



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE

FACULDADE DE ENGENHARIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Energias Renováveis

**Estudo de Dimensionamento
Simplificado de Sistema de
Bombeamento Fotovoltaico**

Discente: Gujamo, Wilson Manuel Carlos

Docentes: Prof. Dr. Boaventura Chongo Cuamba
Engº Garrine, Freitas

Maputo, 03 de Julho de 2006



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE

FACULDADE DE ENGENHARIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Energias Renováveis

**Estudo de Dimensionamento
Simplificado de Sistema de
Bombeamento Fotovoltaico**

Discente: Gujamo, Wilson Manuel Carlos

Docentes: Prof. Dr. Boaventura Chongo Cuamba
Engº Garrine, Freitas

Maputo, 03 de Julho de 2006

INDICE

1. INTRODUÇÃO	3
1.2 OBJECTIVOS	3
1.3 METODOLOGIA USADA	4
2. INTRODUÇÃO ÀS ENERGIAS RENOVÁVEIS	5
2.1 O CONCEITO DE ENERGIA	5
2.2 CLASSIFICAÇÃO DE ENERGIA	6
2.2.1 <i>Classificação das energias renováveis</i>	7
2.2.2 <i>Benefícios na utilização das energias renováveis</i>	9
2.2.3 <i>Condições de aplicação das energias renováveis</i>	10
2.3 RECURSOS ENERGÉTICOS RENOVÁVEIS EM MOÇAMBIQUE	11
3. RADIAÇÃO SOLAR	13
3.1 O ESPECTRO SOLAR	14
3.2 COMPONENTES DA RADIAÇÃO	16
3.2.1 <i>Radiação directa (G_b)</i>	17
3.2.2 <i>Radiação difusa</i>	17
3.2.3 <i>Radiação total (G_t)</i>	18
3.3 INTENSIDADE DA RADIAÇÃO	18
3.4 GEOMETRIA DO SOL E DA TERRA	18
3.5 INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR	20
3.5.1 <i>Classificação dos instrumentos de medição da radiação</i>	20
4. ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA	24
4.1 HISTÓRIA DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA	24
4.2 EFEITO FOTOVOLTAICO	25
4.3 TIPOS DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS	27
4.3.1 <i>Silício Monocristalino</i>	27
4.3.2 <i>Silício Policristalino</i>	29
4.3.3 <i>Silício Amorfo</i>	29
4.4 <i>Módulos fotovoltaicos</i>	30
4.5 CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS	33
4.6 <i>Fatores que afectam as características eléctricas dos módulos</i>	35
4.7 COMPONENTES DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO	36
4.7.1 <i>Sistemas Isolados</i>	37
4.7.2 <i>Sistemas Híbridos</i>	38
4.7.3 <i>Sistemas Interligados à Rede</i>	39
4.8 DESCRIÇÃO ELÉCTRICA	40
4.8.1 <i>Gerador Fotovoltaico Ideal</i>	40
4.8.2 <i>Gerador Fotovoltaico Real</i>	44
4.8.3 <i>Efeitos dos aparelhos de medida na determinação de I_e e V</i>	46
5. DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA ELÉCTRICO SOLAR	46
5.1 GENERALIDADES	46
5.1.1 <i>Determinação do consumo para sistema eléctrico solar</i>	48
5.1.2 <i>Energia produzida por um módulo</i>	48
5.1.3 <i>Determinação do número de módulos necessários</i>	49
5.1.4 <i>Determinação do número de baterias</i>	49
5.2 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA SOLAR PARA BOMBAMENTO DE ÁGUA	51
5.2.1 <i>Metodologia usada para o cálculo de dimensionamento</i>	51

6. CONCLUSÃO	58
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59
ANEXOS	60

1. INTRODUÇÃO

O presente trabalho foi realizado no âmbito da frequência da disciplina "energias Renováveis" em seguimento da formação em Engenharia Mecânica.

As fontes renováveis de energia ocupam uma posição de particular importância como resultado de a sua existência ser inesgotável. Com a diminuição das quantidades de combustíveis fósseis na terra, é previsível que no futuro, as energias renováveis serão uma fonte de energia muito explorada. Neste trabalho são caracterizadas as principais fontes de energias renováveis e explicam-se as condições para a sua aplicação. Porém, apresenta-se um estudo mais profundo sobre a radiação solar, uma das fontes energéticas mais conhecidas e exploradas. Esta abordagem é feita com a finalidade de expor os fundamentos principais sobre a radiação solar, que servem de base para a realização de cálculos com vista o seu aproveitamento.

