



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE



**FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
CURSO DE FÍSICA APLICADA**

Trabalho Licenciatura

Domensionamento de um Sistema Fotovoltaico para Bombeamento de Água

A candidata: Adelaide Benedita Armando Francisco

Supervisor: Dr. Luís Chea

Maputo, Março de 2011

DEDICATÓRIA

Aos meus pais (Armando Francisco e Benedita Duarte) que sempre foram a minha fonte de inspiração, que Deus os tenha.

Aos meus irmãos: Joel Francisco, Nélia Francisco, Judite Francisco, Epifânia Francisco, Celestino Francisco, Osvaldo Francisco e Vanilson Francisco.

Também dedico este trabalho as minhas tias: Elsa Duarte e Lauricia Duarte; e as minhas sobrinhas: Benedita Manguese, Joelma Francisco e Kihara Francisco.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço à Deus, pela Luz que sempre me deu, em particular para a realização desta obra!

Agradeço aos meus pais que não se encontram neste mundo, pela educação e incentivo nos estudos dados durante a infância.

Aos meus irmãos que estiveram sempre presentes nos momentos felizes e tristes, dando apoio nas dificuldades enfrentadas. Em especial a minha irmã Nélia Francisco que assumiu a responsabilidade de encarregada de educação, e fez com que concretiza-se o sonho de me formar.

Este trabalho não seria possível sem a paciência, dedicação e compreensão do dr. Luís Chea, meu supervisor, para quem vai o meu muito obrigado! Igualmente a todos os Professores, funcionários e colegas do Curso de Física Aplicada da UEM, em particular, ao Prof. Doutor Boaventura Cuamba, pela compreensão e ajuda incansável durante a minha formação.

Não se esquecendo de endereçar os meus agradecimentos ao senhor Alfredo Daniel Boane e senhor Adriano Manhique que contribuíram bastante no acesso a informação que tornou concreto este trabalho.

Agradecimento especial ao João Zita que contribuiu directamente e incansavelmente na minha formação, e nesta pesquisa com as suas ideias e sugestões.

Por fim vai o meu muito obrigado as minhas colegas do quarto e da Residência Universitária da UEM, local que morei durante a minha formação, e a todos aqueles que contribuíram, directa ou indirectamente para a materialização desta obra.

Declaração de Honra

Declaro por minha honra que a presente obra foi feita por mim, através das pesquisas bibliográficas e experiências laboratoriais, cujas fontes usadas são devidamente mencionadas ao longo do trabalho. Declaro ainda que este trabalho nunca antes foi publicado por outro autor com a finalidade de obtenção de um grau acadêmico.

A Candidata

Adelaide Benedita Armando Francisco

Adelaide Benedita Armando Francisco

Listas de Abreviaturas

UEM – Universidade Eduardo Mondlane;

PV – Sistema Fotovoltaico;

I_{sc} – Corrente de Curto Circuito;

I_{mp}, I_{max} – Corrente de Ponto de Potência Máxima;

U_{oc} – Tensão de Circuito Aberto;

U_{mp}, U_{max} – tensão de Ponto de Potência Máxima;

P_{pp}, P_{max} – ponto de Potência Máxima;

CC – Corrente Contínua;

CA – Corrente Alternada;

Fig. – figura;

Listas de Tabelas

Tabela 2.2.1: Vantagens e Desvantagens dos vários tipos de energia (sistemas de geração de energia);

Tabela 2.7.2: Declinações médias mensais ao longo do ano;

Tabela 2.3: Principais Configurações do Bombeamento Fotovoltaico.

Índice

DEDICATÓRIA.....	i
AGRADECIMENTOS.....	ii
Declaração de Honra.....	iii
Listas de Abreviaturas.....	iv
Listas de Tabelas.....	v
Resumo.....	ix
CAPÍTULO I: Introdução e Objectivos.....	1
1.1. Introdução.....	1
1.2. Contextualização.....	2
1.3. Definição do Problema de Abastecimento de Água.....	2
1.3. Motivação.....	3
1.4. Objectivos.....	4
1.4.1. Objectivo geral.....	4
1.4.2. Objectivos específicos.....	4
1.5. Área de Estudo.....	4
1.6. Perguntas de Pesquisa.....	4
CAPÍTULO II: Revisão de Literatura.....	6
2. Energia Eléctrica no Meio Rural.....	6
2.1. Sistemas Autónomos de Geração de Eletricidade.....	6
2.1.1. Energia Solar Fotovoltaica.....	6
2.1.2. Descrição do Sistema de Bombeamento Fotovoltaico.....	8
2.1.3. Gerador Fotovoltaico.....	10
2.1.3.1. Células Solares.....	11
2.1.3.2. Curva Característica das Células Solares.....	15
Trabalho de Licenciatura.....	
Física Aplicada.....	vi

2.2. Influência da Radiação e da Temperatura nas Células Fotovoltaicas.....	17
2.2.1. Efeito da Intensidade da Radiação Solar	17
2.2.2. Efeito da Temperatura	17
2.3. Condicionamento de Potência	18
2.3.1. Díodos.....	18
2.3.2. Regulador de Carga	19
2.3.3. Conversores CC-CC	20
2.3.4. Inversor CC-AC.....	20
2.3.5. Seguidor de Ponto de Máxima Potência.....	21
2.4. Conjunto de Motor e bomba.....	21
2.4.1. Motores Eléctricos	21
2.4.1.1. Motor em Corrente Contínua (CC) com Escovas.....	22
2.4.1.2. Motor em Corrente Contínua (CC) sem Escovas	23
2.4.1.3. Motor em Corrente Alternada (CA)	23
2.4.2. Bombas Hidráulicas.....	24
2.4.2.1. Bombas Centrífugas.....	24
2.4.2.2. Bombas de Deslocamento Positivo	25
2.5. Equipamentos Auxiliares.....	26
2.5.1. Fios Eléctricos	26
2.5.2. Tubulação e Mecanismo de <i>Tracking</i>	27
2.5.3. Acumuladores	27
2.6. Dimensionamento de um Sistema Fotovoltaico para Bombeamento de Água.....	27
2.6.1. Metodologia do Dimensionamento.....	28
2.6.1.1 Estimação da Vazão.....	28
2.6.1.2. Determinação do Diâmetro da Tubagem.....	28

2.6.1.3. Potência Hidráulica	29
2.6.2. Radiação Solar.....	33
CAPÍTULO III: Metodologia do Trabalho	37
3.1. Procedimentos da Pesquisa	37
3.2. Material e Métodos.....	37
3.2.1. Material	37
3.2.2. Método	38
Capítulo IV: Análise e Interpretação dos Resultados	44
4.1. Análise do Efeito das ligações Série e Paralelo	44
4.2. Análise do efeito da Irradiância sobre a curva característica I-U	45
4.3. Análise do Efeito da Temperatura sobre a Curva Característica I-U.....	47
4.4. Análise do Efeito da Sombra sobre uma Célula do Módulo.....	49
4.5. Sistemas instalados no local de estudo.....	50
4.6. Exemplo de dimensionamento de um sistema fotovoltaico.....	52
Capítulo V: Conclusão e Recomendação.....	55
Conclusão	55
Recomendações.....	56
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	57
ANEXOS	60

Resumo

O presente trabalho tem como objectivo apresentar a metodologia de dimensionamento de sistemas fotovoltaicos para bombeamento de água e analisar os efeitos que influenciam no seu funcionamento. Dado que os sistemas fotovoltaicos funcionam ao ar livre, são sujeitos as condições ambientais do local onde são instalados. Em particular, pretende-se conhecer o efeito dos parâmetros ambientais (temperatura, irradiância e sombreamento) e efeitos provenientes da conexão dos módulos fotovoltaicos que fornecem a electricidade ao sistema. Um módulo fotovoltaico consiste num agrupamento de células solares que são dispositivos semicondutores que convertem directamente a energia electromagnética da luz solar em energia eléctrica.

Para esta pesquisa, foram realizados estudos sobre painéis solares disponíveis no departamento de Física da Universidade Eduardo Mondlane, em Maputo (Moçambique), foi feito um inquérito aos beneficiários de sistemas fotovoltaicos para bombeamento de água dentro da área de estudo e aos proprietários e executores dos projectos de instalação. Para análise dos dados obtidos no laboratório, foi usado o microsoft office excel 2003 e 2007. Os resultados obtidos da pesquisa mostram que a influência da temperatura contribui directamente no funcionamento de sistemas fotovoltaicos e, conseqüentemente, no sistema de bombeamento de água como um todo. No concernente à pesquisa feita no local de estudo, o inquérito mostrou que os sistemas de bombeamento de água contribuem bastante no fornecimento da água potável. A pesquisa recomenda a manutenção dos sistemas já instalados e instalação de novos sistemas em comunidades onde a falta de água potável se faz sentir.

CAPÍTULO I: Introdução e Objectivos

1.1. Introdução

O termo energia é definida como a grandeza física escalar com que se medem diferentes formas de movimento da matéria. A energia de um sistema caracteriza quantitativamente o mesmo em relação às possíveis transformações do movimento que se podem desenvolver no seu interior [1].

A electricidade é uma das principais ferramentas para o desenvolvimento mundial. Estende-se em uma ampla área de utilização e quase indispensável em todos os sectores de desenvolvimento. Todos os aparelhos tecnológicos bem como a tecnologia em desenvolvimento está baseada em electricidade [2].

As hidroeléctricas são as principais fornecedoras nacionais de electricidade, mas estas não conseguem cobrir toda a demanda que o país necessita. Observa-se grande falta de energia eléctrica em zonas rurais. Nestas zonas, são utilizados na sua maioria os combustíveis fósseis para substituir a electricidade. Deste modo, os problemas ambientais estão sempre presentes e na perspectiva de se observar um aumento a cada ano.

No contexto mundial, o uso de combustíveis fósseis ainda continua sendo a base principal da geração de electricidade, o que conduz inevitavelmente a um esgotamento das reservas e uma ameaça ao meio ambiente, observando-se principalmente através do aquecimento global e outros problemas relacionados com a saúde dos seres vivos [2].

Os combustíveis fósseis representam, de certa forma, problemas que tornam questionável a eficácia do sistema energético actual, com base no desenvolvimento sustentável. A mitigação destes problemas conduz a adopção de medidas de eficiência no uso de energia e na promoção do uso de energias renováveis, que não se esgotam e, ao mesmo tempo, têm impacto ambiental muito reduzido, embora as energias renováveis participem com pouca frequência no contexto global. Moçambique é um dos países que precisa reunir esforços para solucionar esta problemática de energia para as pessoas desfavorecidas uma vez que possui um grande potencial de energia solar (uma média da radiação solar global diária de $5.7 \text{ (KWh/m}^2\text{)}$) [3].

No caso específico do fornecimento de água para as populações rurais, as energias renováveis de geração autónoma, desempenham um papel muito importante, contribuindo assim para o desenvolvimento social nas zonas rurais. Com o abastecimento de água potável, há redução de várias doenças associadas ao uso de água não potável. O fornecimento de água, está directamente ligado a disponibilidade de recursos energéticos. Portanto, há necessidade de introduzir os sistemas fotovoltaicos para bombeamento de água [2].

Os custos dos sistemas fotovoltaicos ainda são elevados, embora a tendência geral seja de redução dos custos ao longo do tempo.

Actualmente, o uso de sistemas fotovoltaicos cresce dia a dia, para um grande número de situações, e despertam um grande interesse no seio da sociedade moçambicana.

1.2. Contextualização

Para tornar-se concreto o presente trabalho recorreu-se a pesquisa bibliográfica baseada na descrição dos componentes de um sistema de bombeamento de água, seu funcionamento e uma metodologia de dimensionamento. Também foram realizadas pesquisas nos locais de estudo no sentido de avaliar o grau de satisfação dos utentes beneficiados pelos sistemas, bem como o funcionamento dos mesmos.

1.3. Definição do Problema de Abastecimento de Água

A água tal como o oxigénio e a alimentação, constitui necessidade básica dos seres vivos. Grande parte do problema de distribuição de água está relacionado com as deficiências energéticas locais para a execução de trabalhos de extração e transporte de água do reservatório ou fonte ao ponto de sua utilização. A solução do problema de falta de água nas zonas rurais, seja para o consumo humano, para a agricultura e para os animais domésticos, poderia estar associado à introdução de sistemas autónomos de geração de energia, já que a extensão de redes de distribuições de energia eléctrica à localidades distantes dos centros de geração pode ser muito mais cara.

O bombeamento de água nas zonas rurais com utilização de métodos manuais ou a tracção animal, aplicam-se em poços de pequenas capacidades e a pequena altura de bombeamento. Nestas zonas, utilizam-se com muita frequência estes dispositivos devido ao baixo custo inicial e sua simplicidade. Entretanto, uma bomba manual tem capacidade limite inferior a $2.5 \text{ m}^3/\text{dia}$. Em outras palavras, somente pode abastecer em média a duas famílias, sendo que se pode verificar um baixo grau de aproveitamento do poço [2].

As bombas com motor a combustão interna, são dependentes do combustível e exigem uma frequente manutenção. Quanto as bombas movidas a energia solar fotovoltaica são bombas recentes e pouco conhecidas, mas com maior utilização que as mencionadas anteriormente. Estas possuem maior confiabilidade que as outras opções, especialmente para aplicações médias entre 500 e $1.500 \text{ m}^3/\text{dia}$ [2].

1.3. Motivação

A principal motivação deste trabalho é colaborar a solução da problemática do fornecimento de água às populações rurais, contribuindo desta forma para o desenvolvimento do país.

A ênfase na análise do potencial de inserção da tecnologia fotovoltaica de geração de energia para o bombeamento de água deu-se por inúmeros factores, dentre os quais destaca-se o facto de ser uma tecnologia que utiliza uma fonte inesgotável e acessível, que apresenta-se em abundância e com boa distribuição em todo o território nacional, para além de não emitir poluentes na geração, apresentando um alto índice de confiabilidade e com baixa necessidade de manutenção, assegurando uma certa independência do usuário.

Com a instalação de sistemas de bombeamento de água potável para o consumo humano, para a criação de animais domésticos e também quando necessário, para a agricultura, podem ser minimizados os problemas de carência de água.

1.4. Objectivos

1.4.1. Objectivo geral

Apresentar uma metodologia de dimensionamento de sistemas fotovoltaico para bombeamento de água.

1.4.2. Objectivos específicos

- Estudo de configurações de um sistema fotovoltaico para bombeamento de água;
- Comparação de diferentes sistemas fotovoltaicos de bombeamento de água instalados na área de estudo;
- Análise experimental da influência da radiação, temperatura e sombreamento no sistema fotovoltaico.

1.5. Área de Estudo

Província de Maputo

A província de Maputo localiza-se na parte sul de Moçambique. Ocupa uma área de 26.058 km² e situa-se aproximadamente entre os paralelos 24° e 26° de latitude Sul e entre os meridianos 32° e 33° de longitude Este.

É limitado a Norte pela província de Gaza. A sul, faz fronteira com África do Sul. A Oeste pela Swazilândia e África do Sul, e a Este pelo Oceano Índico. Particularmente o estudo foi feito no bairro Magoanine CMC e Mahotas da cidade de Maputo, e Bairro Tsalala no município da Matola [4].

1.6. Perguntas de Pesquisa

- O que é sistema fotovoltaico;
- Qual é o seu princípio de funcionamento;

Dimensionamento de um Sistema Fotovoltaico para Bombeamento de Água

- Que factores influenciam no rendimento de um sistema fotovoltaico;
- Qual é a importância de fazer dimensionamento do furo de água.

CAPÍTULO II: Revisão de Literatura

2.1. Energia Eléctrica no Meio Rural

A grande dificuldade de eletrificação rural é devido a grande dispersão geográfica da população, baixo consumo, alto investimento por consumidores, elevado custo operacional, etc. Como resultado, os rendimentos obtidos são bastante baixos em relação aos investimentos aplicados. Pode-se observar que nas zonas rurais, encontram-se muitas dificuldades de acesso a serviços de saúde, educação, cultura, oportunidade de trabalho. Com a falta de energia eléctrica, estas dificuldades são ainda mais acentuadas, uma vez que a maior parte dos equipamentos utilizados para o conforto, trabalhos domésticos, e laser funcionam na base da eletricidade. O acesso à energia eléctrica é fundamental no meio rural, pois poderá atrair investimentos e infraestruturas beneficiando assim a população.

No caso específico de abastecimento de água e eletrificação para a zona rural, há que realçar que as suas disponibilidades colocam o homem do campo em contacto com o mundo moderno, possibilitando assim o conforto, progresso e o uso de oportunidades associadas ao consumo de energia e água [2].

2.2. Sistemas Autónomos de Geração de Eletricidade

A expansão da energia eléctrica no país é um desafio a ser vencido, não só com base na rede convencional, como também a partir de vários sistemas de geração de energia eléctrica. De entre as várias formas de geração de energia, este trabalho focaliza o bombeamento de água somente com energia solar.

2.2.1. Energia Solar Fotovoltaica

É a designação que se dá ao processo de transformação de energia solar em energia eléctrica, feita através de células solares integradas em módulos ou painéis fotovoltaicos. [5]. Esta energia, varia em função da latitude do lugar e da estação do ano. Em Moçambique a disponibilidade da

energia solar abrange todo o território nacional. Possui a vantagem de ser de fácil transporte, instalação, oferecer grande facilidade de ampliação do projecto devido ao seu carácter modular e requerer pouca manutenção em comparação com a de combustíveis fósseis e energia da rede convencional, tal como se resume na tabela 1. No caso específico dos grupos de motor-bombas fotovoltaicas, estes tem grande durabilidade e eficiência no funcionamento em relação as outras opções [2]. Apesar da falta de informação exhaustiva, estima-se que em Moçambique exista um número considerável destes sistemas, de projectos de geração autónoma.

A energia fotovoltaica comparada com outras opções, tem um custo bastante elevado. Contudo, se os custos associados a efeitos ambientais e sociais na geração, transmissão e uso de outras fontes de energia fossem contabilizados, a tecnologia de geração de energia solar fotovoltaica tomaria um lugar de destaque das mais variadas fontes de energia actualmente em uso [2].

A tabela 1 apresenta algumas vantagens e desvantagens de sistemas de bombeamento de água das diferentes opções energéticas.

