}}(\%)$	$\eta_{\text{global}}(\%)$
Julho	11.31	34.16	03.86
Agosto	11.20	35.14	03.93
Setembro	11.19	33.70	03.77
Outubro	11.14	34.09	03.79
Novembro	11.03	33.96	03.74
Dezembro	10.84	31.98	03.46
Janeiro	10.94	32.25	03.53
Fevereiro	10.82	31.61	03.42
Março	10.50	29.46	03.09
Abril	11.07	30.43	03.37
Mai	11.31	27.84	03.15
Junho	11.33	30.43	03.45
Média	11.06	32.09	03.55

Gráfico de eficiências

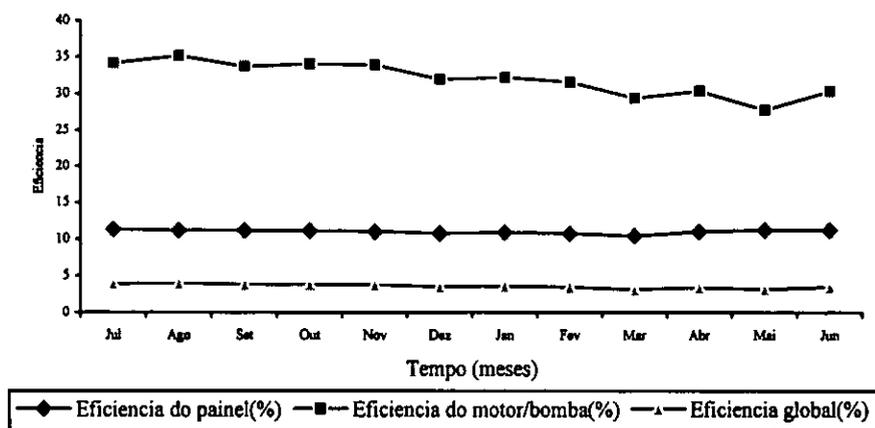


Fig 4.6. Eficiências médias mensais do sistema.

4.3. DETERMINAÇÃO DOS ERROS.

De acordo com a teoria dos erros e tendo em conta as expressões que determinam a eficiência de cada componente do sistema, isto é, as expressões (8), (10) e (11), os erros relativos para a eficiência de cada componente do sistema são determinados da seguinte maneira:

Gerador fotovoltaico.

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

Motor/bomba.

$$E_r = \sqrt{\left(\frac{\Delta m}{m}\right)^2 + \left(\frac{\Delta h}{h}\right)^2 + \left(\frac{\Delta P_{dc}}{P_{dc}}\right)^2} = \sqrt{(0.030)^2 + (0.020)^2 + (0.040)^2} = 0.054 = 5.4\%$$

Sistema.

$$E_r = \sqrt{\left(\frac{\Delta \eta_{gerador}}{\eta_{gerador}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \eta_{motor / bomba}}{\eta_{motor / bomba}}\right)^2} = \sqrt{(0.040)^2 + (0.054)^2} = 0.067 = 6.7\%$$

Considerando os erros relativos obtidos e os valores de eficiência apresentados na tabela 4.5, as médias das eficiências do sistema durante o período da análise podem ser apresentados da seguinte maneira:

$$\eta_{gerador} = (11.06 \pm 0.04)\%$$

$$\eta_{motor / bomba} = (32.09 \pm 0.054)\%$$

$$\eta_{sistema} = (3.5 \pm 0.067)\%$$

Os dados usados para melhorar o cálculo dos erros foram extraídos da tabela 1 (anexos). No que diz respeito a altura desde o nível hidrodinâmico até ao topo do tanque, considerou-se um erro de 1 metro devido as flutuações do nível hidrodinâmico.

5. CONCLUSÕES.

1. Durante o período de monitorização que foi de 1 de julho de 1997 a 30 de junho de 1998 a radiação solar média calculada foi de $4.47 \text{ kWh}/(\text{m}^2/\text{dia})$ tendo se observado um máximo de $7.49 \text{ kWh}/(\text{m}^2/\text{dia})$ a 09 de Dezembro de 1997, excluindo os dias em que o sistema não funcionou.