Para além da apresentação dos princípios de dimensionamento de abastecimento energético fotovoltaico para iluminação, o objectivo principal do trabalho é materializado no último capítulo com a realização dos cálculos de dimensionamento de painéis solares para produção de energia necessária para o funcionamento de uma unidade de bombeamento de água para alimentação de uma aldeia, numa zona sem acesso a energia eléctrica.

1.2 Objectivos

Neste trabalho pretende-se:

- Avaliar os recursos de energias renováveis.
- Estudo das condições de aproveitamento da energias renováveis.
- Dimensionamento de uma instalação fotovoltaica para bombeamento de água.

1.3 Metodologia usada

Para a realização deste trabalho foi feito um estudo sobre as tecnologias para aproveitamento de diferentes fontes renováveis de energia. Isto, conseguiu-se com recurso a diversas fontes de informação entre as quais a Internet.

Seguidamente fez-se uma pesquisa bibliográfica sobre sistemas de geração de energia a partir da radiação solar, e elaborou-se o algoritmo de cálculo numa folha de cálculo em Excel, na qual foram feitas diversas simulações até a obtenção dos resultados apresentados.

2. INTRODUÇÃO ÀS ENERGIAS RENOVÁVEIS

O termo energia é aplicado em diferentes contextos, desde os mais antigos tempos. O conhecimento sobre o conceito de energia foi evoluindo ao longo dos anos e, actualmente, investigações neste ramo continuam a merecer uma atenção especial por parte de universidades e de governos, devido ao aumento da necessidade de consumo de energia nas suas diferentes formas de apresentação, em várias esferas de exploração.

A energia é a potência dispendida para realizar um determinado trabalho, durante um determinado período de tempo.

As transformações químicas que ocorrem no cozimento de alimentos, na produção de utensílios cerâmicos, de metais como ferro e ligas metálicas como bronze, só foram possíveis com a energia liberada nas combustões. Portanto, a energia é sem dúvida uma necessidade indispensável para a humanidade.

A energia pode apresentar-se na forma mecânica, térmica, química e eléctrica. Com o evoluir dos tempos, paralelamente ao desenvolvimento científico, foram sendo descobertas diferentes formas e fontes de energia.

2.1 O conceito de energia

O termo energia representa um conceito introduzido no século XIX para permitir uma abordagem científica unificada de vários fenómenos relacionados, envolvendo trabalho, calor e temperatura [8]. A energia é uma propriedade da matéria, e pode apresentar-se de diversas formas através das transformações governadas pela lei de conservação da energia, segundo a qual a energia pode ser convertida de uma forma para outra porém não pode ser criada nem destruída.

Uma das principais consequências da lei da conservação de energia é o teorema de trabalho-energia, que afirma que a diferença ou a variação de energias de um sistema entre dois estados diferentes é igual ao trabalho realizado pelo sistema entre esses dois estados [4]. Portanto, a energia é também definida como sendo a capacidade que um sistema tem de realizar trabalho. Portanto, a realização de uma trabalho pressupõe o consumo de uma determinada energia o que leva a considerar que o trabalho se realiza transmitindo energia de um lugar para outro.

Esta propriedade de a energia poder ser utilizada para a realização de trabalho confere-lhe um atributo sócio-económico, na medida em que ela pode ser usada para a produção de bens e serviços. Destas considerações deriva a propriedade de recurso que é atribuída à energia. Diz-se, por exemplo, que o carvão é um recurso energético, significando isso que este mineral possui uma propriedade que pode ser convertida de uma forma noutra, através da combustão, e com isso ser usado na realização de trabalho, ou seja na produção de bens e serviços [1].

2.2 Classificação de energia

A natureza apresenta diferentes fontes de energia que podem ser exploradas em diferentes actividades da vida humana.

Para fins práticos, as fontes de energia subdividem-se em duas classes especificamente energias não renováveis e energias renováveis [4].

ENERGIAS RENOVÁVEIS

As energias renováveis são provenientes de ciclos naturais de conversão da radiação solar, que é a fonte primária de quase toda energia disponível na terra. Por isso, são praticamente inesgotáveis e não alteram o balanço térmico do planeta [4].

As **energias renováveis** podem também ser definidas como sendo todas as formas de energia para as quais a fonte é "recarregável" por processos naturais [8].