Tipo de Rede	Vantagens	Desvantagens
Rede Elétrica Convencional	<ul style="list-style-type: none"> - Baixo custo do grupo motor-bomba; - Não requer armazenamento elétrico ou de recursos hídricos. - Extensa utilização, facilidade de compra em todo território; - Baixo impacto ambiental no bombeamento. 	<ul style="list-style-type: none"> - Alto custo de construção da rede elétrica; - Impacto ambiental na construção da rede elétrica e na geração; - Pessoal técnico para manutenção.
Combustão interna	<ul style="list-style-type: none"> - Não requer armazenamento elétrico ou de recursos hídricos; - Extensa utilização, facilidade de compra em todo território. 	<ul style="list-style-type: none"> - Dependência de combustível - Curta vida útil; - Alto custo operação/manutenção; - Geração de ruídos e gases.
Solar fotovoltaica	<ul style="list-style-type: none"> - Não requer combustível; - Operação autônoma; - Longa vida útil; - Boa relação entre disponibilidade energética e demanda hídrica; - Baixo impacto ambiental na geração; - Pouca necessidade de manutenção; - Caracter modular. 	<ul style="list-style-type: none"> - Armazenamento de água/eletricidade; - Pessoal técnico para manutenção; - Alto investimento inicial.

FONTE: [2, 5].

2.2.2. Descrição do Sistema de Bombeamento Fotovoltaico

O sistema de bombeamento fotovoltaico consiste basicamente de um gerador PV, conjunto de motor-bombas, sistemas de condicionamento de potência e equipamentos complementares.

A figura 1 apresenta as modalidades tecnológicas mais utilizadas nos sistemas de bombeamento PV. As linhas boldadas no diagrama representam as modalidades tecnológicas mais utilizadas actualmente.

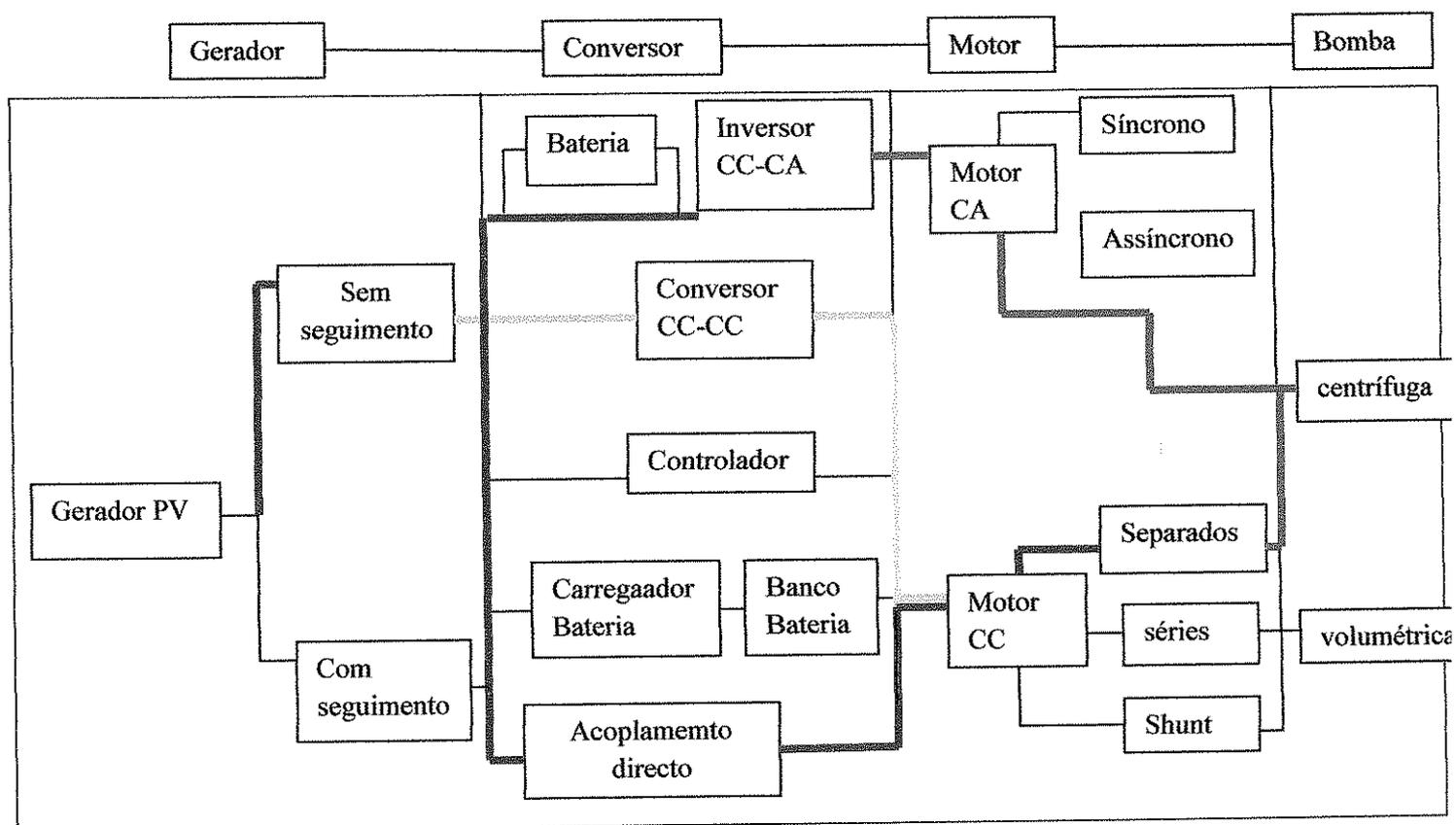


Figura 1. Sistema de Bombeamento Fotovoltaico [5].

A figura 2 ilustra algumas configurações de sistemas de bombeamento fotovoltaico. A figura 2A ilustra o grupo motor-bomba submerso, a 2B ilustra a bomba submersa e motor em superfície, a 2C ilustra o grupo motor-bomba flutuante e 2D ilustra o grupo motor-bomba em superfície.

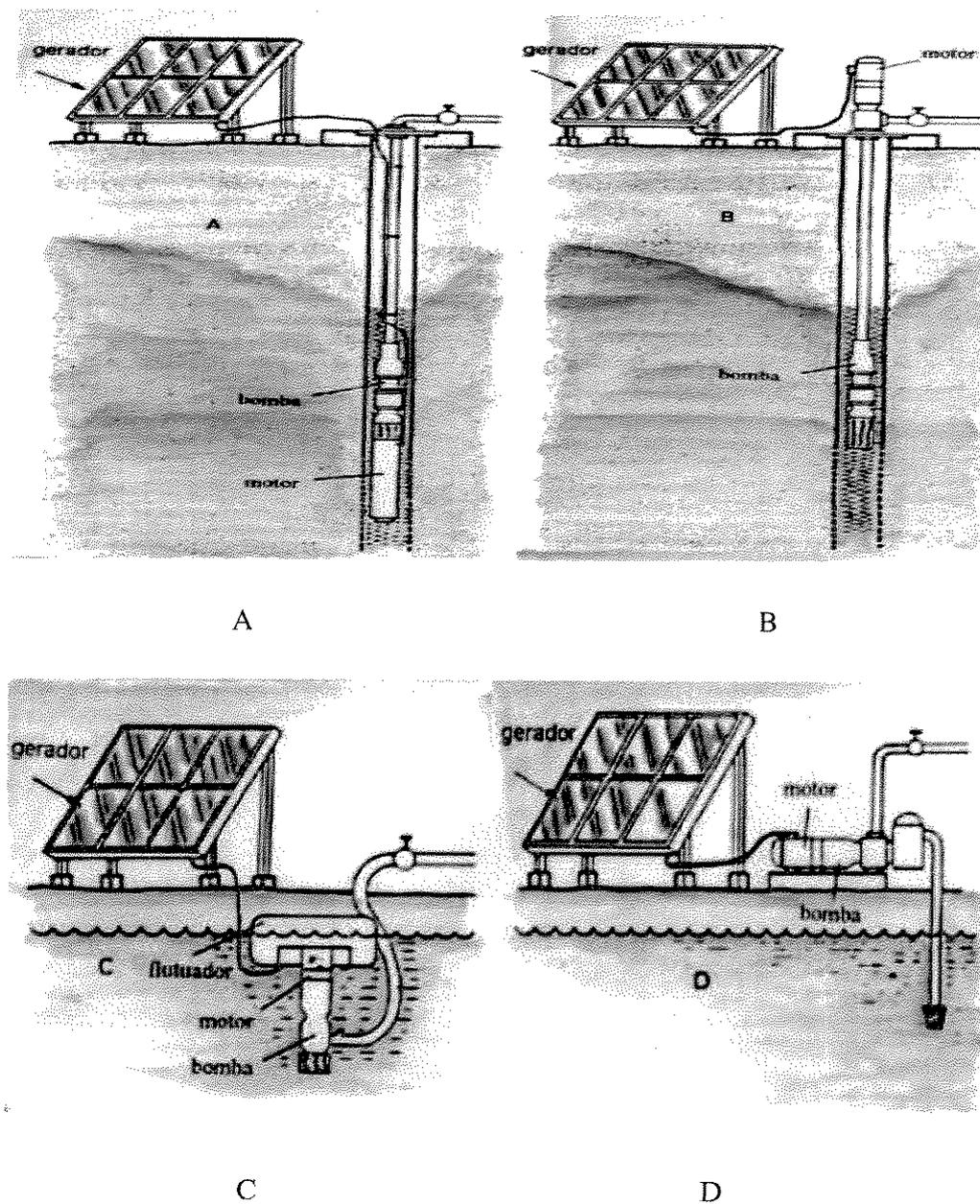


Figura 2. Exemplo de diferentes configurações de sistemas de bombeamento [2]

2.2.3. Gerador Fotovoltaico

O gerador fotovoltaico consiste num conjunto de módulos fotovoltaicos compostos por células solares [6]. Módulo fotovoltaico pode ser definido como a junção de células solares idênticas.

Geralmente produzem-se módulos formados por 36 células ligadas em série. Uma célula fotovoltaica é capaz de produzir 0.6 volts e uma corrente entre 1.5 e 4.5 Amperes, por isso é necessário conectar estas células para fornecer voltagem e correntes com um valor ajustado para o uso elétrico pretendido [5].

2.2.3.1. Células Solares

Uma Célula Solar é um dispositivo capaz de transformar a energia proveniente do sol ou de outras fontes de luz em energia elétrica. Esta pode funcionar como gerador de energia elétrica a partir da luz, ou como um sensor capaz de medir a intensidade luminosa [5].

As Células Solares são também chamadas de células Fotovoltaicas por possuírem o mesmo princípio de funcionamento, que é principalmente a transformação da luz solar em energia elétrica, geralmente são compostas por materiais semicondutores [6].

Os semicondutores são materiais que possuem um nível de condutividade entre os extremos de um isolante e um condutor. As suas propriedades elétricas são afetadas por variação de temperatura, exposição a luz e acréscimo de impurezas. Ao incorporar uma pequena quantidade de impurezas as suas propriedades elétricas alteram-se significativamente [1].

Estes materiais dopados ou não, são caracterizados por uma faixa de energia proibida (E_g), banda de valência e banda de condução, como ilustrado na figura 3.

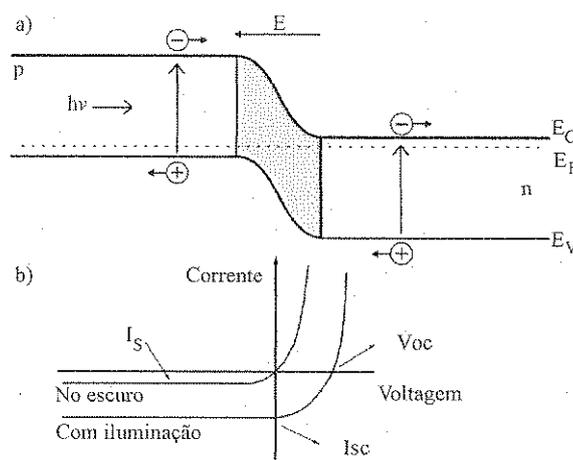


Figura 3. (a) junção p-n; (b) corrente de uma junção sem e com iluminação [7].

Na figura 3(a) temos a representação esquemática das bandas de energia em uma junção p-n de um semiconductor [7]. Em 3(b) a curva característica da célula solar sob iluminação, permite determinar a potência máxima fornecida.

Onde:

E_g – representa a energia da banda proibida;

E_v – é a energia da banda de valência;

E_c – é a energia da banda de condução;

E – representa o campo eléctrico na junção;

I_s – é a corrente de saturação;

I_{sc} – é a corrente do curto circuito;

V_{oc} – é a voltagem do circuito aberto.

Uma forma de aumentar a condutibilidade de um semiconductor é pela dopagem, como está ilustrado na fig. 4. O semiconductor mais utilizado para as células PV é o Silício.

Para que o material de Silício funcione como um gerador de energia, a rede cristalina é dopada com os átomos chamados de impurezas. Estes átomos possuem um electrão a mais (Fósforo, 5 electrões), ou um electrão a menos (Boro, 3 electrões), do que o Silício na camada externa de valência, como está ilustrado na fig. 4. Por este motivo, os átomos impuros causam defeitos no interior da rede cristalina. Se na rede for adicionado Fósforo (impureza n), fica um electrão livre por cada átomo de Fósforo introduzido. Este electrão pode mover-se livremente dentro do cristal e por isso transportar carga eléctrica. Com o Boro (impureza p), fica disponível uma lacuna por cada átomo de Boro introduzido. Os electrões dos átomos vizinhos de Silício podem preencher esta lacuna, resultando na produção de uma nova lacuna noutra lugar. O mecanismo condutor que resulta da presença dos átomos impuros, é chamado de condução extrínseca [8].

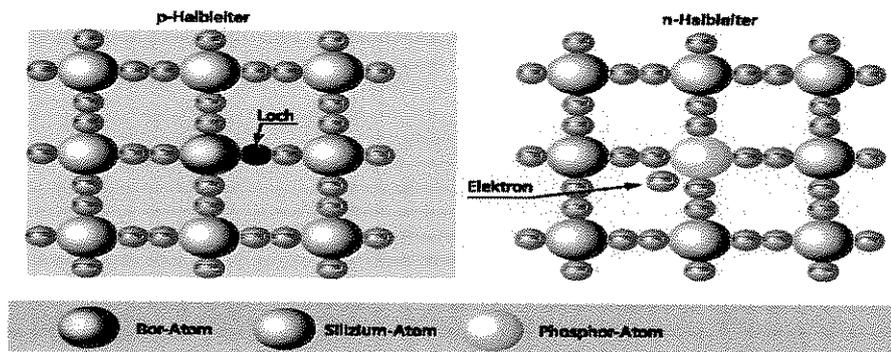


Figura 4. Condução extrínseca com Silício dopado com impurezas do tipo n e p [8].

Se juntarmos as camadas dos semicondutores n e p impuros, produziremos uma região de transição pn . Isto leva à difusão dos electrões e lacunas do semiconductor n para p e semiconductor p para n na junção, respectivamente. Cria-se assim a barreira de Potencial, como mostra a fig.5. É criado um campo eléctrico que se mantém contrário ao movimento dos portadores de carga. Por esta razão a difusão não se mantém infinitamente.

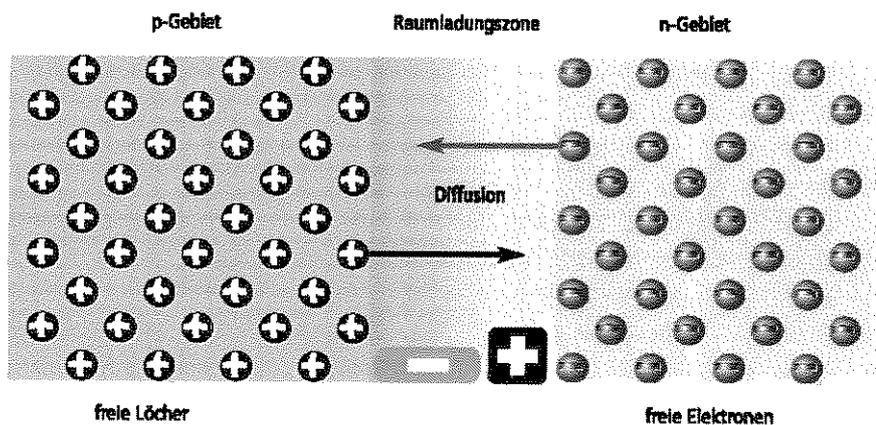


Figura 5. Junção pn [8].

Ao expor uma célula solar à luz, os fotões são absorvidos pelos electrões. As ligações entre electrões são quebradas por este fornecimento de energia. Os electrões libertados são encaminhados pelo campo eléctrico para a região n e as lacunas assim criadas seguem na direcção contrária para a região p . Todo este processo é denominado por efeito fotovoltaico.

A difusão dos portadores de carga até aos contactos eléctricos, produz tensão na fronteira da célula solar. Se não estiver ligada a nenhuma carga, é obtida a tensão de circuito aberto na célula solar, e se o circuito eléctrico estiver fechado, a electricidade pode fluir. Contudo, alguns electrões que não alcançam os contactos são recombinados [8].

Ao polarizar externamente uma célula solar, apresenta uma característica de corrente-voltagem de uma junção p-n, segundo a expressão [5]:

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{nKT}\right) - 1 \right] \quad (1)$$

Onde I_0 – é a corrente de saturação;

V – é a polarização externa aplicada;

n – é factor de idealidade($n=1$ - díodo ideal; $n=2$ - díodo real);

k – é constante de Boltzman;

T – é temperatura.

A polarização externa de uma célula, serve para caracterizar a célula solar como dispositivo electrónico, onde este modo de operação é usado em fotodíodos e conhecido como fotocondutividade [7]. Quando a célula é iluminada, os electrões e lacunas foto-excitados podem deslocar-se até a região de depleção antes da recombinação, que em seguida, são acelerados pelo campo eléctrico da interface de um lado para outro lado da junção, contribuindo desta forma com a corrente I_L que terá o mesmo sentido da corrente de saturação. Assim, tomando em consideração a fotoexcitação e a resistência parasítica, a corrente total será:

$$I = I_L - I_0 \left[\exp\left(\frac{V+IR_S}{(nKT/q)}\right) - 1 \right] - \frac{V+IR_S}{R_p} \quad (2)$$

Onde: I_L é a corrente foto-gerada, R_s é a resistência em série e R_p é a resistencia paralela.

Quanto maior for a intensidade da radiação incidente na célula, maior será a corrente produzida. A temperatura e as resistências parasíticas, influenciam na eficiência de uma célula. Quanto maior for a temperatura maior será a corrente do curto circuito e menor a voltagem do circuito aberto diminuindo assim o factor de forma FF.