Este resultado aproxima-se ao valor obtido por U. M. Gómez durante 10 anos de recolha de dados no instituto nacional de meteorologia (de 1973 a 1982) que foi de $4.93 \text{ kWh}/(\text{m}^2/\text{dia})$ [2] e o valor obtido por B. C. Cuamba durante 6 meses também de pesquisas (de 1 de Janeiro a 30 de Junho de 1995) que foi de $4.63 \text{ kWh}/(\text{m}^2/\text{dia})$ [2].

Destes dados pode-se apurar que a radiação solar nesta região é apropriada para o uso da tecnologia fotovoltaica tendo em conta que o mínimo requerido é de $2.8 \text{ kWh}/(\text{m}^2/\text{dia})$.

2. De acordo com os dados recolhidos durante a análise conclui-se que quanto maior for a irradiância recebida pelo painel, maior será a energia eléctrica gerada e consequentemente maior será a quantidade de água bombeada.

3. A eficiência média do gerador obtida durante o período de análise foi de 11.06%. Tendo em conta que as células monocristalinas de silício tinham durante a primeira metade desta década eficiência entre os valores 14% e 16%, conclui-se que o valor aqui obtido é bastante bom, sabendo que existem perdas durante a distribuição (nos cabos) e também devido ao efeito de aquecimento.

4. A unidade motor/bomba teve um rendimento de 32.09% na conversão da energia de corrente contínua em energia potencial da água. Sabendo que uma boa unidade motor/bomba deve ter uma eficiência entre os valores 30% e 40% então, o valor determinado é aceitável.

5. A eficiência global de 3.55% aqui obtida, mostra claramente o melhor funcionamento do sistema nestes últimos anos, tendo em conta que, nos anos oitenta a eficiência global de um sistema de bombeamento de água era de aproximadamente 2%.

6. LITERATURA.

- [1]. John Twidell, Tony Weir, **Renewable Energy Resources**, E & FN SPON An Imprint of Chapman & Hall (reimpressão 1996)..
- [2]. Cuamba, Boaventura Chongo **Studies of the Performance on a Photovoltaic Power Plant in a Southern Africa Environment**, Ph.D. Thesis, University of Northumbria at Newcastle (1996).
- [3] France Lasnier and Tony Gan Ang **Photovoltaic Engineering Handbook**, Adam Higler, (1990).
- [4]. B.W.Williams, **Power Electronics, Devices, Drivers, Applications and Passive Components** (1992) 2nd Edition.
- [5]. D.A.Bradley, **Power Electronics**, Department of Engineering University of Lancaster, Van Nostrand Reinhold (international), (1990).
- [6]. William C. Vergara, **Electronics in everyday things**, Harper & Row, Publishers; New York, Evanston, and London(1961).
- [7]. Osman E.O. El Safi, **The Use of Power Electronic Interface in the Efficacious Utilization of Power in Photovoltaics Pumping Systems**, Ph.D. Thesis, Newcastle upon Tyne Polytechnic(1990).
- [8]. Alan L. Fahrenbruch, Richard H. Bube, **Fundamentals of Solar Cells**, Photovoltaic Solar Energy Conversion; Academic Press,INC(1983).
- [9]. **Máquinas Eléctricas, Motores Assíncronos**, Faculdade de Engenharia, Universidade Eduardo Mondlane.
- [10]. Jacob Millman and Arvin Grabel, **Microelectrónica**, McGRAW HILL PORTUGAL Lisboa Volume II 2^a Edição(1992).
- [11]. Osamu Ichinokura, Mitsuru Maeda, Hiroo Takahashi and Koichi Murakami, **European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition**, Congress center Montreux, Switzerland(12-16 October 1992).
- [12]. M.S.Imamura, P.Helm and W.Palz, **Photovoltaic System Technology**, A European Handbook(1992).
- [13]. Robert Hill, Phil O'Keefe and Colin Snape, **The Future of Energy Use**, Earthscan publications Ltd. LONDON,(1995).

ANEXOS.