ENERGIAS NÃO RENOVÁVEIS

As energias não renováveis são tidas como sendo toda a energia obtida de fontes estáticas de energia que permanecem a não ser quando usadas pelo homem [4]. Por outras palavras, as energias não renováveis são aquelas cuja fonte não é renovável quer a curto, médio ou longo prazo. São exemplos de energias não renováveis as seguintes a energia proveniente de combustíveis fósseis, as energias eléctrica e nuclear.

As energias não renováveis são inicialmente um potencial de energia isolado sendo necessária uma acção externa para garantir o seu fornecimento para fins práticos.

Como resultado do crescimento exponencial do consumo das fontes de energia não renováveis, estas tendem a desaparecer, facto que remete a necessidade de identificação de outras fontes energéticas.

2.2.1 Classificação das energias renováveis

Existem diferentes formas ou manifestações de energias renováveis e, as mais conhecidas são: a energia solar, a energia eólica, a biomassa e a hidroenergia e a energia geotérmica.

Energia Solar

A energia solar é a energia irradiada pelo sol. o termo "Energia Solar" é utilizado para expressar as formas de aproveitamento da **radiação solar directa**. A energia da radiação solar directa, pode ser aproveitada de diversas formas através de diversos

tipos de conversão, permitindo seu uso em aplicações térmicas em geral, obtenção de força motriz diversa, obtenção de electricidade e de energia química [8].

Energia Eólica

A energia eólica é a energia cinética dos deslocamentos de massas de ar, gerados pelas diferenças de temperatura na superfície do planeta. Sendo resultado da associação da radiação solar incidente no planeta com o movimento de rotação da terra, fenómenos naturais que se repetem, é considerada energia renovável. Além da radiação solar também têm participação na sua formação fenómenos geofísicos como: rotação da terra, marés atmosféricas e outros [8].

São exemplos de aproveitamento da energia eólica os cata-ventos e embarcações a vela, formas bastante antigas de seu aproveitamento.

Biomassa

A energia química, produzida pelas plantas na forma de hidratos de carbono através da fotossíntese - processo que utiliza a radiação solar como fonte energética - é distribuída e armazenada nos corpos dos seres vivos graças a grande cadeia alimentar, onde a base primária são os vegetais. Plantas, animais e seus derivados são biomassa. Sua utilização como combustível pode ser feita das suas formas primárias ou derivados: madeira bruta, resíduos florestais, excrementos animais, carvão vegetal, álcool, óleos animal ou vegetal, gaseificação de madeira, biogás etc [8].

A renovação na biomassa se dá através do chamado ciclo do carbono. A decomposição ou a queima da matéria orgânica ou de seus derivados provoca a liberação de CO² na atmosfera. As plantas, através da fotossíntese, transformam o CO₂ e água nos hidratos de carbono, que compõe sua massa viva, liberando oxigênio.

Desta forma a utilização da biomassa, desde que não seja de maneira predatória, não altera a composição média da atmosfera ao longo do tempo [8].

Hidroenergia

A hidroenergia é a energia cinética das massas de água dos rios, que fluem de altitudes elevadas para os mares e oceanos graças a força gravitacional. Este fluxo é alimentado em ciclo reverso graças a evaporação da água, elevação e transporte do vapor em forma de nuvens, naturalmente realizados pela radiação solar e pelos ventos [8].

A Hidroenergia, aproveitamento das quedas de água, tem a energia solar como fonte de renovação. O ciclo se dá através da evaporação da água dos rios, lagos, mares e oceanos, pela radiação solar direta e os ventos. O vapor d'água mistura-se com o ar atmosférico e sobe até formar as nuvens. Boa parte dessas nuvens é transportada pelos ventos até regiões de maior altitude. Através da chuva, a água é devolvida ao solo, passando a alimentar os rios em seus fluxos descendentes. A retenção temporária da água e liberação gradativa pelo solo e vegetação tem papel importante: o de perenização dos rios, funcionando como um regulador natural e garantindo uma certa estabilidade de vazão. Secundariamente, os Lagos também contribuem para esse controle. A hidroenergia também pode ser vista como forma de energia potencial; volume de água armazenada nas barragens rio acima. As grandes hidroeléctricas se valem das barragens para compensar as variações sazonais do fluxo dos rios e, através do controle por comportas, permitir a modulação da potência instantânea gerada nas turbinas [8].

2.2.2 Benefícios na utilização das energias renováveis

A energia solar recebida pela terra a cada ano é dez vezes superior a contida em toda a reserva de combustíveis fósseis. Mas, actualmente a maior parte da energia utilizada pela humanidade provém de combustíveis fósseis (Petróleo, carvão mineral, xisto, etc).