O ponto óptimo de uma célula solar, para uma dada carga, varia com a geometria das suas características I-U. Para descrever a geometria das características I-U duma célula solar utiliza-se o FF definido pela expressão 3. Este factor indica quanto a forma da característica I-U duma célula solar se aproxima da forma de um rectângulo; é um parâmetro muito útil para o estudo de controlo de qualidade de célula solar [9].

$$FF = \frac{U_{mp} \times I_{mp}}{U_{oc} \times I_{sc}} \quad (3)$$

Tal que: U_{mp} e I_{mp} são tensão e corrente eléctrica do ponto de potência máxima, respectivamente; U_{oc} e I_{sc} são tensão de circuito aberto e corrente do curto circuito.

$$U_{mp} = U_{oc} - \frac{nKT}{q} \ln \left(\frac{U_{mp}}{nKT/q} + 1 \right) \quad (4)$$

$$U_{oc} = \frac{nKT}{q} \ln \left(\frac{I_L}{I_0} + 1 \right) \quad (5)$$

As resistências parasíticas numa célula solar, influenciam também na redução do factor de forma. Uma célula solar possui resistência em série bem como em paralelo. Quanto maior for a resistência em série, menor será o rendimento da célula, e quanto maior for resistência em paralelo maior será o rendimento.

2.2.3.2. Curva Característica das Células Solares

A curva tensão-corrente é a curva característica de uma célula solar que é a representação típica da característica de saída de um dispositivo fotovoltaico [5].

A corrente de saída mantém-se praticamente constante dentro da amplitude de tensão do funcionamento. O dispositivo PV opera a uma corrente e tensão determinadas pela radiação solar incidente, pela temperatura ambiente, e pelas características da carga conectada ao mesmo dispositivo.

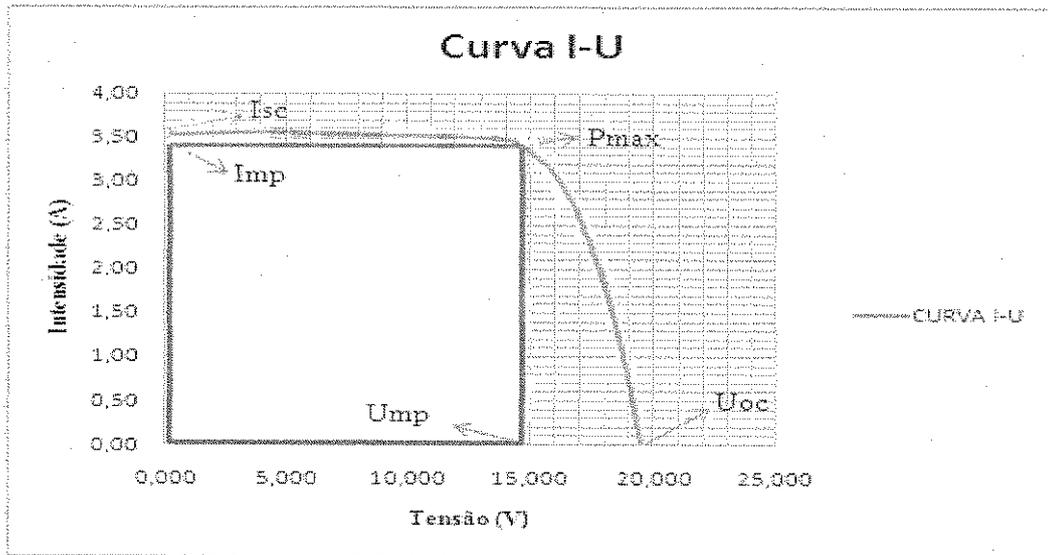


Figura 6. Curva I-U. Fonte: A. Francisco (Experiência Laboratorial)

As características mais importantes de uma curva I-U são:

- Corrente de curto circuito (I_{SC}): é a corrente máxima que o dispositivo pode fornecer sob condições determinadas de radiação e temperatura correspondendo a tensão nula e consequentemente a potência nula;
- Tensão de circuito aberto (U_{OC}): é a tensão máxima que o dispositivo pode fornecer sob condições determinadas de radiação e temperatura correspondendo à corrente nula e consequentemente potência nula;
- Ponto de potência máxima ($P_{m\acute{a}x}$): é o valor máximo da potência que o dispositivo pode oferecer;
- Corrente de máxima potência (I_{mp}): é a corrente máxima que o dispositivo fornece a carga, sob condições determinadas de radiação e temperatura. É utilizada como corrente nominal do mesmo;
- Tensão a máxima potência (U_{mp}): é a tensão correspondente à potência máxima sob condições determinadas de radiação e temperatura. É também utilizada como tensão nominal do mesmo.

2.3. Influência da Radiação e da Temperatura nas Células Fotovoltaicas

2.3.1. Efeito da Intensidade da Radiação Solar

A corrente gerada num sistema PV é directamente proporcional a radiação, desta forma, sempre que ocorrer uma mudança na intensidade da radiação a corrente de saída varia proporcionalmente àquela mudança, enquanto que a tensão varia de forma logarítmica [5].

A figura 7 ilustra o efeito da intensidade da radiação num módulo fotovoltaico. Com o aumento da radiação incidente aumenta o número de portadores de carga fotogerados capazes de participar na fotocorrente.

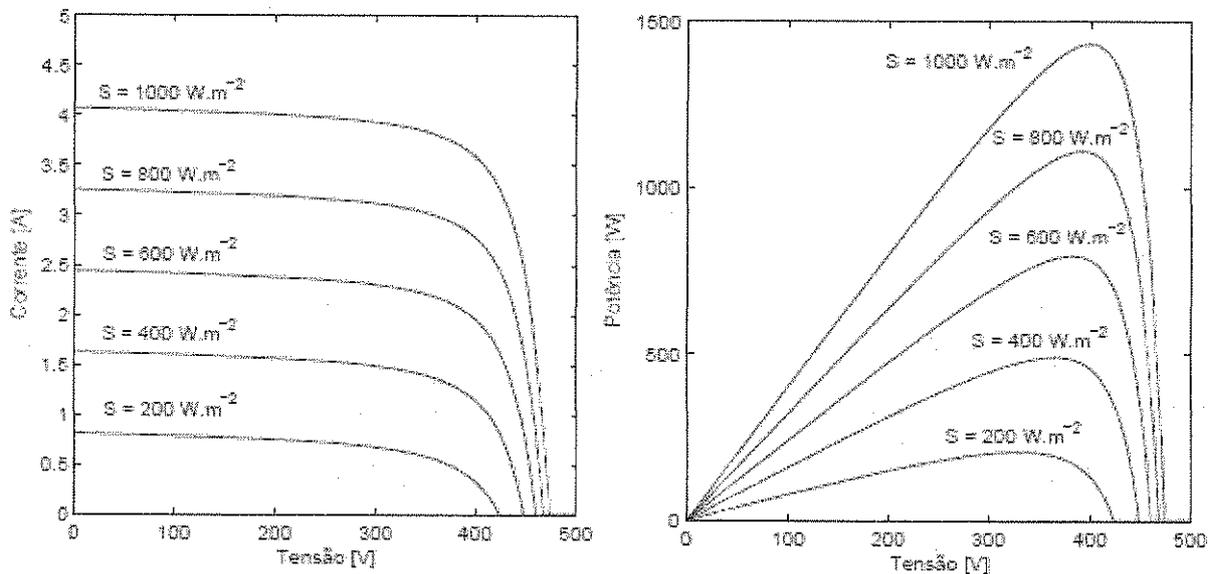


Figura 7. Curvas I-U e P-U de um módulo solar para diferentes irradiâncias, à temperatura constante [10].

2.3.2. Efeito da Temperatura

O efeito principal provocado pelo aumento da temperatura do módulo é a diminuição da tensão; estas grandezas são inversamente proporcionais, como se pode observar na fig. 8. Deste modo, em locais de temperatura ambiente elevada é aconselhável que os módulos sejam ligados em série a fim de que a tensão de saída seja suficiente para carregar as baterias.

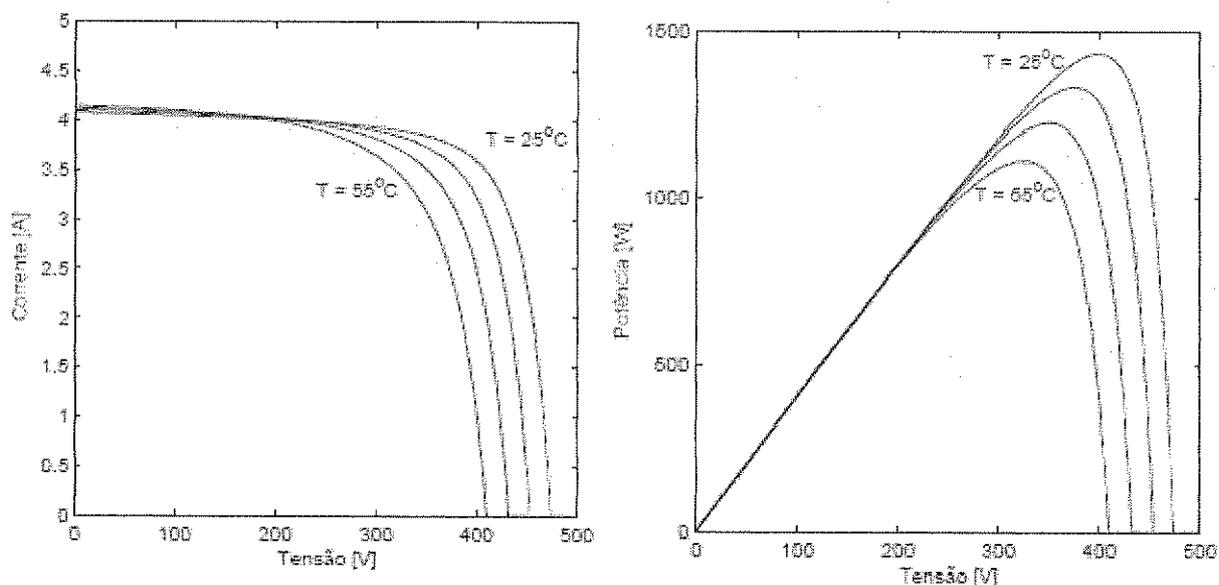


Figura 8. Curvas I-U e P-U de um módulo solar para diferentes temperatura, à irradiâncias constante [10].

2.4. Condicionamento de Potência

Condicionadores de potência são elementos electrónicos utilizados para regular o sistema. Estes equipamentos auxiliam o sistema a funcionar em óptimo rendimento, conferindo maior confiabilidade de funcionamento e maior vida útil. Estes dispositivos podem ser díodos, reguladores de carga, conversores, inversores, seguidores do ponto máximo de potência, etc [2].

2.4.1. Díodos

Nos módulos fotovoltaicos os díodos são usados como díodo *by pass* e díodo de bloqueio, como se pode verificar na fig. 9 [5].

Quando uma célula fotovoltaica dentro de um módulo, por algum motivo, estiver encoberta a potência de saída do módulo cairá drasticamente que, por estar ligada em série, comprometerá todo o funcionamento das demais células no módulo. Para que toda a corrente de um módulo não seja limitado por uma célula de pior desempenho, usa-se um diodo *bypass*. Este diodo serve

como um caminho alternativo para a corrente e limita a dissipação de calor na célula defeituosa [11].

Um outro problema que pode acontecer é quando surge uma corrente negativa fluindo pelas células ou seja, ao invés de gerar corrente, o módulo passa a receber muito mais do que produz. Esta corrente pode causar queda na eficiência das células e, em caso mais drástico, a célula pode ser desconectada do arranjo causando assim a perda total do fluxo de energia do módulo. Para evitar esses problemas, usa-se um diodo de bloqueio impedindo assim correntes reversas que podem ocorrer caso liguem o módulo diretamente em um acumulador ou bateria [11]

Os díodos são normalmente associados, por razões de fabrico, a 18 ou 20 células solares, pelo que um módulo solar de 36 a 40 células tem dois díodos by pass [8].

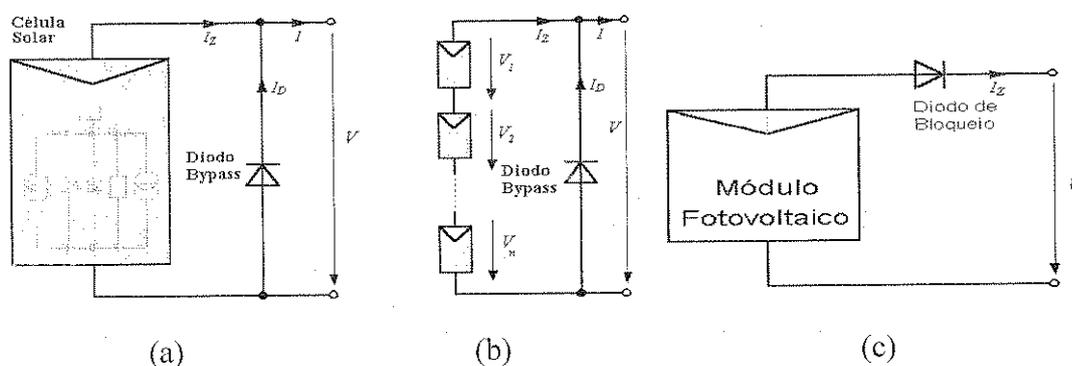


Figura 9. Possível ligação de um diodo *by pass* entre células (a) e (b), e um diodo de bloqueio, num módulo (c) [11].

2.4.2. Regulador de Carga

O regulador de carga monitora constantemente a tensão acumulada na bateria. Quando a bateria atinge o valor de saturação o regulador de carga interrompe o carregamento. Este processo é feito ao abrir um circuito entre o módulo PV e a bateria. Assim que a bateria comece a descarregar, o regulador reconecta o gerador à bateria e recomeça o ciclo.

Existem dois tipos de configurações de construção física, que são paralelos e série; e diversas estratégias de controle: *On/Off*, Tensão Constante, Corrente Constante, dentre outras [12].

Na configuração série, a chave é colocada entre os dois subsistemas. Quando fechada, permite que os módulos entreguem corrente aos acumuladores, enquanto que aberta, ela impede esse

fluxo de corrente. Já na configuração paralela, a chave é posicionada em paralelo, quando as baterias estão próximas de sua carga total, o arranjo fotovoltaico é curto-circuitado, e conseqüentemente, isolado do restante do circuito. A Fig. 10 mostra os diagramas esquemáticos das duas configurações [12].

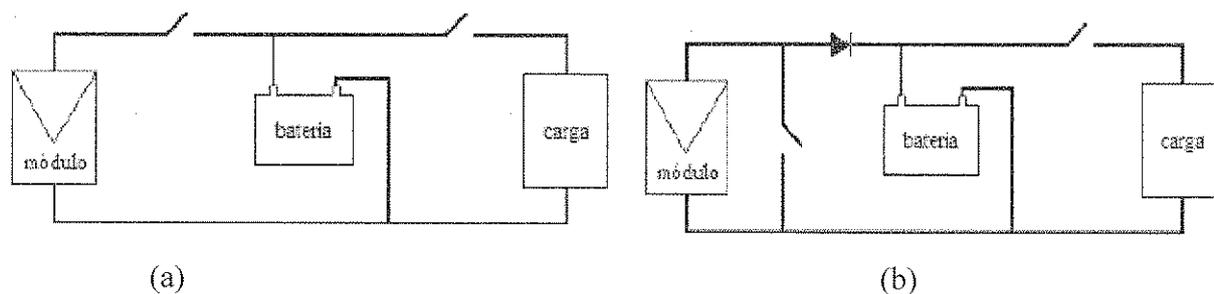


Figura 10 Diagrama básico de controladores de carga usados em sistemas fotovoltaicos simples, (a) Controlador do tipo série, (b) Controlador do tipo paralelo [12].

A estratégia de controle mais simples é a *On/Off*, que consiste na atuação das chaves quando a tensão nos acumuladores chega a valores pré-determinados, conhecidos como ponto de ajuste (*setpoints*) [12].

2.4.3. Conversores CC-CC

Conversores consistem em um dispositivo eletrônico que converte a potência de entrada a tensão contínua, em potência de saída a tensão contínua mas diferente. Esta pode ser uma tensão maior ou menor do que a de entrada [13].

Existem três topografias básicas de conversores CC-CC que são, conversor redutor de tensão, o conversor elevador de tensão e o conversor redutor-elevador.

2.4.4. Inversor CC-AC

É um dispositivo eletrônico que tem como função converter a corrente contínua do gerador **PV** e/ou das baterias em corrente alternada, com a tensão adequada para cada aplicação. Este, desempenha um grande papel na otimização da eletricidade gerada no módulo.

Nos sistemas de bombeamento **PV**, normalmente utiliza-se um inversor acoplado ao gerador **PV** através de um seguidor de ponto de potência máxima [13].

2.4.5. Seguidor de Ponto de Máxima Potência

É um dispositivo que consiste em um redutor e elevador de tensão, conectado em série entre o gerador **PV** e a carga que pode ser um motor, inversor ou bateria. Permite a operação do sistema para vários níveis de irradiância, de altura manométrica e da demanda de água. Pode-se afirmar que este é um conversor CC-CC situado entre o gerador fotovoltaico e a carga, que tem a função de transferir a energia gerada no gerador **PV** para a carga [2].

2.5. Conjunto de Motor e bomba

O bombeamento **PV** é feito pelo grupo de motor-bomba sob ação da energia elétrica. Estes grupos de motores e bombas devem ser bem acoplados de modo a possuírem uma eficiência elevada. Actualmente são fabricados grupos motor-bomba projetados para o uso **PV**. Estes são fabricados no sentido de aumentar a eficiência total do conjunto, e também para reduzir a potência de torque inicial do motor [2].

A seguir apresentam-se as principais características dos motores e bombas utilizadas nos sistemas **PV** para bombeamento de água.

2.5.1. Motores Eléctricos

São máquinas destinadas a transformar energia elétrica em energia mecânica [15].

No sistema de bombeamento **PV**, estes encontram-se em três grupos básicos, a saber [2].

- Motor em Corrente Contínua (CC) com Escovas;
- Motor em Corrente Contínua (CC) sem Escovas;
- Motor em Corrente Alternada (CA).

2.5.1.1. Motor em Corrente Contínua (CC) com Escovas

Estes motores são mais adequados para os sistemas **PV** devido a sua compatibilidade com a energia **PV**, e são mais eficientes do que os motores CA. Entretanto, têm a desvantagem de serem de um custo muito alto, necessitar de troca de escovas e manutenção periódica [2].