DESCRIÇÃO DOS PRINCIPAIS COMPONENTES DO SISTEMA.

1. 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 adquiridos em 1993. A potência máxima de cada módulo em condições padrão de teste era de $53W_p$, a tensão de circuito aberto (V_{ac}) de 21.7V e a corrente de curto circuito (I_{cc}) de 3.05A, respectivamente. Cada módulo contém 36 células de silício cristalino, tendo cada célula uma área de $102.9cm^2$, todas ligadas em série. Cada módulo tem dimensões de 1293mmX330mm, contendo um diodo de protecção que protege o módulo contra a polarização inversa da corrente. O gerador está ligado à Terra, como forma de protecção contra efeitos indirectos de relâmpagos. O suporte do gerador, é uma estrutura de metal inoxidável, fixado numa base de betão, com capacidade para suportar uma velocidade de vento de 200Km/h. O gerador foi ajustado com uma inclinação de 30° com a face virada para o norte.

2. Inversor.

Nesta pesquisa usou-se um inversor da *Grundfos* de tipo *Solatonic SA 1500*, adquirido em 1993 com todo o sistema. A sua principal função é de converter a potência de corrente contínua do gerador em potência de corrente alternada de acordo com as necessidades do motor em uso. É um inversor de frequência variável especialmente designado para o uso em conexão com o gerador. O inversor incorpora uma unidade de electrónica de potência com as seguintes funções: (i) Amplificar a voltagem do gerador e (ii) Puxar o ponto de trabalho para o ponto de potência máxima do gerador. O valor nominal da tensão do inversor é de 120 V DC, aceitando um máximo de 140 V DC e um mínimo de 100 V DC para a sua operação normal.

3. Unidade motor/bomba.

O motor submersível foi acoplado na parte inferior da bomba de tal forma que constituam uma unidade completa, e classificada como sendo do tipo SP3A10. As partes principais desta unidade

foram fabricadas usando um metal inoxidável. Esta unidade foi fabricada pela Grundfos e adquirida em 1993. O motor tem uma frequência variável e é do tipo MS 402. É um motor assíncrono de dois pólos.

4. Tanque de água.

O tanque aqui usado tem uma capacidade de 5 metros cúbicos e foi construído por uma companhia local (Forjadora, E.E) em 1992. Foi feito de metal e com as seguintes dimensões: 1.5 metros de diâmetro e 3 metros de altura. Este é suportado por uma estrutura de 3 metros de altura e tem como função principal armazenar a água para a irrigação evitando uma baixa pressão associada a um nível baixo de irradiância especificamente no início e no fim do dia assim como em dias nublados. O tanque inclui uma válvula de retorno que permite o retorno da água para o furo se ela não for usada.

5. Furo.

A água é bombeada num furo com uma profundidade de 55 metros e um diâmetro de 6 polegadas aberto pela Geomoc E.E em 1992. A sequência das camadas geológicas é a seguinte:

- a) Do topo até 40 metros areia boa.
- b) Dos 40 aos 45 metros argila.
- c) Dos 45 aos 53 metros areia média (camada onde se extrai a água).
- d) Dos 53 aos 55 metros argila.

O furo tem um revestimento de um tubo metálico que vai desde o topo até aos 45 metros de profundidade. Este arranjo é feito de modo a evitar infiltrações de águas contaminadas vindas da superfície. Dos 45 aos 53 metros foi encaixado um tubo com furos adequados para permitir a entrada de água (filtros). Dos 53 aos 55 metros foi de novo usado um tubo fechado para evitar a infiltração de argila. O níveis estático e dinâmico de 28 e 36 metros respectivamente foram determinados usando uma bomba a diesel para um fluxo de 2 m³/hora.

Esta água foi analisada pelo laboratório de higiene e água no ministério de saúde tendo sido aprovada para o consumo.

TABELA 1. Características importantes de instrumentos de medição usados.

Tipo de Medições	Tipo de dispositivos de medições	Precisão
Irradiância solar	Piranómetro de silício cristalino 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 dispositivo do tipo 5B31-03	0.05%
Fluxo da água	Contador de água do tipo Woltman WP-XC	3.0%