A vida moderna tem sido movida a custo de recursos esgotáveis que levaram milhões de anos para se formar. O uso desses combustíveis em larga escala tem mudado substancialmente a composição da atmosfera e o balanço térmico do Planeta provocando o aquecimento global, de gelo nos pólos, chuvas ácidas e envenenamento da atmosfera e todo meio-ambiente. As previsões dos efeitos decorrentes para um futuro próximo, são catastróficas. Alternativas como a energia nuclear, que eram apontadas como solução definitiva, já mostraram que só podem piorar a situação [8].

A utilização das energias renováveis em substituição dos combustíveis fósseis é uma direcção viável e vantajosa. Pois, além de serem praticamente inesgotáveis, as energias renováveis podem apresentar impacto ambiental muito baixo ou quase nulo, sem afectar o balanço térmico ou composição atmosférica do planeta.

Graças aos diversos tipos de manifestação, disponibilidade de larga abrangência geográfica e variadas possibilidades de conversão, as energias renováveis são bastante próprias para geração distribuída e ou autónoma [8]. O desenvolvimento das tecnologias para o aproveitamento das fontes renováveis de energia poderão beneficiar comunidades rurais e regiões afastadas bem como a produção agrícola através da autonomia energética e consequente melhoria global da qualidade de vida dos habitantes [8].

2.2.3 Condições de aplicação das energias renováveis

Nenhum tipo de energia renovável é universalmente aplicável, devido às diferentes condições ambientais que cada região oferece. A exploração de energias renováveis pressupõe a realização uma prospecção ambiental pois, determinados ambientes são aptos para a sua exploração e outros não. A principal consequência da dependência de energias renováveis é a impossibilidade de elaboração de um plano simplista nacional ou internacional de energia [7].

Para o melhor aproveitamento de energias renováveis afigura-se importante o conhecimento de dados meteorológicos. Em particular dados de biomassa são

difficilmente encontrados. Em geral a prospecção para fornecimento de energias renováveis requer tecnologias especiais e equipamentos de custo muito elevado. Felizmente a sua ligação com a agricultura e a ciência marinha, permite a obtenção de informação básica [8].

As energias renováveis podem ser aplicadas para diferentes finalidades porém, existem limitações do ponto de vista de potência produzida e capacidade de armazenamento. Este tipo de energia é geralmente aproveitado em lugares onde o acesso a energia eléctrica é difícil, e, têm a vantagem de serem de baixo custo de obtenção e exploração, em muitos casos. A energia solar tem a limitação de exigir que exista radiação solar para a sua exploração, pelo que é aplicável em regiões tropicais e em casos de céu limpo.

A energia eólica deve ser explorada geralmente em regiões de altitude elevada onde a corrente das massas de ar se movem a uma velocidade elevada, etc.

O uso de energias renováveis pressupõe a concepção de formas de armazenamento da energia (baterias/acumuladores) por forma a que esta possa ser utilizada nos períodos em que a acção da fonte cessa e, devem ser devidamente projectados os dispositivos de conversão de formas de energias.

2.3 Recursos energéticos renováveis em moçambique

Em Moçambique, a queima da biomassa lenhosa, constitui nas zonas rurais, onde habita a maior parte da população, a principal fonte de energia para diferentes fins. Sendo este um recurso natural “inesgotável”, “gratuito”, e havendo dificuldades para transportar a energia eléctrica para as zonas rurais, a concepção de formas de aproveitamento das fontes de energia local (biomassa), tomando em conta os custos de geração de energia, com a finalidade de suprir as dificuldades da população em diferentes áreas por falta de energia eléctrica, tornou-se uma área de estudo que tem merecido grande atenção.

O sector de energia em Moçambique compreende dois subsectores o comercial e o tradicional. O subsector comercial, que em linhas gerais pode ser caracterizado como sendo aquele que usa produtos de energia comercializáveis em mercados formais, sendo de destacar a energia hidroeléctrica, os derivados do petróleo bruto e o gás, representam apenas cerca de 17% da energia consumida no país. A energia comercial é fundamentalmente usada na indústria, em centros urbanos, no transporte e na agricultura mecanizada. Em termos de fornecimento de energia eléctrica, este subsector cobre cerca de 7% da população moçambicana. Nas zonas rurais menos de 1% da população moçambicana tem acesso a energia eléctrica [7]. O subsector tradicional de energia, dominado fundamentalmente pela biomassa, partilha cerca de 83% do total de energia consumida no país. As zonas rurais que representam cerca de 80% da população moçambicana e também as zonas peri-urbanas, são as principais consumidoras de energias tradicionais sendo estas usadas principalmente para a confecção de alimentos e para o aquecimento em épocas frias [7]. Portanto, pode-se perceber que maior parte da população moçambicana usa a biomassa como principal fonte de energia, não havendo investimentos grandes para o desenvolvimento de tecnologias de aproveitamento das fontes renováveis de energia, das quais o país é um grande detentor.