O seu funcionamento, baseia-se na mudança de polaridade. Na maioria dos motores CC o rotor é um eletroímã permanente. Para tornar esse eletroímã eficiente o rotor contém um núcleo de ferro que torna-se fortemente magnetizado, enquanto a corrente flui pela bobina. O rotor começa a girar desde que esta corrente inverta seu sentido de percurso, cada vez que seu pólo alcança os pólos opostos do íman fixo. Usa-se um comutador para produzir essas reversões. O comutador apresenta duas placas de cobre encurvadas e fixadas isoladamente no eixo do rotor. Estas placas são isoladas nos terminais do enrolamento da bobina. Então, quando lhe é aplicado a corrente eléctrica, esta alcança uma das escovas (+), que transfere para o comutador, e este torna a transferir para a bobina do rotor, e finalmente sai por outra placa do comutador que reenvia para outra escova (-). Nessa etapa o rotor realiza a sua primeira meia-volta. Em seguida as placas do comutador trocam seu contacto com as escovas e a corrente inverte seu sentido de percurso na bobina do rotor. O motor CC continua girando, sempre no mesmo sentido [15].

O rotor de um motor CC gira com velocidade angular proporcional à tensão aplicada em sua bobina (de pequena resistência eléctrica). Quando a bobina estiver em movimento, o fluxo magnético sobre a bobina gera uma força contra-eletromotriz (f.c.e.m) que extrai energia da corrente e baixa a tensão eléctrica sobre as bobinas. O torque resultante se anula quando a f.c.e.m. se iguala à tensão eléctrica aplicada a velocidade angular passa a ser constante [15]. A fig. 11 ilustra o motor CC e seu princípio de funcionamento.

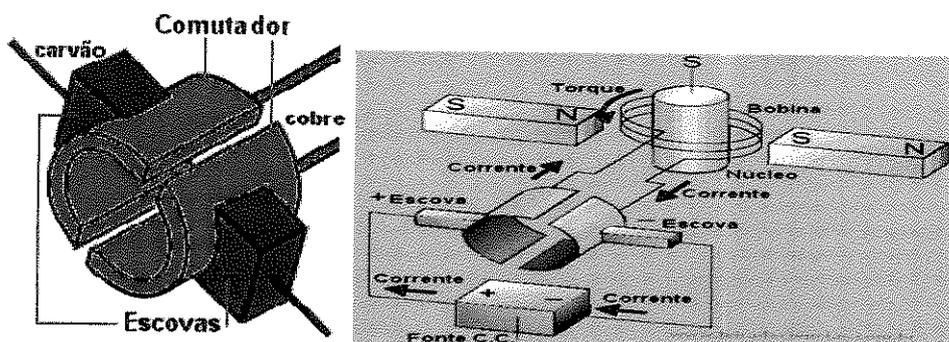


Figura 11. Motor CC (a) e seu funcionamento (b) [15].

2.5.1.2. Motor em Corrente Contínua (CC) sem Escovas

Esta categoria de motores, para além de ser mais eficiente que os motores CA, não necessita de manutenção periódica na troca de escovas, possui menor custo de manutenção e são mais cómodos [2]. O seu princípio de funcionamento é semelhante ao do motor em corrente contínua com escova. Apenas o ímã permanente não está conectado com a escova [15].

2.5.1.3. Motor em Corrente Alternada (CA)

Estes motores geralmente são utilizados em sistemas submersos, destinados a bombear grandes quantidades de água. Neste motor o ímã permanente é que gira entre dois eletroímãs estacionários. Estes eletroímãs são alimentados por corrente alternada, desta maneira os pólos invertem sua polaridade conforme o sentido da corrente [15].

Quando o rotor gira, o pólo norte é puxado para o eletroímã esquerdo e empurrado pelo eletroímã direito. Sempre que o pólo norte tenta alcançar o pólo sul de um eletroímã estacionário, a corrente inverte-se e o pólo sul transforma-se em pólo norte. Estes motores são usados somente para sistemas que funcionam a velocidade angular constante [15].

ocorrendo assim o movimento do líquido do reservatório de cota inferior para a bomba e da bomba para o reservatório de cota superior [2].

As bombas centrífugas dividem-se em bombas de simples estágio e bombas de múltiplos estágios segundo a quantidade de rotores [14]. Uma característica importante deste tipo de bombas, é de o seu motor requerer uma potência de partida próxima a do funcionamento normal da bomba. Esta característica é importante no sistema PV porque não necessita de acumulador específico para o arranque. São projectadas para alturas de bombeamento e velocidade de rotação do rotor muito restritas.

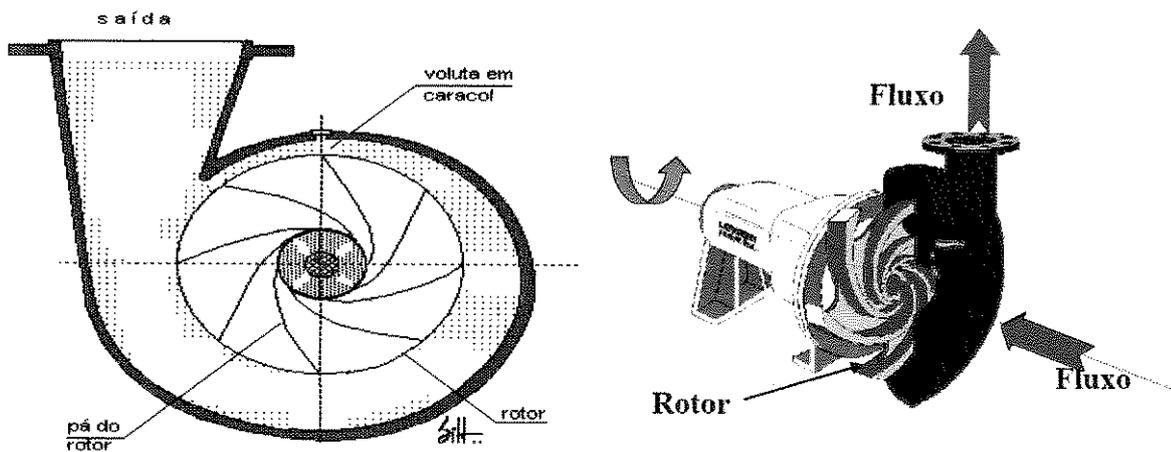


Figura 13. Bomba centrífuga com pás guias [14], [17].

2.5.2.2. Bombas de Deslocamento Positivo

Este tipo de bombas tem duas câmaras de alta pressão, em cujo interior o movimento de um órgão propulsor comunica energia de pressão ao líquido, provocando o seu escoamento na tubulação de aspiração até a bomba e na tubulação de recalque até o ponto de utilização. A característica principal desta classe de bombas é que uma partícula líquida em contacto com o órgão que comunica a energia tem aproximadamente a mesma trajectória que a do ponto do órgão com a qual está em contacto. Esta característica é que faz a diferença deste tipo de bomba com as bombas centrífugas [14]. Estas bombas podem ser do tipo heliocoidal, diafragma ou pistão. Requerem uma maior potência de partida do motor, implicando a necessidade de existir

um acumulador específico para a partida do motor, ou um maior dimensionamento da geração [2].

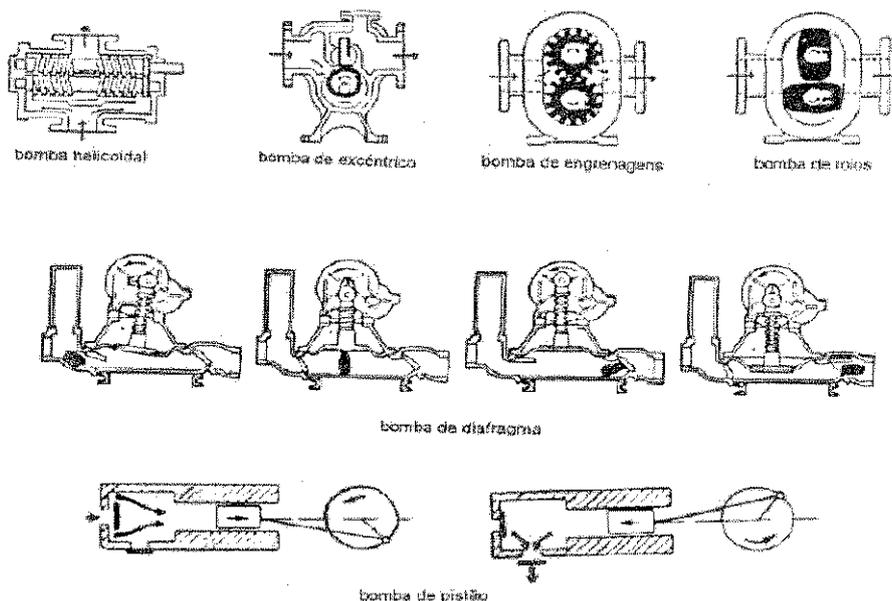


Figura 14. Esquemas de Bombas de Deslocamento Positivo[14]

2.6. Equipamentos Auxiliares

São todos equipamentos que complementam o sistema, como os fios eléctricos, tubagem e outros dispositivos usados na optimização do funcionamento geral que podem ser acumuladores de energia eléctrica e de água, estrutura de suporte, mecanismo de seguimento ou *tracking*, etc. [2].

2.6.1. Fios Eléctricos

Os fios eléctricos devem ser bem conectados por materiais adequados para evitar perdas visando uma máxima segurança. Recomenda-se que a queda máxima da tensão entre o gerador PV e a carga nos sistemas de bombeamento fotovoltaico não ultrapasse os dois por cento da tensão do sistema [2].

2.6.2. Tubulação e Mecanismo de *Tracking*

Na tubulação recomenda-se que as perdas de carga sejam menores que 5% da altura manométrica do sistema. O dimensionamento adequado da tubulação permite perdas de carga muito reduzidas ao longo da tubulação e menor energia requerida. Os materiais utilizados para a tubulação devem ser menos rugosos internamente [2].

O mecanismo de *tracking* ou seguidor tem uma grande importância nos sistemas PV, e consiste em um sistema mecânico acoplado ao sistema PV a fim de interceptar o máximo da radiação emitida durante um dia ou mesmo um ano. É também um seguidor da trajetória do sol [2].

2.6.3. Acumuladores

O armazenamento de energia é um tema central no aproveitamento da energia solar nos sistemas autônomos, dado que sua produção e consumo não coincidem, quer ao longo do dia quer ao longo do ano [8]. O dimensionamento do sistema fotovoltaico está relacionado com o tamanho das baterias ou do reservatório e vice-versa. A acumulação pode ser feita sob a forma de energia elétrica através de baterias ou sob forma de energia hidráulica em reservatórios, no caso específico dos sistemas de bombeamento. A acumulação em baterias fornece ao sistema uma potência instantânea superior a que o sistema fotovoltaico poderia gerar. Este fornecimento é importante para o momento de arranque do motor. A acumulação também mantém o nível de tensão constante, uma vez que a tensão de saída dos painéis dependem da radiação incidente [2].

2.7. Dimensionamento de um Sistema Fotovoltaico para Bombeamento de Água

Consiste na determinação do tipo e tamanho do sistema capaz de satisfazer a demanda. Um correcto dimensionamento evita custos desnecessários inerentes a possível sobredimensionamento, evita problemas decorrentes de um subdimensionamento e também permite que a instalação funcione no seu ponto óptimo. Nestes sistemas deve ser considerada não só a influência da radiação e da temperatura, como também o facto de a variação da temperatura ser inversamente proporcional à da radiação, e o consumo de água ser proporcional à temperatura, o que pode levar a períodos de carência de água ao longo do ano [18].

O dimensionamento envolve também como parâmetro básico a demanda a ser atendida, m^3 /dia. Neste trabalho, primeiramente apresenta-se o resumo da metodologia do dimensionamento seleccionado, em seguida faz-se uma verificação da teoria e da prática constatada nas zonas visitadas e por fim exemplo de dimensionamento.

2.7.1. Metodologia do Dimensionamento

O sistema proposto neste trabalho usa um motor, uma bomba e gerador fotovoltaico, sem o uso de baterias. É enquadrado também um reservatório e dispositivos eletrônicos de potência. Deve-se também tomar em conta a determinação da radiação disponível no local, em função do melhor ângulo de inclinação dos colectores, no sentido de otimizar a energia ao longo do ano [5].

O primeiro passo no dimensionamento é definir a demanda da água e as vazões requeridas consoante a capacidade do poço. Para definir a demanda da água é feito um balanço energético do sistema, isto é, a energia demandada deve ser igual a energia gerada. As formas de cálculo deste balanço variam nos parâmetros a serem utilizados e nos critérios a serem adotados como a eficiência do sistema, custo da energia gerada e confiabilidade [2].

2.7.1.1 Estimação da Vazão

A estimação da vazão, depende do caudal da água encontrada após ser feito o furo e do tipo da bomba disponível. Existem *softwares* e catálogos usados por empresas deste sector para o dimensionamento rápido de sistemas e estes catálogos contém todas as características e dados para os diferentes tipos de sistemas. Uma vez feito o furo e determinado o caudal, os técnicos usam tais catálogos para a definição dos materiais necessários. Para melhor compreensão vide na figura 1 do anexo onde se apresenta um exemplos de catálogos utilizados pelas empresas.

2.7.1.2. Determinação do Diâmetro da Tubagem

O objectivo desta secção é propor uma equação com melhor custo benefício. O diâmetro interno ou área livre de escoamento, é fundamental na escolha da canalização já que, quanto maior a

vazão a ser bombeada, maior deverá ser o diâmetro interno da tubulação, afim de diminuir-se as velocidades e, conseqüentemente, as perdas de carga. São muitas as fórmulas utilizadas para definir-se qual o diâmetro mais indicado para a vazão desejada. Para facilitar os cálculos, todas as perdas são tabeladas pelos fabricantes de diferentes tipos de tubos e conexões. No entanto, para efeito de cálculos, a fórmula mais utilizada para chegar-se aos diâmetros de tubos é a Fórmula de Bresse, expressa por [19]:

$$D = K\sqrt{Q} \quad (6)$$

Tal que: **D** = Diâmetro interno do tubo, em metros;

K = 0,9 - Coeficiente de custo de investimento x custo operacional. Usualmente aplica-se um valor entre 0,8 e 1,0;

Q = Vazão, em m³/s;

A expressão (6) calcula o diâmetro da tubulação de recalque, sendo que, na prática, para a tubulação de sucção adota-se um diâmetro comercial superior;

2.7.1.3. Potência Hidráulica

A potência hidráulica (P_H) requerida para elevar a água a uma certa altura manométrica (H_m), uma determinada vazão (Q_m) é determinada através da expressão [14]:

$$P_H = 2.725 \times Q_m \times H_m \quad (7)$$

Tal que: **PH** – é potência hidráulica (W);

Qm – é a vazão (m³/h);

Hm – é a altura manométrica;

2.725 – representa constante hidráulica.

Altura manométrica de uma bomba é a carga total de elevação que a bomba trabalha. É dada pela expressão [2]:

$$H_m = H_v + h_f + h_e \quad (8)$$

Tal que: H_v – é altura vertical (m)

h_f – é perda de carga ao longo da tubulação

h_e – é perda de carga em pontos singulares (m)

A altura vertical (H_v) é definida como a soma das alturas dinâmicas (H_{TD}) e do reservatório (H_R) [2].

$$H_v = H_{TD} + H_R \quad (9)$$

As perdas de carga na tubulação (h_f) e nos pontos singulares (h_e) podem ser obtidas utilizando catálogos fornecidos pelas empresas fabricantes dos materiais em questão, ou pelas seguintes equações [2]:

$$h_f = \lambda \times \frac{LV^2}{2Dg} \quad (10)$$

Tal que: λ - coeficiente de atrito ou perda de carga adimensional;

L - comprimento da tubulação (m)

V - velocidade média do fluxo (m/s)

D - diâmetro interno da tubulação (m)

O factor λ é determinado através do diagrama de Moody obtido em função da rugosidade, das perdas da tubulação e do número de Reynolds que determina a característica do regime do fluido, como foi ilustrado na figura 2 do anexo.

Es perdas de carga nos pontos singulares, temos:

$$h_e = \lambda \frac{V^2}{2g} \quad (11)$$

Tal que: λ – é o coeficiente para o cálculo das perdas singulares.

V – velocidade média (m/s)

O coeficiente λ também pode ser dado por:

$$\lambda = \left[1 - \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2 \right]^2 \quad (12)$$

Tal que: D_1 – diâmetro inicial

D_2 – diâmetro final

As perdas de carga na tubulação e nos pontos singulares podem ser obtidos também através da tabela 1 do anexo.

Depois da obtenção da capacidade do poço, deve-se substituir a altura manométrica pela altura equivalente (H_{TE}) na equação de P_H . A altura equivalente pode ser definida como altura constante na qual se obtém um certo volume de água diária a uma vazão média (Q_m), tendo em conta a vazão máxima do poço [2]. Portanto, deve ser feito um estudo da capacidade do poço, determinando o limite máximo de extração de água em função da sua reposição [7]. Com este estudo poderá ser prevenido que a bomba trabalhe na ausência de água evitando assim possíveis avarias no sistema [20].

Daí temos:

$$H_{TE} = H_{ST} + H_R + \left(\frac{H_{TD} - H_{ST}}{Q_M} \right) \cdot Q_m + h_F(Q_m) + h_e(Q_m) \quad (13)$$

Tal que: H_{TE} – é a altura equivalente (m)

H_{TS} – é a altura estática (m)

H_R – é a altura do reservatório (m)

H_{DT} – é a altura dinâmica (m)

Q_m – corresponde a vazão média para obter o volume diário (m^3/h)

Q_M – corresponde a vazão máxima fornecida pelo teste do poço (m^3/h)

$h_F(Q_m)$ – perda de carga na tubulação (m)

$h_e(Q_m)$ – perda de carga nos pontos singulares (m)

A energia hídrica diária para uma determinada demanda, é determinada pela equação [21]

$$E_H = 2,725Q_d H_m \quad (14)$$

Onde: E_H – é a energia hídrica diária, Wh/dia

Q_d – representa a vazão (volume diário projectado), m³/dia

A potência eléctrica de um sistema do bombeamento pode ser dada por:

$$P_{EL} = \frac{2.725Q_m H_m}{\mu_{MB-PV}} \quad (15)$$

μ_{MB-PV} - é a eficiência do grupo motor-bomba do sistema fotovoltaico.

A eficiência média de um sistema de bombeamento fotovoltaico é 11% para a conversão fotovoltaica, dos quais 0.5% constitui as perdas de distribuição, 6% as perdas de bombeamento e 4.5% constitui a energia útil [2].

O sistema fotovoltaico constituído por um gerador fotovoltaico e um inversor pode ser dado pela expressão:

$$P_{EL-PV} = P_{NOM} \frac{G_{dm}(\gamma, \beta)}{G_{REF}} \mu_G \mu_I \quad (16)$$

P_{EL-PV} – é a potência eléctrica do equipamento;

P_{NOM} – é potência do módulo fotovoltaico (W_p);

G_{dm} – irradiância incidente no plano do gerador fotovoltaico (W/m²);

G_{REF} – irradiância de referência em CPM (W/m²);

μ_G – eficiência do gerador;

μ_I – eficiência do inversor.

2.7.2. Radiação Solar

Sob ponto de vista geral, radiação é qualquer processo de emissão e propagação de energia em forma de raios, seja por forma ondulatória ou por meio de partículas portadoras de energia cinética. Para o caso de radiação solar, esta pode ser definida como a energia emitida pelo sol sob forma de raios, transmitida em forma de radiação electromagnetica [5].

A energia solar captada por uma superfície, varia em função de vários parâmetros tais como a latitude do lugar, a posição do sol em relação a terra, o dia do ano, a hora do dia, as condições atmosféricas, etc [5].

Na optimização da superfície para uma melhor captação da radiação solar, os colectores devem ser posicionados para a direcção do ângulo azimital γ do local e uma inclinação β entre a superfície em questão e a horizontal que provocam a maior colecta da radiação ao longo do ano [2]. A figura 19 representa os diferentes ângulos solares.

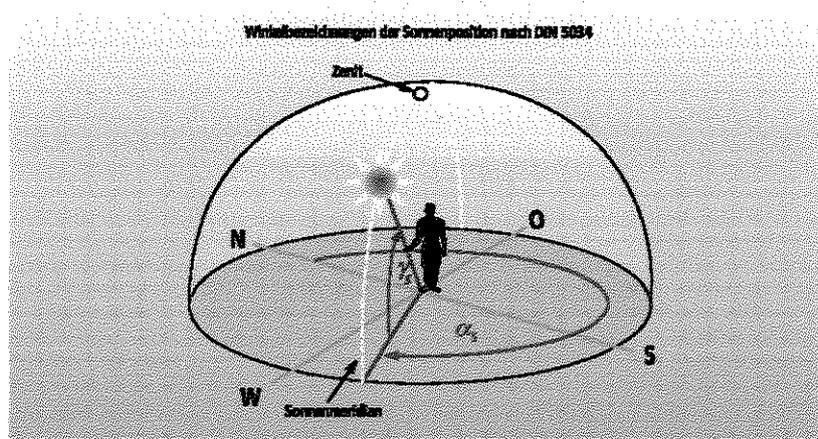


Figura 15. Representação de ângulos da posição solar [8]

Tai que: γ_s , α_s são ângulo de elevação solar e ângulo azimutal, respectivamente.

Geralmente para a determinação do ângulo que optimiza a irradiação local, utiliza-se a informação base, o ângulo de inclinação é igual a latitude do lugar. Quando a latitude é inferior a 15° é aconselhável que a inclinação dos painéis fotovoltaicos seja de 15° , para evitar a

acumulação de sujeiras [5]. Para sistemas localizados no hemisfé sul, os painéis fotovoltaicos são orientados para o norte e para os localizados no emisfério norte, são orientados para o sul.

A seguir são enumerados os passos seguidos para o cálculo da irradiância solar global incidente no plano do módulo fotovoltaico. A metodologia usada é a descrita por Stuart R. Wenham A. Gree, Muriel E. Watt e Richard Corkish.

1. Os valores médios mensais da irradiância global diária na superfície horizontal, R_o , são determinadosatravezda expressão:

$$R_o = R_{om} \left[0.29 \cdot \cos\varphi + 0.52 \cdot \left(\frac{n}{N_d} \right) \right] \quad (17)$$

Tal que n e N_d são a média diária de horas de sol do mês e duração média do dia do mês, respectivamente.

$$N_d = \frac{2 \cdot \omega_s^*}{15} \quad (18)$$

2. Os valores médios mensais da irradiação diária no topo da atmosfera R_{om} , é calcula pela expressão:

$$R_{om} = \left(\frac{24}{\pi} \right) \cdot \gamma_E \cdot e_0^* \cdot \cos\varphi \cdot \cos\delta^* \left[\sin\omega_s^* - \left(\frac{\pi \cdot \omega_s^*}{180} \cdot \cos\omega_s^* \right) \right] \quad (19)$$

Tal que: γ_E – é constante solar incidente em uma hora (MJ/m²/h);

e_0^* - é excentricidade orbital da terra;

φ – latitude do lugar;

δ – declinação;

ω_s - corresponde ao ângulo horário;

* - corresponde aos valores dos dias característicos.

3. índice de claridade K_T é definido como o parâmetro que representa a atenuação da radiação solar ao atravessar a atmosfera.

$$K_T = \frac{R_o}{R_{om}} \quad (20)$$

4. índice de irradiação difusa K_d é a quantidade da irradiação difusa contida na radiação global, dada pela expressão:

$$K_d = 1 - 1.13 \cdot K_T \quad (21)$$

5. A irradiação global em superfície inclinada é expressa por:

$$R(\beta) = X_b \cdot (R - R_d) + R_d \left(\frac{1 + \cos\beta}{2} \right) + R \left(\frac{1 - \cos\beta}{2} \right) \rho \quad (22)$$

Tal que: ρ – é índice de reflexão da superfície.

X_b – razão entre a radiação numa superfície inclinada e a radiação directa numa superfície horizontal. Para o pólo sul pode ser expresso por:

$$X_b = \frac{\cos(\varphi + \beta) \cdot \cos\delta \cdot \text{sen}\omega_{s,\beta}^* + \left(\frac{\pi}{180} \right) \omega_{s,\beta}^* \text{sen}(\varphi + \beta) \text{sen}\delta}{\cos\varphi \cos\delta \text{sen}\omega_s^* + \left(\frac{\pi}{180} \right) \omega_s^* \text{sen}\varphi \text{sen}\delta} \quad (23)$$

Onde:

$$\omega_{s,\beta}^* = \min \left\{ \begin{array}{l} \cos^{-1}(-\tan\varphi \tan\delta) \\ \cos^{-1}(-\tan(\varphi - \beta) \tan\delta) \end{array} \right. \quad (24)$$

Os valores médios da declinação para todos os meses do ano são apresentados na tabela 2.

Tabela 2.7.2: Declinações médias mensais ao longo do ano

Mês	Jan	Fev	Mar	Abri	Mai	Jun	Julh	Ago	Set	Out	Nov	Dez
δ	-20.94	-13.67	-2.49	9.34	18.74	22.99	21.05	12.87	1.12	-10.94	-19.75	23.22

FONTE: Solar Engineering of thermal processes. John A. Duffie e William A. Beckman.

A reflectividade, tem diferentes valores que variam segundo as características da superfície do lugar. Para efeitos de cálculos e se assumirmos que a superfície é rochosa, então o albedo será igual a 0.5.

Após ter determinado a potência hidráulica, estimado a vazão e otimizado o ângulo para o sistema, utilizam-se as ferramentas gráficas fornecidas pelos fabricantes dos grupos motor-bombas para a definição do tipo e modelo adequado a ser escolhido segundo as curvas de desempenho do equipamento comercial (ver figura 1 do anexo I).

A tabela 3 mostra, resumidamente as configurações de bombeamento fotovoltaico mais utilizadas actualmente.

Tabela 2.3. Principais configurações do bombeamento fotovoltaico [9]

	Sistema CC	Sistema CA
Grupo	Gerador + motobomba	Gerador+inversor+motobomba
Gerador (W_p)	50 – 600	600 – 2000
Tensão DC (V)	< 60	>120
Localização	Superfícies e submersa	Submersa
Intervalo (m^3 /dia)	100 – 200	500 – 2000
Confiabilidade	Média	Elevado
Manutensão	6 – 12 meses	5 – 7 anos
Fonte de água	Rios, poços cacimba	Poços tubulares

CAPÍTULO III: Metodologia do Trabalho

3.1. Procedimentos da Pesquisa

O presente trabalho tem como base a revisão bibliográfica que foi fundamental para a descrição das diferentes configurações de sistemas fotovoltaicos aplicados ao bombeamento de água. Dentro da área de estudo, foram realizadas visitas, a locais que dispõem de instalações deste tipo de sistemas para aferir a sua distribuição espacial, bem como o seu estado de funcionamento. Para o efeito, foi realizado um inquerito aos beneficiários do sistema para apurar o número de beneficiários e seu grau de satisfação. Junto aos proprietários e/ou executores destes projectos de instalação, foram realizadas entrevistas para colher informações sobre a forma de execução deste tipo de projecto. Foram igualmente realizadas medições das características eléctricas de alguns módulos solares no terraço do Departamento de Física da UEM, para melhor percepção da influência do gerador fotovoltaico no desempenho de um sistema fotovoltaico de bombeamento de água como um todo.

3.2. Material e Métodos

3.2.1. Material

Para a realização deste estudo foram usados os seguintes materiais :

- Dois módulos fotovoltaicos, um do tipo IEC621 e CEC503, com 36 células conectadas em série, usados como amostra para a colheita de dados;
- Uma única célula de Silício monocristalino do tipo BP Solar 32452S, com constante de calibração igual a $30.0 \text{ mV}/(1000 \text{ W/m}^2)$, usada para medir a irradiância incidente no módulo;
- Uma unidade programável (*Datalogger*, CR23X *Micrologger*), para a leitura e processamento da informação dos sensores de temperatura, radiação incidente, e voltagem e corrente de saída do módulo;

- Um Sun Tracker, um Datalogger apenas destinado a medir a corrente e tensão desde I_{oc} a V_{oc} ;
- Um multímetro usado para verificação e controle de corrente no esquema montado;
- Dois vidros 1.20 x 0.54 m, com 4 mm de espessura, um liso e outro de Bronze, usados para atenuar a irradiância incidente nos dispositivos de recepção (o módulo e a célula) na ordem de 75% e 50% respectivamente;
- Quatro grampos de crocodilo, para poder conectar os sensores e fios de ligação do módulo com o *datalogger*;
- Um *laptop* com o programa do *datalogger* instalado, para programar o *datalogger* de modo a que este inicie as suas medições e faça a recolha e tratamento dos dados;
- Um arranjo de cartolina todo pintado a preto para sombrear a metade, uma e duas das células do módulo;
- Uma bateria externa do tipo LCR127R2PG de 12V, para fornecer corrente ao *datalogger*;
- Dois termopares do tipo Cobre-constantâneo para medição da temperatura do ar e do módulo solar;
- Fios de ligação.

3.2.2. Método

Durante 10 dias (de 1 à 10 de Fevereiro de 2011), foram realizadas medições regulares de:

- Irradiância;
- Voltagem e corrente eléctrica (à saída do módulo);
- Temperatura (do módulo e do ar ambiente);

E durante 60 dias (Dezembro 2010 e Janeiro 2011), foram realizadas visitas de campo. Houve muita dificuldade de realizar essas visitas devido a falta de transporte e informação que encaminhavam aos locais. Por esta dificuldade só foi possível visitar os locais mais próximos da cidade de Maputo e Matola (Bairro Tsalala, Bairro CMC, Bairro das Mahotas).

- **Medição da Irradiância**

A medição da radiação foi feita através da célula BP Solar 32452S como mostra a figura 16. Esta célula foi calibrada com $30.0\text{mV}/(1000\text{W}/\text{m}^2)$ e está encapsulada por uma moldura de Alumínio. A voltagem lida na saída da célula é convertida em irradiância de acordo com a constante de calibração. A célula BP Solar é colocada no mesmo plano com o painel solar usado para a medição, deste modo estes dois dispositivos serão atingidos pela irradiância nas mesmas condições. Na medição realizada, o plano encontrava-se virado para o Norte, a uma inclinação de 26° correspondente a latitude de Maputo, a uma altura da base de 1 m e 5 cm. A figura 16 ilustra uma foto que mostra o sensor para a medição da radiação solar no plano do módulo.

Para o estudo da irradiância a temperatura constante, foram usadas as curvas I-U para as quais a temperatura do módulo era aproximadamente igual para os diferentes valores da irradiância.

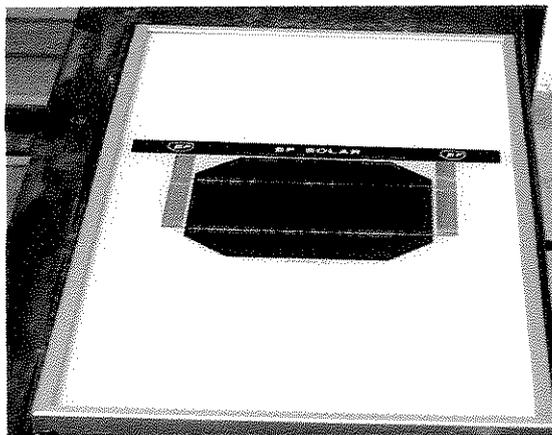


Figura 16 Célula solar de tecnologia equivalente usada para a medição da irradiância. **Foto:** A. Francisco.

- **Medição da Voltagem e da Corrente Eléctrica**

A voltagem e a corrente eléctrica são medidas através do Sun Tracker ligando directamente as entradas deste dispositivo às saídas do módulo fotovoltaico. A voltagem é medida separadamente da corrente eléctrica através de dois fios (*sense*), sendo os outros dois fios (*Solarcell*) para a medição da corrente. As medições são feitas em fios separados, no sentido de excluir a resistência dos fios que conduzem a corrente na medição da curva I-U. No estudo da característica I-U, para diferentes valores de irradiância, foram realizadas três medições

rápidas do um módulo(do tipo IEC621), sendo uma livre e duas coberto de vidro liso e brozeado.

Para verificar o efeito da temperatura à irradiância constante, foi usado o datalogger CR23X para permitir o registo simultâneo dos diferentes sensores e seleccionar aquelas leituras realizadas à irradiância constante. Neste caso, o registo das medições foi realizado de 30 em 30 segundos, num período que vai desde as 9:00horas às 15:00horas. Tal como no Sun Tracker, a voltagem e corrente também são medidos separadamente.

- **Medição da Temperatura do Módulo Fotovoltaico e do Ar Ambiente**

Para esta medição, foram usados dois termopares do tipo Cobre-constantâneo, um foi conectado ao módulo e outro exposto ao ar livre, estes termopares estão acoplados ao *datalogger*, como mostra a Figura 17. Para o estudo do efeito da temperatura com a irradiância constante, seguiu-se a mesma ordem de ideias usadas na análise da curva I-U para diferentes valores da irradiância, isto é, foram seleccionadas as curvas I-U para as quais a irradiância incidente era praticamente a mesma para os diferentes valores da temperatura.

O *datalogger* foi programado para fornecer 9 dados a cada medição. As operações efectuadas com base nestes dados foram os cálculos de:

- Irradiância média, G ;
- Temperatura média do ar ambiente, T_a^a ;
- Temperatura média do módulo, T_m^a ;
- Potência máxima em cada instante, P_{max} ;

As fórmulas usadas para esses cálculos foram as seguinte:

Equação para o cálculo do valor médio da irradiância:

$$G = \frac{\sum_{i=1}^9 E_i}{9} \quad (25)$$

Equação para o cálculo do valor médio da temperatura do Ar:

$$Ta^a = \frac{\sum_{i=1}^9 t_i}{9} \quad (26)$$

Equação para o cálculo do valor médio da temperatura do Módulo:

$$Tm^a = \frac{\sum_{i=1}^9 T_i}{9} \quad (27)$$

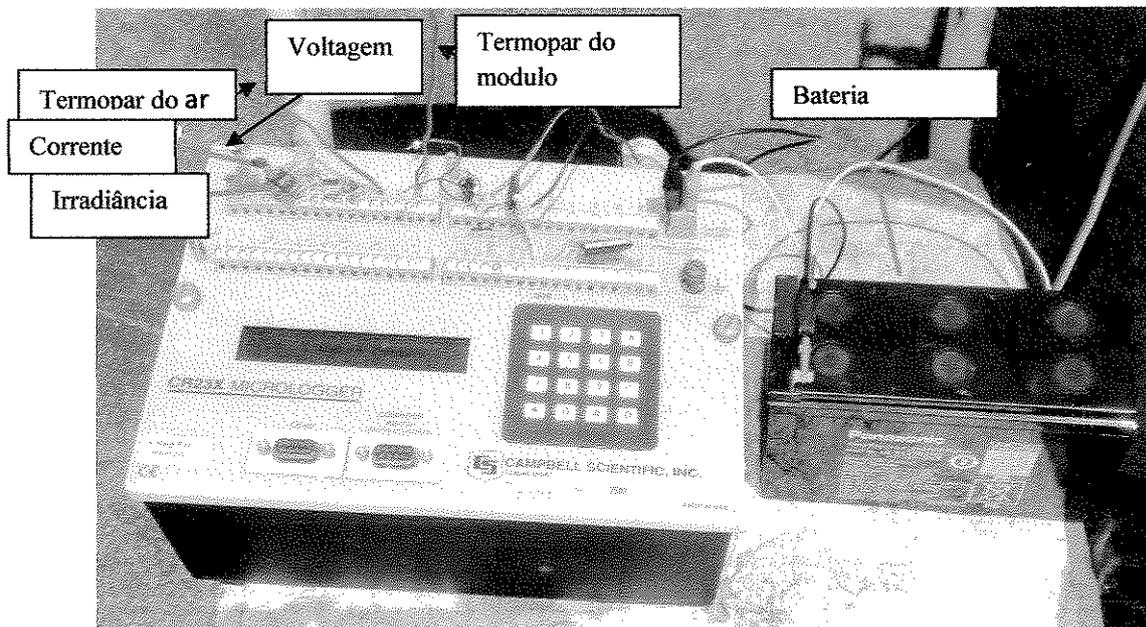


Figura 17. Ilustração do *Datalogger* CR23X e os seus respectivos canais de medição. **Foto:** A. Francisco.

- **Efeito do Sombreamento nos Módulos Fotovoltaicos**

Para o efeito de sombreamento sobre um módulo solar, utilizou-se um arranjo de cartolina pintada de preto. O arranjo é colocado sobre 50%, 100% de uma das células do módulo, e 100% de duas células, escolhidas de forma aleatória, mas que não fazem parte o mesmo contorno, e em seguida tirada a característica I-U durante o tempo de duração da obstrução da luz na célula. A figura 18 ilustra o arranjo da cartolina utilizada.