Radiação solar

Sendo um país tropical, caracterizado por um verão longo e muito quente, a radiação solar é abundante e com intensidade elevada, portanto a radiação solar é uma das grandes fontes renováveis de energia em Moçambique.

Rios e Lagos

Geograficamente Moçambique é um país costeiro e é atravessado por rios e lagos de grande caudal de água, factos que o enriquecem em recursos hídricos aproveitáveis como fonte renovável de energia, uma vez que a precipitação geralmente é regular em muitas zonas.

- Biomassa

Aproveitamento da energia química, produzida pelas plantas na forma de hidratos de carbono através da fotossíntese. Moçambique é um país em que parte da sua extensão é uma floresta coberta, o que permite o aproveitamento da energia química produzida pelas plantas.

-Ventos

A energia eólica é aquela cuja fonte é a movimentação das massas de ar na atmosfera, isto é, é obtida pelo aproveitamento da energia dos ventos. Moçambique oferece regiões com condições propensas ao uso da energia cinética das massas de ar para produção de energia (energia eólica).

3. RADIAÇÃO SOLAR

A energia solar é um recurso energético renovável que vem sendo explorado pela humanidade desde os mais antigos tempos. Na antiguidade, o homem já usava o calor fornecido pela radiação solar entre outros fins para a secagem de alimentos e como fonte de luz. Com o evoluir dos tempos, foram sendo descobertas novas formas de aproveitamento de da radiação solar como fonte de energia para diferentes finalidades. Hoje a inesgotável energia gerada pelo sol continua sendo aproveitada tanto como fonte de calor quanto de luz e, é uma alternativa energética muito aplicável para enfrentar os desafios do novo milénio, na medida em que existe um enorme potencial exploração da energia solar por meio de sistemas de captação e conversão em outra forma de energia (térmica, eléctrica, mecânica, etc.).

O sol é responsável pela origem de praticamente todas as outras fontes de energia [1]. Em outras palavras, as fontes de energia são, em última instância, derivadas da energia do Sol. É a partir da energia do sol que se dá a evaporação, origem do ciclo das águas, que possibilita o represamento e a consequente geração de electricidade (hidroelectricidade). A radiação solar também induz a circulação atmosférica em larga escala, causando os ventos. Petróleo, carvão e gás natural foram gerados a partir de

resíduos de plantas e animais que, originalmente, obtiveram a energia necessária ao seu desenvolvimento, da radiação solar [1].

Neste capítulo dá-se seguimento ao estudo das energias renováveis porém, com particular destaque para a radiação solar. Apesar de a radiação solar ser um assunto de extrema complexidade, neste capítulo procura-se abordar de forma clara os aspectos fundamentais a ela ligados, que possam servir de base para o desenvolvimento de conhecimentos mais profundos sobre as formas de aproveitamento e conversão.

3.1 O espectro solar

A radiação solar é a radiação electromagnética que se propaga a uma velocidade de 300000 km/s, podendo-se observar aspectos ondulatórios e corpusculares [9].

O portador da energia solar é a radiação. A radiação solar consiste em radiação de luz visível de ultravioletas e infravermelhos invisíveis. A figura 1 ilustra a distribuição do espectro solar. A luz visível tem um comprimento de onda de 0.4 μ a 0.8 μ . A ultravioleta é mais curta do que 0.4 μ e a infravermelha mais longa do que 0.8 μ . Cerca de 9% da radiação solar fica na faixa de radiação de calor [9].