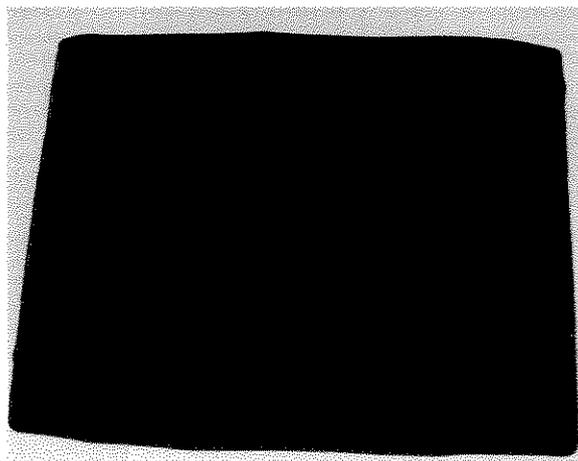
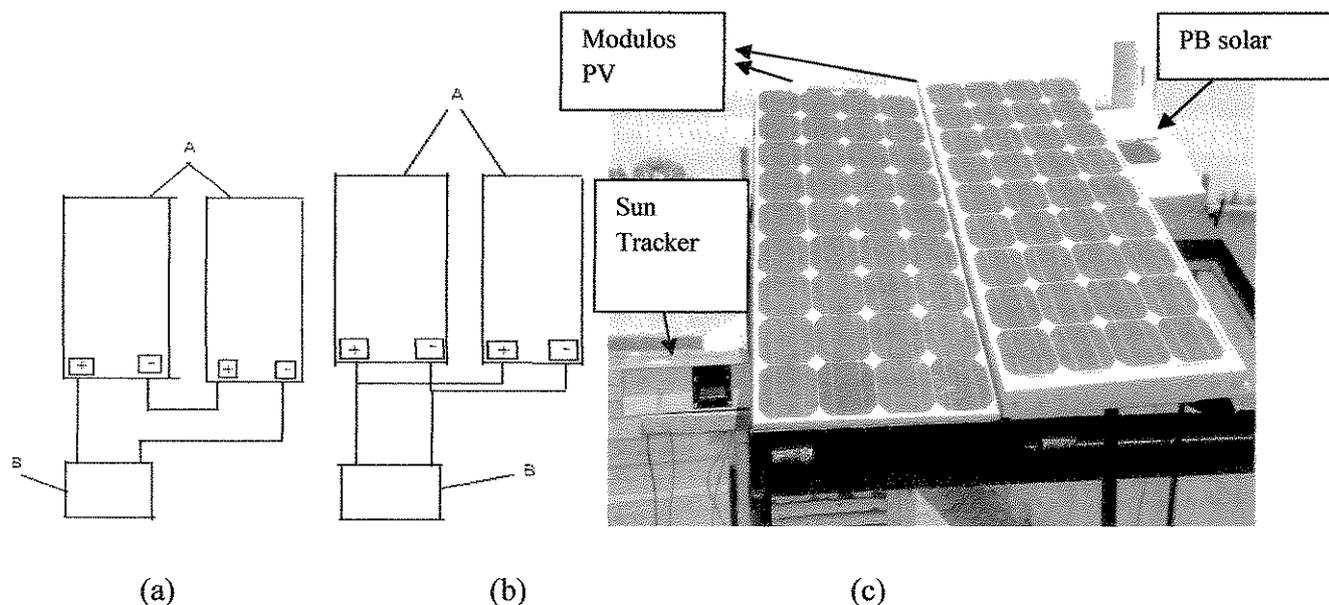


Figura 18. Arranjo de cartolina preparado para impedir a passagem da radiação à célula do módulo. **Foto:** A. Francisco.

- **Efeito das Ligações em Série e Paralelo**

Para fazer estas ligações foram usados os dois módulos fotovoltaicos mencionados.

Para a obtenção da **ligação em série** fez-se a conexão do pólo negativo dum módulo com o pólo positivo do segundo módulo, e as terminais positiva e negativa restantes foram conectadas ao Sun Tracker. Na **ligação em paralelo** foram ligados pólos de mesmo nome de módulos diferentes, e depois, estas extremidades resultantes foram ligadas às entradas do dispositivo de leitura. A figura 19 apresenta o esquema usado para efectuar as medições e uma fotografia.



A- Módulos Fotovoltaicos, B- Sun Tracker

Figura 19. Ligação em Série (a), em Paralelo (b) e fotografia (c). **Foto:** A. Francisco.

As expressões genéricas para o cálculo da potência eléctrica máxima e instantânea fornecidas pelo módulo são, respectivamente:

$$P_{max} = I_{max} \cdot U_{max} \quad (28)$$

$$P_e = I \cdot U \quad (39)$$

Após a colheita e análise dos dados foram realizados os seguintes gráficos:

- Construção das curvas experimentais da $I-U$ e $P-U$, das ligações em série e em paralelo;
- Construção das curvas experimentais da $I-U$ e $P-U$ para aferir a influência da radiação, temperatura e sombreamento.

Capítulo IV: Análise e Interpretação dos Resultados

4.1. Análise do Efeito das ligações Série e Paralelo

As células solares são interligadas por forma a aumentar a potência total útil. É importante que para o efeito, sejam usados módulos idênticos de forma a minimizar as perdas de potência no sistema, o que não aconteceu nesta experiência em virtude de um dos módulos apresentar fissuras na sua moldura protectora.

Nas tabelas 2 à 5 do anexo II estão apresentados os dados obtidos para análise deste efeito.

O módulo 1, na figura 19, corresponde ao módulo com a moldura protectora quebrada e o módulo 2 corresponde ao módulo sem defeitos.

A curva característica da ligação em série, figura 20, mostra que o valor de U_{oc} é duplicado e a corrente mantém-se constante. Portanto, este é o tipo de ligação a efectuar quando se pretende elevar a voltagem do sistema. A deformação da forma da curva I-U é devida à perdas ópticas e sombreamento no módulo 1 originado pela quebra do vidro protector.

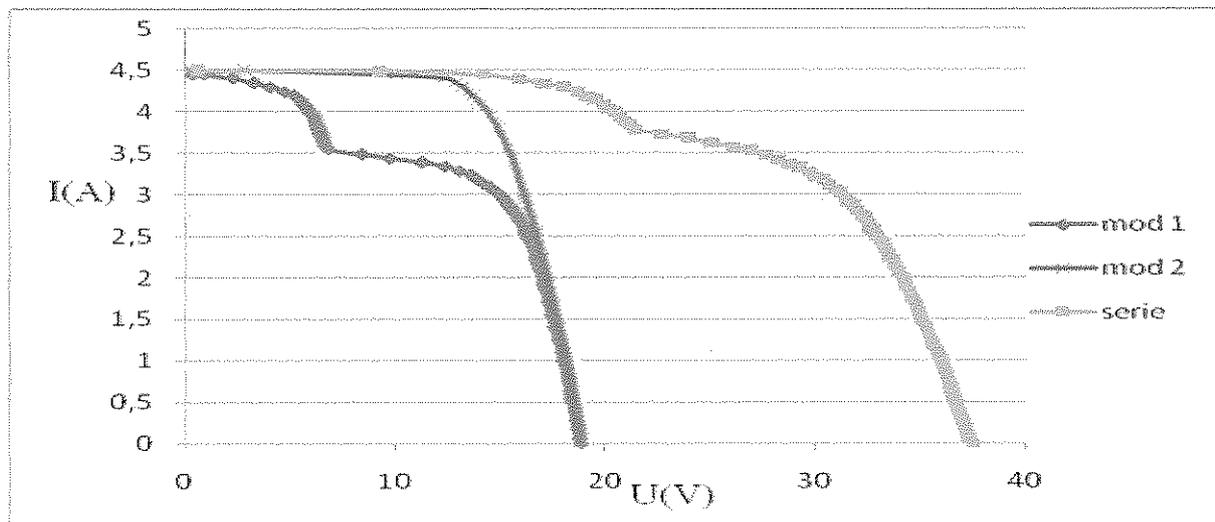


Figura 20. Gráficos das curva características I-U da ligação em série.

Na ligação em paralelo, figura 21, a curva mostra que a I_{sc} duplica-se enquanto que a voltagem mantém-se inalterável. Tal como na ligação em série, a deformação da curva I-U é devida aos defeitos do módulo1. Para um arranjo fotovoltaico em que se pretende aumentar o valor da corrente do sistema, deve se optar pela ligação em paralelo.

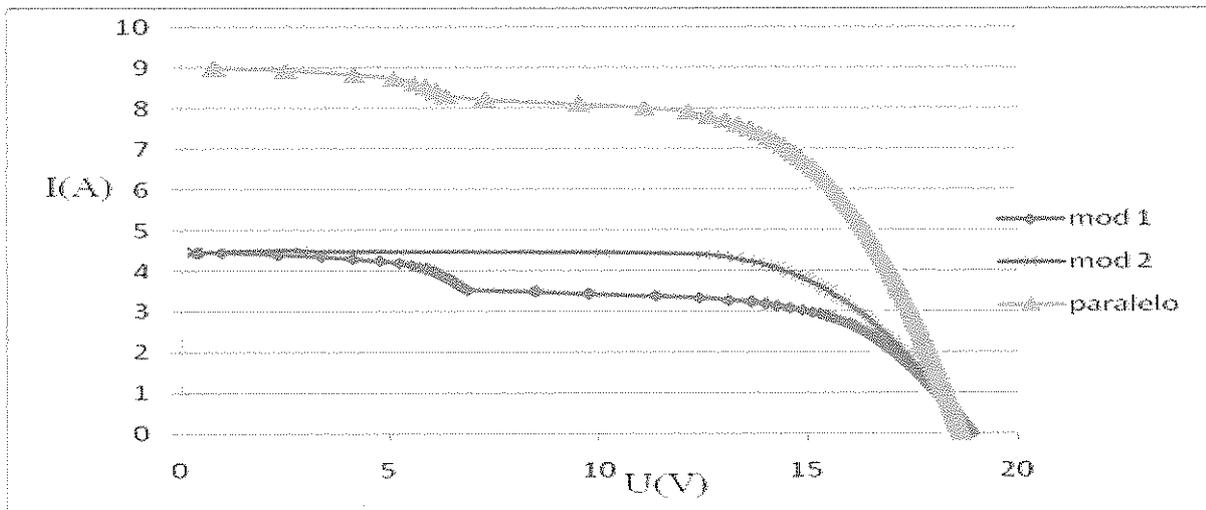


Figura 21. Gráficos das curva características I-U da ligação em paralelo.

Na figura 22 está ilustrado a variação da potência em função da voltagem, para os dois módulos, bem como as ligações em série e paralelo.

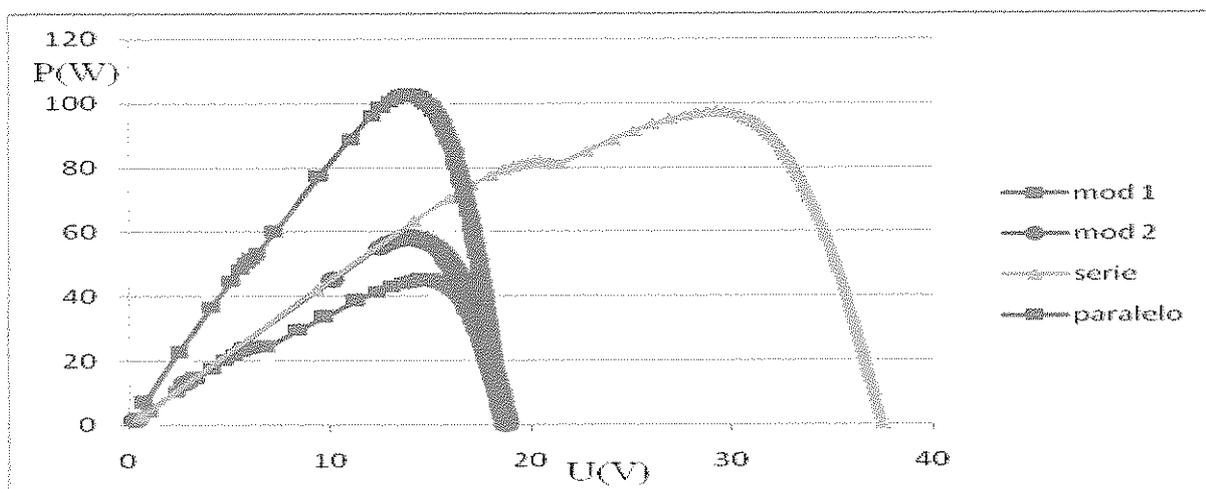


Figura 22. Gráficos das curvas características P-U.

4.2. Análise do efeito da Irradiância sobre a curva característica I-U

A figura 23 ilustra a característica volt-ampérica de um módulo solar sob diferentes níveis de irradiância. Os resultados mostram que a corrente de curto-circuito é directamente proporcional a radiação incidente, enquanto que a a voltagem de circuito aberto cresce logarítmicamente com o aumento da radiação incidente. Consequentemente, a potência máxima que o sistema pode

fornece diminui com a diminuição da radiação. Nas tabelas 6, 7 e 8 do anexo II estão apresentados os dados obtidos para a análise deste efeito.

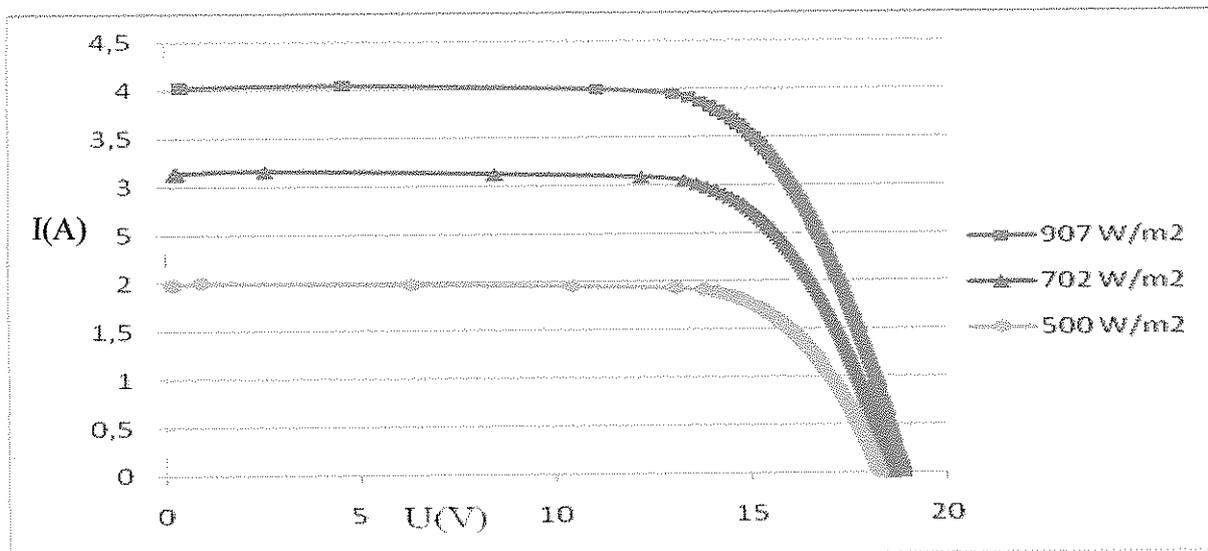


Figura 23. Gráficos das curva I-U fornecidas para diferentes irradiâncias

A figura 24 mostra a influência da irradiância sobre a potência eléctrica que o módulo pode fornecer.

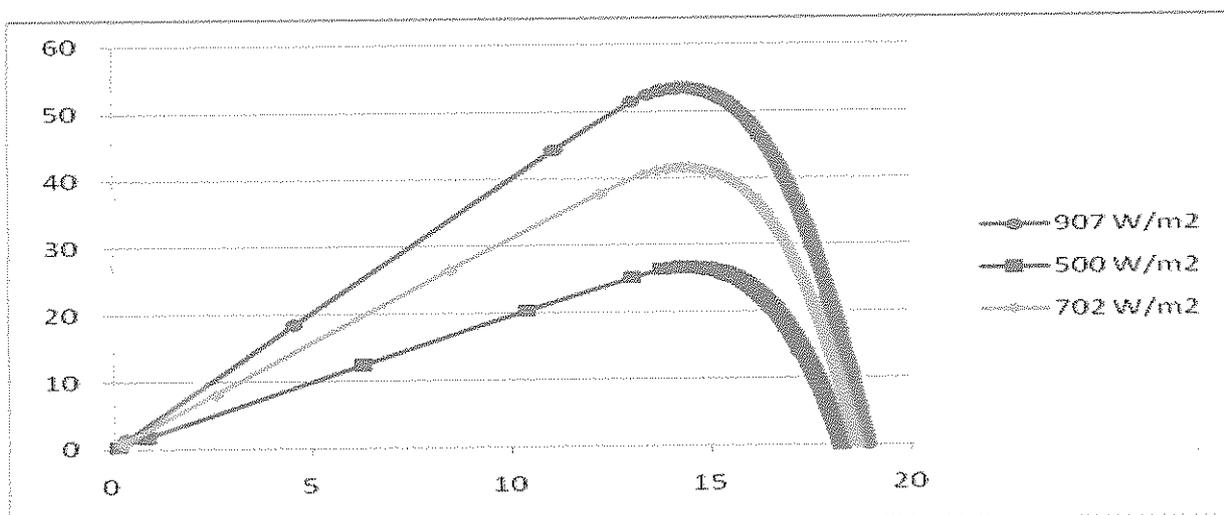
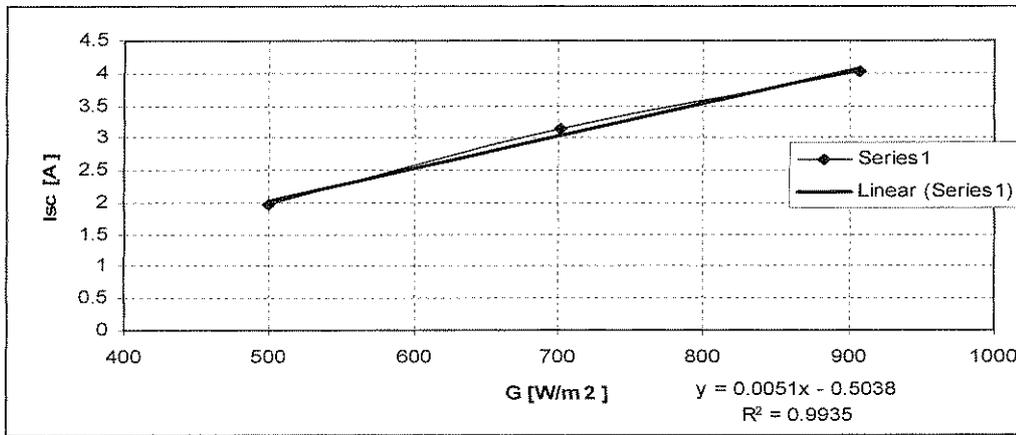
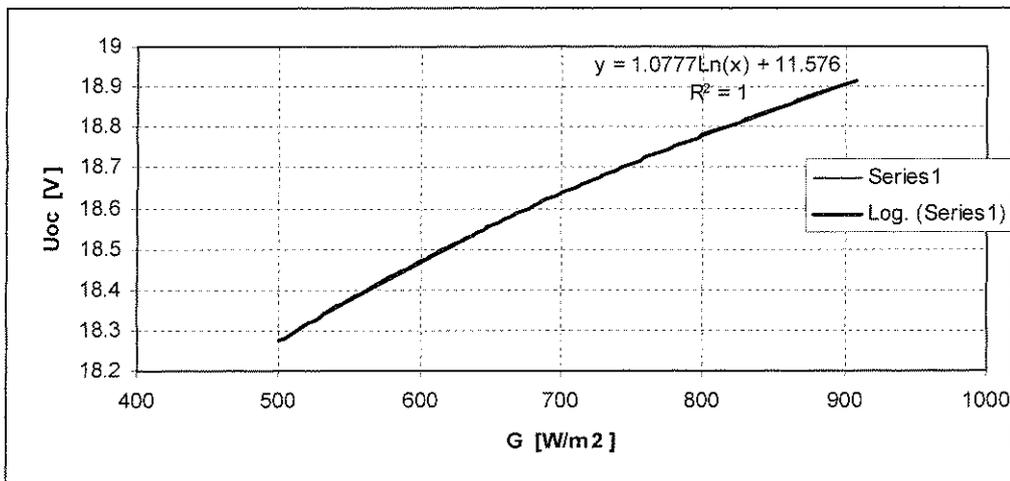


Figura 24. Gráficos das curva P-U fornecidas para diferentes irradiâncias

Olhando para as curvas de I_{sc} e U_{oc} em função da irradiância podemos observar que a I_{sc} aumentam linearmente com o aumento da irradiância, conseqüentemente a potência também aumenta, e U_{oc} tem um aumento logaritmico, com ilustrado na fig. 25 (a) e (b).



(a)



(b)

Figura 25. Relação gráfica de I_{sc} e U_{oc} com a irradiância

4.3. Análise do Efeito da Temperatura sobre a Curva Característica I-U

Nas tabelas 9 e 10 do anexo II estão apresentados os dados utilizados para este estudo. Foram seleccionados dados de duas curvas I-U correspondentes a duas temperaturas diferentes.

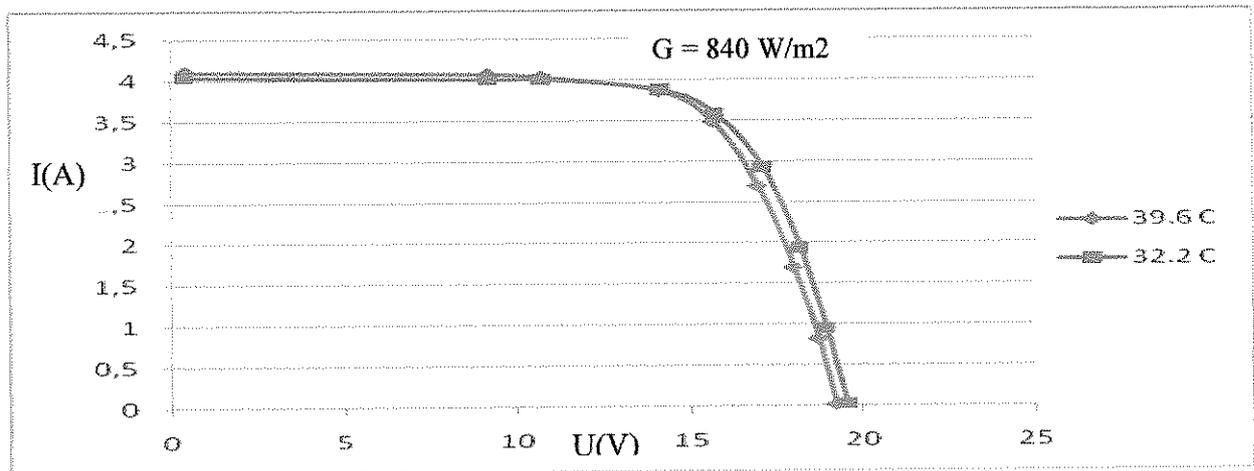


Figura 26. Gráfico de características I-U com Irradiância de 840W/m^2 e temperaturas diferentes

A curva característica observada nesta dependência mostra que com o aumento da temperatura à irradiância constante, ocorre um ligeiro aumento da I_{sc} e uma diminuição considerável da U_{oc} . O aumento da temperatura provoca a redução de E_g e disponibilidade de mais portadores de carga capazes de participar na geração de electricidade por um lado, e aumenta a taxa de recombinação por outro, diminuindo a voltagem de circuito aberto. A figura 26 ilustra esse efeito.

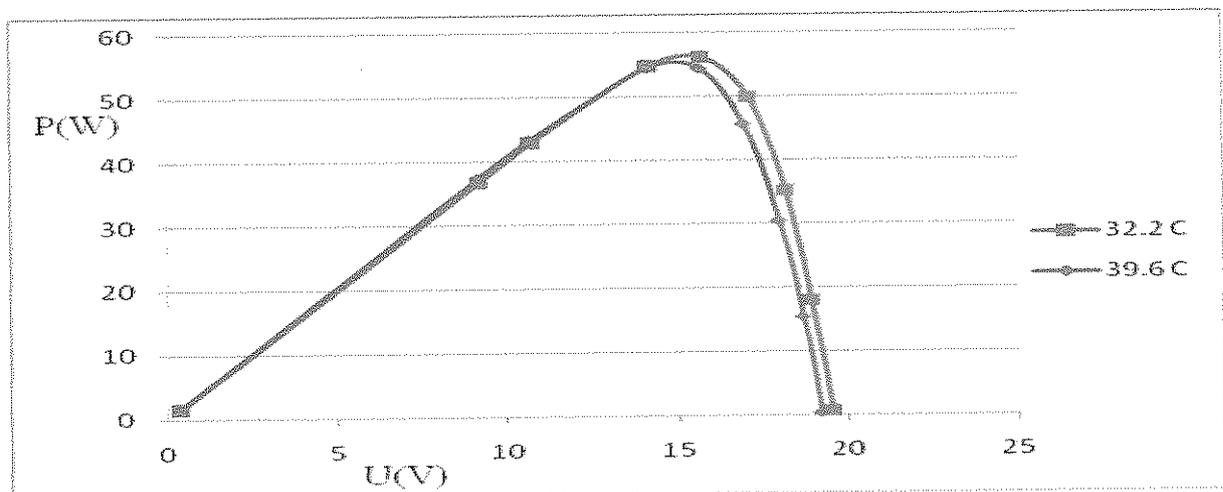


Figura 27. Gráficos das curva P-U fornecidos para diferentes temperaturas.

4.5. Sistemas instalados no local de estudo

Os sistemas de bombeamento de água verificados nos locais visitados (sistemas instalados na Escola 19 de Outubro no Bairro Magoanine CMC, Irmãs Dominicanas no Bairro Mahotas e na Associação Hipfunane no Bairro Tsalala) são sistemas constituídos por gerador fotovoltaico, controlador de carga, uma unidade motor/bomba e um reservatório para armazenamento de água.

A figura 28 caracteriza o estudo de caso, mostrando um esboço da instalação hidráulica, em sistemas fotovoltaicos verificados nos locais de estudo.

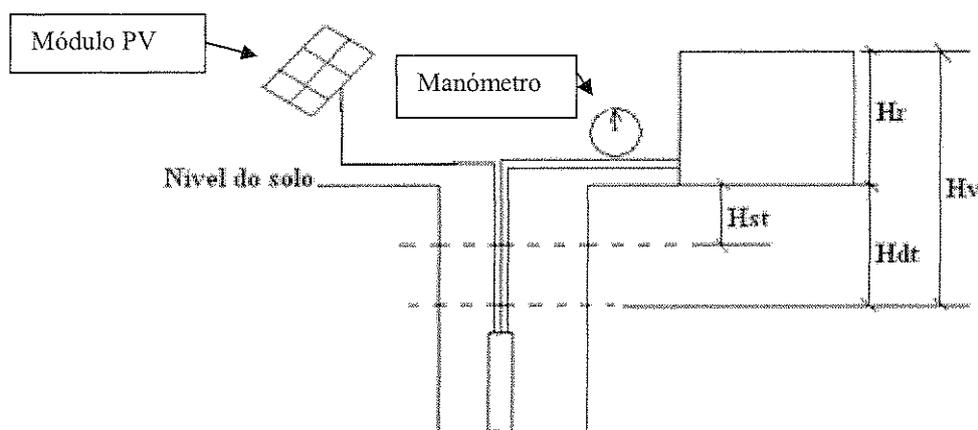


Figura 28. Esboço da instalação hidráulica em estudo.

A entrevista feita aos proprietários e/ou executores destes projectos (BLUE ZONE MOÇAMBIQUE LDA; HIDROAGUA; MOÇITALY LTD; FUNAE (Fundo Nacional de Energia)) mostrou que o primeiro passo na construção destes sistemas é a sondagem e , pelos resultados de sua análise, traça-se o perfil geológico do poço . Em seguida é estimada e vazão da água necessária por um dia solar de 11 horas de funcionamento opós ser feito o furo e obtidos os dados do caudal da água encontrada. Com os dados da vazão e a altura manométrica é feita a selecção da bomba e o motor que em seguida,atravezdos catálogos (ver a figura 1 do anexo I) é seleccionada a potência neessária para sustentar a vazão requerida. Com a aquisição do valor da potência, faz-se o dimensionamento do reservatório da água (tanque) e dos paineis solares. Os painéis solares nestes sistemas foram conectados em série. Os sistemas de Associação Hipfunane e das irmãs Dominicanas dispõem de controlador de carga manual, enquanto que o de Magoanine tem um controlador automático.

Para análise dos resultados da pesquisa foi usado o método qualitativo, que consiste na interpretação dos depoimentos das pessoas inquiridas.

No anexo III está apresentado o questionário utilizado na pesquisa feita aos utentes (cerca de 10 famílias compostas em média por 5 membros, para cada local) e anexo IV são apresentadas as imagens fotográficas dos respectivos sistemas.

Os resultados obtidos nesta análise mostram que os problemas encontrados são os mesmos para todos locais. Resumidamente, os resultados são apresentados nos ítems a baixo:

- Os sistemas abastecem água para cerca de 250 pessoas em média;
- O sistema das irmãs Dominicanas está em funcionamento desde o ano 2000, o seu motor é trifásico, tem 2 tanques de 10000 litros, a água é utilizada para o uso doméstico e regadio de horta; já para o sistema encontrado no bairro Tsalala está em funcionamento desde 2008, é de motor monofásico, o seu tanque é de 10000 litros, a água é utilizada para o uso doméstico e regadio de uma machamba de 6 hectares; e o sistema encontrado no bairro de Magoanine CMC funcionava desde 2007, tem motor monofásico, um tanque de 10000 litros, a água era utilizada para o uso doméstico.
- Os benefícios mais focalizados devido a instalação dos sistemas são: Despesas menores, Fonte de abastecimento de água a poucos metros, Água disponível de 24 a 24 horas.
- Antes da instalação destes sistemas a comunidade usava poços manuais (Magoanine CMC, Tsalala), e poço com bomba eléctrica (irmãs Dominicanas). Por isso que a satisfação dos beneficiários é maior.
- Houve treinamento da população para o uso dos sistemas e estes operam a todas as horas de brilho solar. Nas noites é usada a água do reservatório.
- Há falta de manutenção dos sistemas. O sistema encontrado na escola 19 de Outubro, apenas teve 2 anos e 6 meses de funcionamento, desde Janeiro de 2007 a Junho de 2010 e como ainda não foi feita a manutenção é difícil saber com exactidão de que problema se trata. Um outro problema encontrado foi de roubo dos componentes dos sistemas,

geralmente os painéis solares. Os sistemas de Tsalala e irmãs Dominicanas sofreram roubo.

- Os beneficiários solicitam a quem de direito para apostarem neste tipo de sistemas devido a minimização dos problemas por eles enfrentados, como redução de despesas, diminuição de distâncias percorridas para obtenção de água.

4.6. Exemplo de dimensionamento de um sistema fotovoltaico.

O exemplo apresentado nesta obra foi fornecido pela FUNAE. O presente sistema foi instalado na localidade de Panjane, Distrito de Magude em Maputo. Os dados do dimensionamento são:

Dados do furo:

- Caudal $1.0 \text{ m}^3/\text{h}$
- Profundidade 79 m

Dados do sistema solar montado no local:

- Bomba solar submersível SQFlex 2.5 – 2, capacidade da bomba até $1 \text{ m}^3/\text{h}$ para 85 m de elevação incluindo o prato para pousar a bomba;
- 14 painéis de 75 Wp, 24 V com os respectivos cabos de ligação, cujas perdas de capacidade são inferiores a 10% da capacidade nominal, num período de 10 anos;
- Cabos de imersão $3 \times 4 \text{ mm}^2$;
- Electrodo de comando (tem a função de comandar o funcionamento do conjunto motor-bomba);
- Quadro de comando da bomba CU 200 (este quadro é responsável pela interrupção do funcionamento da bomba para que esta não funcione em seco);
- Resina para ligação do cabo.

$$Q = \frac{9000}{9} = 1000 \frac{l}{dia} = 1,0 m^3/dia$$

Após a obtenção deste dado, selecciona-se o grupo motor - bomba para o sistema.

Realçar que este dimensionamento é simples comparado ao descrito na parte metodológica. Contudo, ele toma em consideração todos os parâmetros mencionados na metodologia. A Hidroágua faz dimensionamento de sistemas de bombeamento de água usando *software* fornecido pela Blue Zone Moçambique, LDT.

Capítulo V: Conclusão e Recomendações

Conclusão

O abastecimento de água potável no nosso país constitui um problema para uma grande parte da população. Uma das soluções deste problema é a geração autónoma de energia eléctrica, visto que o abastecimento de água está ligado ao acesso a energia e, sendo que, a rede convencional enfrenta dificuldades em cobrir a demanda solicitada pelo país.

No estudo feito durante a pesquisa, mostrou que a tecnologia de bombeamento de água a energia fotovoltaica já constitui uma realidade em Moçambique, sendo necessária a sua massificação e manutenção dos sistemas instalados.

Quanto a configuração de um sistema fotovoltaico de bombeamento de água, verificou-se que é importante fazer a selecção adequada dos componentes que constituem o sistema para permitir maior eficiência, maior rendimento e maior vida útil do mesmo. No entanto, esta configuração, depende de condições financeiras.

Os sistemas encontrados nos locais visitados, basicamente são idênticos. Encontram-se diferenças apenas nos componentes que os constituem, mas todos funcionam adequadamente e a tempo inteiro com a presença da radiação solar e conseguem abastecer água a toda a comunidade.

Quanto a análise dos factores que influenciam o bom funcionamento dos sistemas, a pesquisa demonstrou que a energia fotovoltaica varia com a temperatura, radiação e o sombreamento. Pode-se concluir que a corrente eléctrica gerada pelo módulo solar é directamente proporcional a radiação e sofre um ligeiro aumento com a temperatura. Este último factor é responsável pela diminuição da voltagem V_{oc} e da potência eléctrica.

Observou-se que para um módulo de 36 células solares, sombreado em apenas 5,5%, praticamente pára de produzir corrente eléctrica. Isso ajuda a concluir que ao instalar um sistema fotovoltaico, deve-se evitar a presença de árvores e/ou edifícios que possam projectar sombra sobre o sistema.

A metodologia do dimensionamento seleccionada no presente trabalho permite determinar todos os componentes de um sistema de bombeamento fotovoltaico. Observou-se que todos os componentes dependem um do outro, e para um melhor funcionamento do conjunto é necessária uma selecção criteriosa de cada constituinte.

Recomendações

Não obstante ao alto custo de investimento inicial, sugere-se ao Governo, ao Sector Privado, ONG's e outros actores sociais que apostem na aplicação da tecnologia solar fotovoltaica para a expansão da energia eléctrica e abastecimento de água potável nas zonas rurais, visto que com este investimento poder-se-á contribuir bastante para o desenvolvimento do país e reduzir impactos ambientais por longos anos.

Os sistemas encontrados na área de estudo têm falta de manutenção. Sugiro que os investidores deste tipo de projectos contemplem a componente de manutenção sistemática desses dispositivos de modo a existir uma recompensa real dos investimentos aplicados, pois não faz sentido que sistemas caros e capazes de funcionar durante mais de 20 anos, operem apenas em três anos por causa de avarias perfeitamente evitáveis.

Uma alternativa para este caso, seria a adopção de pagamento de taxas de utilização por parte dos beneficiários para que exista um fundo local para custear as manutenções.

Para uma nova pesquisa sugiro que seja feita sobre a comparação económica financeira dos sistemas fotovoltaicos com outras formas de energia para apurar as vantagens do uso da energia fotovoltaica.

- [10] – Tomás Perpetuo Corrêa. (2008). *Desenvolvimento de um Sistema de Bombeamento Fotovoltaico com Maximização das Eficiências do Arranjo Fotovoltaico e do Motor Elétrico*. Desenvolvimento de um Sistema de Bombeamento Fotovoltaico com..., Belo Horizonte. www.cpdee.ufmg.br/documentos/Defesas/765/DissTPCFINAL.pdf. Cedido em 12, janeiro, 2011.
- [11] – Sérgio de Salvo Brito. *Energia solar princípio e aplicações*. www.cresesb.cepel.br/principal.php. Centro de Referência para Energia Solar e Eólica. Acedido em: 29, julho, 2010.
- [12] – BAimé Fleury de Carvalho Pinto Neto. IBMarcelo Pinho Almeida. BWilson Negrão Macêdo. 3BJoão Tavares Pinho. (2008). *Desenvolvimento de um controlador de carga do tipo On/off*. Desenvolvimento de um controlador de carga do tipo on/off. www.ufpa.br/gedae/HICBENS_03.pdf. Cedido em 13, novembro, 2010.
- [13] – John Wiley & Sons LTD. Editado por Tomas Markvar. (2000). *Solar Electricity*. Second Edition. University of Southampton, UK.
- [14] – Archibald Joseph Macintyre. *Bombas e Instalações de bombeamento*. 2ª edição revista.
- [15] – Prof. Luiz Ferraz Netto. (2009). *Motores elétricos*. <http://www.feiradeciencias.com.br>, quinta-feira, 31 de dezembro. Cedido em: 13, janeiro, 2011.
- [16] - Prof. Msc. Luís Miranda J. Rodrigues. *Mecânica dos Fluidos*. Definição de Mecânica dos Fluidos, Conceitos Fundamentais e Sistema Internacional . <http://www.engbrasil.eng.br/pp/mf/mef.pdf>. Cedido em: 13, janeiro, 2011.
- [17] - Prof. MSc. Luiz Eduardo Miranda J. Rodrigues. *Mecânica dos fluidos*. aula 17 – bombas hidráulicas. Mecânica dos fluidos. <http://www.engbrasil.eng.br/pp/mf/mef.pdf>. Cedido em: 13, janeiro, 2011.
- [18] – Aymoré de C Alvim Filho. Carlos B Martinez. Selênio R Silva. *Dimensionamento de sistemas fotovoltaicos para bombeamento de água*. www.les.ufpb.br/porta1/index2.php?option=com. Cedido em: 8, janeiro, 2011.