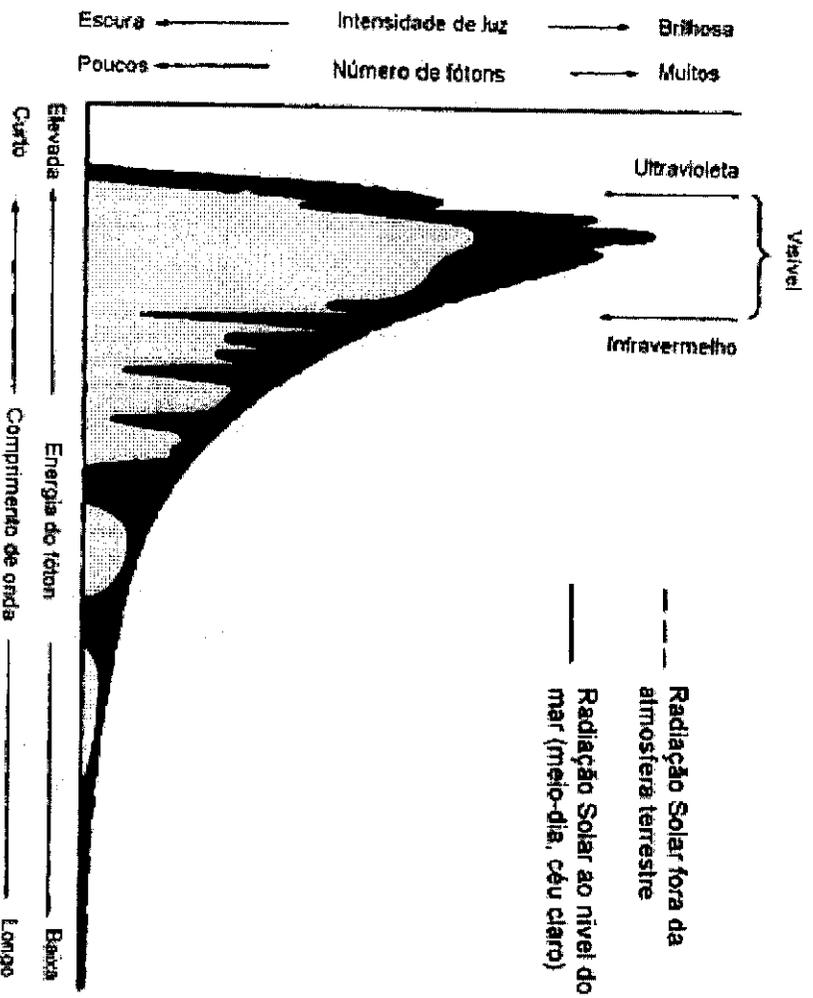


Figura 3.1. Distribuição espectral da radiação solar.

Fonte: Internet [9]

Mais precisamente, as regiões de subdivisão do espectro solar são apresentadas na tabela 3.1.

Tabela 3.1. Intervalo de variação do espectro solar

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

O sol, uma esfera brilhante de gás consiste especialmente em hidrogénio (70%) e hélio (27%) e a energia criada resulta da transformação nuclear, perdendo o sol deste modo um milhão de toneladas da sua massa por segundo. A intensidade da radiação à superfície do sol é de cerca de 70000KW/m^2 a 80000KW/m^2 a uma temperatura de 6000°C . O nosso planeta recebe apenas uma pequena mas significativa parte desta potência, aproximadamente 180 000 biliões de kilowatts, o que corresponde a cerca de 18 000 vezes mais do que a quantidade que o homem produziu na terra até hoje [1].

Fora da atmosfera terrestre, o fluxo de radiação ainda chega a 1394W/m^2 ou $2\text{cal/cm}^2/\text{min}$., valor a que se dá o nome de constante solar (G_0). Ao passar pela atmosfera, uma grande parte dessa radiação é absorvida (30% – 40%), de maneira que, num dia claro, a superfície da terra ao nível do mar recebe entre $0,855\text{KW/cm}^2$ a 1KW/m^2 de radiação directa. Naturalmente uma parte (cerca de 50%) da radiação difusa na atmosfera alcança a superfície terrestre sob a forma de energia [1].

A duração da luz solar e da intensidade da radiação estão localmente dependentes da época do ano, das condições atmosféricas, e, evidentemente, da posição geográfica. Cerca de 25% da superfície terrestre tem luz solar todo o dia, isto é, radiação solar directa [1].

3.2 Componentes da radiação

A energia solar incidente no meio material pode ser reflectida, transmitida e absorvida. Para toda a radiação solar que chega às camadas superiores da atmosfera, apenas uma fracção atinge a superfície terrestre, devido à reflexão e absorção dos raios solares pela atmosfera. Esta fracção que atinge o solo é constituída por um componente **directa** (ou de feixe) e por um componente **difusa** [9]. As componentes da radiação solar estão ilustradas na figura 3.2.

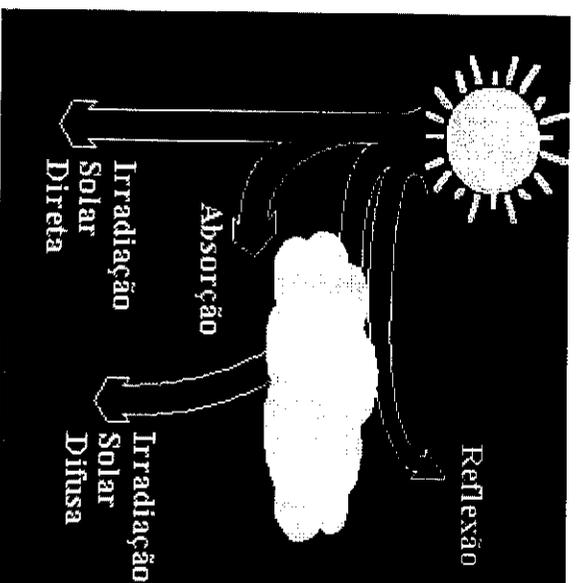


Figura 3.2 - Componentes da radiação solar ao nível do solo.

Fonte: Internet [9]

3.2.1 Radiação directa (G_b)

É a radiação a que simplesmente chamamos luz solar. A sua frequência e duração são decisivas para a tecnologia solar e são verificadas através de medições contínuas, cujos valores de calculam [1].

Somente a componente directa da radiação solar pode ser submetida a um processo de concentração dos raios através de espelhos parabólicos, lentes, etc. [4].

$$G_{bh} = G_b \times \cos\theta$$

[3.1]

T – é o ângulo entre radiação directa e a normal à superfície do colector

3.2.2 Radiação difusa

A radiação difusa dá-se porque, ao passar através da atmosfera, parte da radiação directa é espalhada por partículas flutuantes. Distribui-se diferentemente por todo o hemisfério e, em qualquer caso, é mais fraca do que a radiação directa. A radiação difusa não tem uma orientação definida, vem de todas as direcções [1].

Se a superfície receptora estiver inclinada com relação à horizontal, haverá uma terceira componente reflectida pelo ambiente do entorno (solo, vegetação, obstáculos, terrenos rochosos, etc.). O coeficiente de reflexão destas superfícies é denominado de "albedo" [9].

3.2.3 Radiação total (G_0)

A radiação total é a soma da radiação directa e da radiação difusa. A radiação total depende da inclinação da superfície colectora em relação à radiação solar incidente [1].

$$G_t = G_b + G_d \quad [3.2]$$

G_d – é a radiação difusa

3.3 Intensidade da radiação

A duração da luz solar depende da posição geográfica e das condições climáticas. Os valores máximos são alcançados em áreas desertas. A intensidade da radiação e a duração anual da luz solar determinam a quantidade de energia que se pode obter numa certa situação geográfica. A intensidade da radiação é dada por W/m^2 ou $kcal/m^2$ /unidade de tempo. No limite exterior da atmosfera a intensidade da radiação é de $1394W/m^2$ ($1200kcal/m^2$ /hora) [1].

3.4 Geometria do sol e da terra

O nosso planeta, em seu movimento anual em torno do Sol, descreve em trajectória elíptica num plano que é inclinado aproximadamente $23,5^\circ$ com relação ao plano equatorial. Esta inclinação, demonstrada na órbita da terra representada figura 3.3, é responsável pela variação da elevação do sol no horizonte em relação à mesma hora, ao longo dos dias, dando origem às estações do ano [9].

A posição angular do Sol, ao meio-dia solar, em relação ao plano do Equador (Norte positivo) é chamada de declinação solar (d). Este ângulo, varia de acordo com o dia do ano, dentro dos seguintes limites:

$$-23,45^\circ < d < 23,45^\circ$$

A soma da declinação com a latitude local determina a trajectória do movimento aparente do sol para um determinado dia em uma dada localidade na Terra [9].