- [19] - Manual técnico. *Perdas de carga(hf), N° de Reynolds(Re), Velocidade do escoamento (V), Diâmetro dos tubos e altura manométrica total (AMT)*. Cálculo de perdas de carga. http://www.irricomrio.com.br/calculos_hidraulicos/Calculodeperdasdecarga.pdf. acessado em 2, janeiro, 2011.
- [20] – Afonso Camacho. (2005). *Grundfos sistemas de pressurização*. Manual Engenharia Sist Pressurização.qxd <http://afonsocamacho.pt/intranet/orcamentos/grundfospressurizacao.pdf>. acessado em: 21, janeiro, 2011.
- [21] – Teddy Arturo Flores Melendez. (2009). *Avaliação de sistemas fotovoltaicos de bombeamento*. Universidade de são paulo usp programa de pós-graduação em energia http://www.iee.usp.br/biblioteca/producao/2009/Teses/Dissertacao_Teddy_Arturo_Flores_Melendez_2009.pdf, acessado em: 21, janeiro, 2011.

Dimensionamento de um Sistema Fotovoltaico para Bombeamento de Água

Tabela 2. Dados de I,U,P do módulo 1.

Numero	I _A	I _V	P _V	Numero	I _A	I _V	P _V
1	18,904	0	0	49	16,396	2,474	40,5637
2	18,844	0,066	1,243704	50	16,311	2,522	41,13634
3	18,807	0,121	2,275647	51	16,214	2,573	41,71862
4	18,771	0,172	3,228612	52	16,117	2,624	42,29101
5	18,722	0,223	4,175006	53	16,008	2,675	42,8214
6	18,686	0,274	5,119964	54	15,887	2,726	43,30796
7	18,65	0,326	6,0799	55	15,753	2,777	43,74608
8	18,601	0,377	7,012577	56	15,62	2,829	44,18898
9	18,565	0,432	8,02008	57	15,463	2,88	44,53344
10	18,516	0,483	8,943228	58	15,293	2,931	44,82378
11	18,48	0,534	9,86832	59	15,099	2,978	44,96482
12	18,432	0,585	10,78272	60	14,881	3,029	45,07455
13	18,395	0,636	11,69922	61	14,59	3,081	44,95179
14	18,347	0,687	12,60439	62	14,275	3,132	44,7093
15	18,31	0,739	13,53109	63	13,984	3,183	44,51107
16	18,262	0,79	14,42698	64	13,669	3,234	44,20555
17	18,213	0,841	15,31713	65	13,124	3,285	43,11234
18	18,177	0,892	16,21388	66	12,409	3,336	41,39642
19	18,129	0,943	17,09565	67	11,391	3,384	38,54714
20	18,08	0,994	17,97152	68	9,779	3,435	33,59087
21	18,032	1,045	18,84344	69	8,507	3,486	29,6554
22	17,995	1,097	19,74052	70	6,871	3,537	24,30273
23	17,947	1,148	20,60316	71	6,762	3,589	24,26882
24	17,898	1,199	21,4597	72	6,677	3,64	24,30428
25	17,85	1,25	22,3125	73	6,604	3,691	24,37536
26	17,801	1,301	23,1591	74	6,531	3,738	24,41288
27	17,753	1,352	24,00206	75	6,446	3,789	24,42389
28	17,704	1,404	24,85642	76	6,362	3,841	24,43644
29	17,656	1,455	25,68948	77	6,265	3,892	24,38338
30	17,607	1,506	26,51614	78	6,168	3,943	24,32042
31	17,547	1,557	27,32068	79	6,047	3,994	24,15172
32	17,498	1,608	28,13678	80	5,913	4,045	23,91809
33	17,438	1,659	28,92964	81	5,756	4,093	23,55931
34	17,389	1,71	29,73519	82	5,55	4,144	22,9992
35	17,329	1,762	30,5337	83	5,259	4,195	22,06151
36	17,28	1,813	31,32864	84	4,786	4,246	20,32136
37	17,22	1,864	32,09808	85	4,144	4,297	17,80677
38	17,159	1,911	32,79085	86	3,356	4,349	14,59524
39	17,098	1,963	33,56337	87	2,338	4,4	10,2872
40	17,038	2,014	34,31453	88	0,969	4,447	4,309143
41	16,977	2,065	35,05751	89	0,412	4,455	1,83546
42	16,917	2,116	35,79637	90	0,412	4,455	1,83546
43	16,844	2,167	36,50095	91	0,412	4,455	1,83546
44	16,783	2,218	37,22469	92	0,412	4,455	1,83546
45	16,711	2,269	37,91726	93	0,412	4,455	1,83546
46	16,638	2,321	38,6168	94	0,412	4,455	1,83546
47	16,565	2,372	39,29218	95	0,412	4,455	1,83546
48	16,48	2,423	39,93104	96	0,412	4,455	1,83546

Dimensionamento de um Sistema Fotovoltaico para Bombeamento de Água

Tabela 3. Dados de I,U,P do módulo 2

Numero	I _v	I _a	P _v	Numero	I _v	I _a	P _v
1	18,686	0	0	53	16,808	2,109	35,44807
2	18,638	0,055	1,02509	54	16,759	2,153	36,08213
3	18,601	0,099	1,841499	55	16,711	2,196	36,69736
4	18,565	0,143	2,654795	56	16,662	2,24	37,32288
5	18,541	0,19	3,52279	57	16,602	2,288	37,98538
6	18,504	0,234	4,329936	58	16,553	2,332	38,6016
7	18,468	0,282	5,207976	59	16,493	2,375	39,17088
8	18,432	0,326	6,008832	60	16,444	2,419	39,77804
9	18,395	0,369	6,787755	61	16,384	2,463	40,35379
10	18,359	0,413	7,582267	62	16,323	2,507	40,92176
11	18,335	0,461	8,452435	63	16,262	2,551	41,48436
12	18,298	0,505	9,24049	64	16,202	2,595	42,04419
13	18,262	0,549	10,02584	65	16,141	2,639	42,5961
14	18,225	0,596	10,8621	66	16,081	2,686	43,19357
15	18,189	0,64	11,64096	67	16,008	2,73	43,70184
16	18,153	0,684	12,41665	68	15,947	2,774	44,23698
17	18,116	0,728	13,18845	69	15,875	2,818	44,73575
18	18,080	0,775	14,012	70	15,802	2,861	45,20952
19	18,044	0,819	14,77804	71	15,729	2,905	45,69275
20	18,007	0,863	15,54004	72	15,656	2,949	46,16954
21	17,971	0,907	16,2997	73	15,572	2,993	46,607
22	17,935	0,954	17,10999	74	15,487	3,04	47,08048
23	17,898	0,998	17,8622	75	15,402	3,084	47,49977
24	17,862	1,042	18,6122	76	15,317	3,128	47,91158
25	17,813	1,086	19,34492	77	15,220	3,172	48,27784
26	17,777	1,129	20,07023	78	15,123	3,216	48,63557
27	17,741	1,177	20,88116	79	15,026	3,26	48,98476
28	17,704	1,221	21,61658	80	14,917	3,304	49,28577
29	17,656	1,265	22,33484	81	14,796	3,347	49,52221
30	17,620	1,309	23,06458	82	14,687	3,391	49,80362
31	17,583	1,352	23,77222	83	14,554	3,439	50,05121
32	17,535	1,4	24,549	84	14,408	3,479	50,12543
33	17,498	1,444	25,26711	85	14,263	3,526	50,29134
34	17,450	1,488	25,9656	86	14,093	3,57	50,31201
35	17,414	1,531	26,66083	87	13,911	3,614	50,27435
36	17,365	1,575	27,34988	88	13,693	3,658	50,08899
37	17,329	1,619	28,05565	89	13,451	3,702	49,7956
38	17,280	1,667	28,80576	90	13,160	3,746	49,29736
39	17,244	1,71	29,48724	91	12,772	3,789	48,39311
40	17,195	1,754	30,16003	92	11,669	3,833	44,72728
41	17,147	1,798	30,83031	93	7,077	3,877	27,43753
42	17,098	1,842	31,49452	94	0,399	3,866	1,542534
43	17,062	1,886	32,17893	95	0,315	3,866	1,21779
44	17,014	1,93	32,83702	96	0,315	3,866	1,21779
45	16,965	1,977	33,53981	97	0,302	3,866	1,167532
46	16,917	2,021	34,18926	98	0,302	3,866	1,167532
47	16,868	2,065	34,83242	99	0,302	3,866	1,167532
48	16,808	2,109	35,44807	100	0,302	3,866	1,167532
49	16,759	2,153	36,08213	101	0,302	3,866	1,167532
				102	0,302	3,866	1,167532

Dimensionamento de um Sistema Fotovoltaico para Bombeamento de Água

Tabela 5. Dados de I,U,P da ligação em paralelo dos módulos 1 e 2.

Numero	I _v	J _v	P _v	Numero	I _v	J _v	P _v
1	18,662	0	0	47	16,553	4,721	78,14671
2	18,638	0,066	1,230108	48	16,493	4,824	79,56223
3	18,601	0,172	3,199372	49	16,432	4,926	80,94403
4	18,553	0,274	5,083522	50	16,359	5,032	82,31849
5	18,516	0,38	7,03608	51	16,299	5,134	83,67907
6	18,48	0,483	8,92584	52	16,226	5,236	84,95934
7	18,444	0,589	10,86352	53	16,165	5,339	86,30494
8	18,407	0,691	12,71924	54	16,093	5,441	87,56201
9	18,359	0,797	14,63212	55	16,02	5,547	88,86294
10	18,322	0,899	16,47148	56	15,935	5,649	90,01682
11	18,286	1,005	18,37743	57	15,862	5,752	91,23822
12	18,238	1,108	20,2077	58	15,778	5,854	92,36441
13	18,201	1,214	22,09601	59	15,693	5,956	93,46751
14	18,153	1,316	23,88935	60	15,608	6,059	94,56887
15	18,116	1,418	25,68849	61	15,511	6,161	95,56327
16	18,08	1,524	27,55392	62	15,414	6,267	96,59954
17	18,032	1,626	29,32003	63	15,317	6,369	97,55397
18	17,995	1,729	31,11336	64	15,208	6,471	98,41097
19	17,947	1,831	32,86096	65	15,099	6,574	99,26083
20	17,91	1,937	34,69167	66	14,978	6,676	99,99313
21	17,862	2,039	36,42062	67	14,844	6,778	100,6126
22	17,826	2,142	38,18329	68	14,711	6,881	101,2264
23	17,777	2,248	39,9627	69	14,566	6,987	101,7726
24	17,729	2,35	41,66315	70	14,408	7,089	102,1383
25	17,692	2,452	43,38078	71	14,239	7,191	102,3926
26	17,644	2,558	45,13335	72	14,057	7,294	102,5318
27	17,595	2,66	46,8027	73	13,851	7,396	102,442
28	17,547	2,763	48,48236	74	13,621	7,498	102,1303
29	17,498	2,865	50,13177	75	13,354	7,604	101,5438
30	17,45	2,971	51,84395	76	13,051	7,706	100,571
31	17,414	3,073	53,51322	77	12,663	7,809	98,88537
32	17,353	3,176	55,11313	78	12,154	7,911	96,15029
33	17,317	3,278	56,76513	79	11,1	8,013	88,9443
34	17,256	3,384	58,3943	80	9,549	8,116	77,49968
35	17,208	3,486	59,98709	81	7,295	8,218	59,95031
36	17,159	3,589	61,58365	82	6,362	8,32	52,93184
37	17,111	3,691	63,1567	83	6,156	8,423	51,85199
38	17,062	3,793	64,71617	84	5,925	8,529	50,53433
39	17,002	3,899	66,2908	85	5,622	8,631	48,52348
40	16,953	4,001	67,82895	86	5,138	8,733	44,87015
41	16,892	4,104	69,32477	87	4,168	8,836	36,82845
42	16,844	4,206	70,84586	88	2,532	8,938	22,63102
43	16,783	4,308	72,30116	89	0,799	8,993	7,185407
44	16,735	4,414	73,86829	90	0,787	8,993	7,077491
45	16,674	4,517	75,31646	91	0,787	8,993	7,077491
46	16,614	4,619	76,74007	92	0,787	8,993	7,077491

Dimensionamento de um Sistema Fotovoltaico para Bombeamento de Água

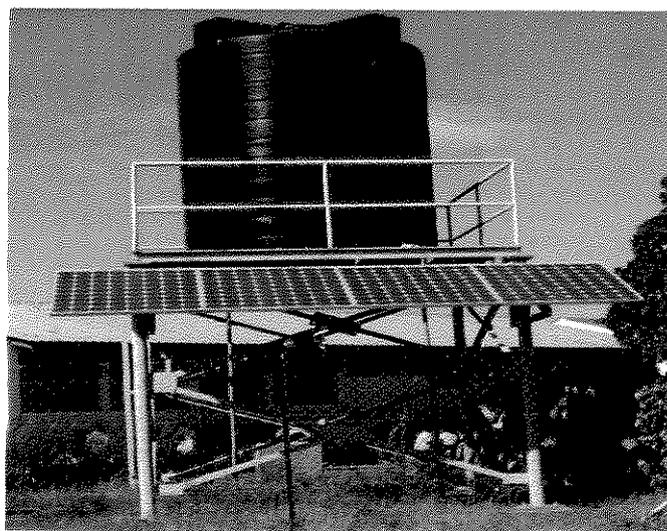
Tabela 8. Dados de I,U,P do módulo 2 para análise do efeito da irradiância ($G = 500 \text{ W/m}^2$).

Numero	I, V	I, A	P, W	Numero	I, V	I, A	P, W
1	18,274	0	0	47	16,917	1,049	17,74593
2	18,262	0,004	0,073048	48	16,88	1,071	18,07848
3	18,225	0,033	0,601425	49	16,844	1,093	18,41049
4	18,201	0,059	1,073859	50	16,808	1,115	18,74092
5	18,177	0,081	1,472337	51	16,759	1,14	19,10526
6	18,153	0,106	1,924218	52	16,723	1,162	19,43213
7	18,129	0,128	2,320512	53	16,674	1,184	19,74202
8	18,104	0,154	2,788016	54	16,638	1,206	20,06543
9	18,08	0,176	3,18208	55	16,59	1,232	20,43888
10	18,056	0,201	3,629256	56	16,541	1,254	20,74241
11	18,032	0,223	4,021136	57	16,493	1,276	21,04507
12	18,007	0,245	4,411715	58	16,444	1,298	21,34431
13	17,983	0,271	4,873393	59	16,396	1,319	21,62632
14	17,959	0,293	5,261987	60	16,347	1,341	21,92133
15	17,923	0,315	5,645745	61	16,299	1,367	22,28073
16	17,898	0,34	6,08532	62	16,238	1,389	22,55458
17	17,874	0,362	6,470388	63	16,19	1,411	22,84409
18	17,85	0,384	6,8544	64	16,129	1,433	23,11286
19	17,826	0,41	7,30866	65	16,068	1,455	23,37894
20	17,789	0,432	7,684848	66	16,008	1,48	23,69184
21	17,765	0,454	8,06531	67	15,947	1,502	23,95239
22	17,741	0,475	8,426975	68	15,887	1,524	24,21179
23	17,704	0,501	8,869704	69	15,814	1,546	24,44844
24	17,68	0,523	9,24664	70	15,741	1,568	24,68189
25	17,656	0,545	9,62252	71	15,669	1,594	24,97639
26	17,62	0,57	10,0434	72	15,584	1,615	25,16816
27	17,595	0,592	10,41624	73	15,511	1,637	25,39151
28	17,571	0,614	10,78859	74	15,414	1,659	25,57183
29	17,535	0,636	11,15226	75	15,329	1,681	25,76805
30	17,511	0,662	11,59228	76	15,232	1,707	26,00102
31	17,474	0,684	11,95222	77	15,123	1,729	26,14767
32	17,438	0,706	12,31123	78	15,014	1,751	26,28951
33	17,414	0,728	12,67739	79	14,893	1,773	26,40529
34	17,377	0,753	13,08488	80	14,772	1,794	26,50097
35	17,353	0,775	13,44858	81	14,626	1,816	26,56082
36	17,317	0,797	13,80165	82	14,469	1,842	26,6519
37	17,28	0,819	14,15232	83	14,287	1,864	26,63097
38	17,244	0,844	14,55394	84	14,069	1,886	26,53413
39	17,22	0,866	14,91252	85	13,802	1,908	26,33422
40	17,183	0,888	15,2585	86	13,051	1,93	25,18843
41	17,147	0,91	15,60377	87	10,409	1,955	20,3496
42	17,111	0,936	16,0159	88	6,289	1,977	12,43335
43	17,074	0,958	16,35689	89	0,872	1,999	1,743128
44	17,038	0,98	16,69724	90	0,157	1,974	0,309918
45	17,002	1,002	17,036	91	0,157	1,974	0,309918
46	16,965	1,027	17,42306	92	0,145	1,974	0,28623

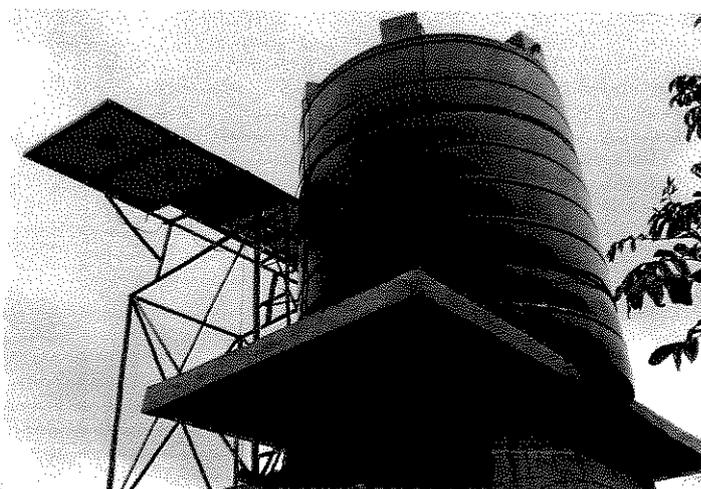
ANEXO IV

Imagens Fotográficas dos Sistemas Encontrados nos Locais de Estudo

Magoanine CMC



Associação Hipfunane no Bairro Tsalala



Para o sistema das irmãs Dominicanas não foi possível a obtenção da imagem fotográfica.