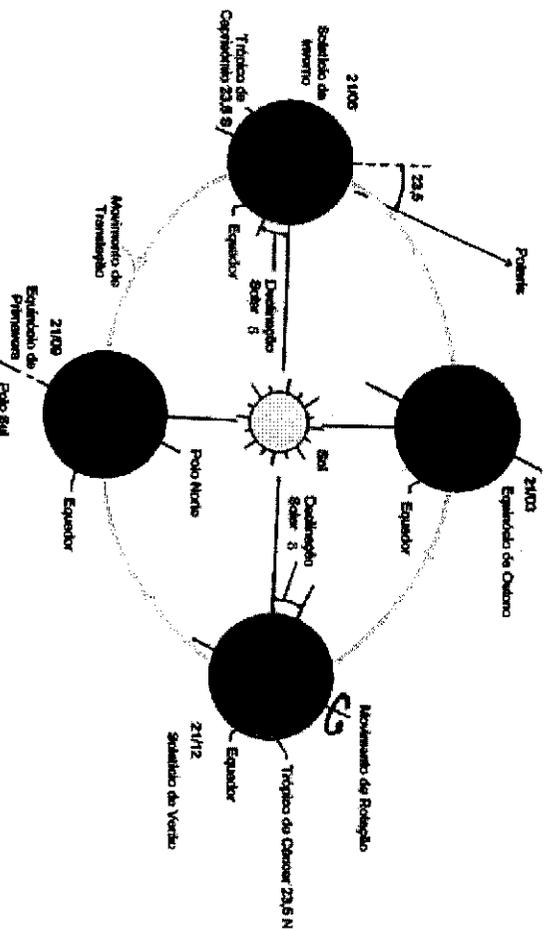


Figura 3.3 - Órbita da Terra em torno do Sol, com seu eixo N-S inclinado de um ângulo de 23,5°.

Fonte: Internet [9]

$$d_0 = d_0 \sin [360^\circ (284+n)/365]$$

[3.3]

onde:

n – é o dia de ano

d_0 – é a direcção do eixo da terra em relação à normal do plano de revolução ($d_0 = 23,5^\circ$)

A radiação solar que atinge o topo da atmosfera terrestre provém da região da fotosfera solar que é uma camada tênue com aproximadamente 300km de espessura e temperatura superficial da ordem de 5800 K [9].

3.5 Instrumentos de medição da radiação solar

A medição da radiação solar, tanto a componente directa como a componente difusa na superfície terrestre é de maior importância para o estudo das influências das condições climáticas e atmosféricas. Com um histórico dessas medidas, pode-se viabilizar a instalação de sistemas de conversão da radiação solar, em uma determinada região, garantindo o máximo aproveitamento nos momentos em que as variações da intensidade da radiação solar sofrem significativas alterações. As medições padrões são a radiação global e difusa no plano horizontal e a radiação directa normal [9].

3.5.1 Classificação dos instrumentos de medição da radiação

Piranómetros

As figuras 3.4a e 3.4b ilustram imagens de piranómetros. Os piranómetros medem a radiação global. Este instrumento caracteriza-se pelo uso de uma termopilha que mede a diferença de temperatura entre duas superfícies, uma pintada de preto e outra pintada de branco igualmente iluminadas. A expansão sofrida pelas superfícies provoca um diferencial de potencial que, ao ser medida, mostra o valor instantâneo da energia solar. Um outro modelo bem interessante de piranómetro é aquele que utiliza uma célula fotovoltaica de silício monocristalino para colectar medidas solarimétricas. Estes piranómetro é largamente utilizados pois apresenta custos bem menores do que os equipamentos tradicionais. Pelas características da célula fotovoltaica, este aparelho apresenta limitações quando apresenta sensibilidade em apenas 60% da radiação solar incidente [9].

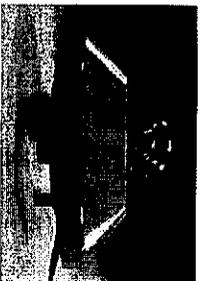


Figura 3.4a - Piranômetro de Segunda Classe. Fonte: Internet [9].

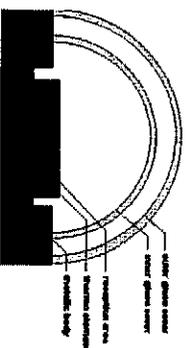


Figura 3.4b - Secção transversal de um piranômetro. Fonte: Internet [9].

Pireliômetros

Representados nas figuras 3.5a e 3.5b, os pireliômetros são instrumentos que medem a radiação directa. Ele se caracteriza por apresentar uma pequena abertura de forma a "visualizar" apenas o disco solar e a região vizinha denominada circunsolar. O instrumento segue o movimento solar e a região vizinha denominada circunsolar. O melhor a região do sensor. Muitos dos pireliômetros hoje são autocalibráveis apresentando precisão na faixa de .5% quando adequadamente utilizados para medições [5].

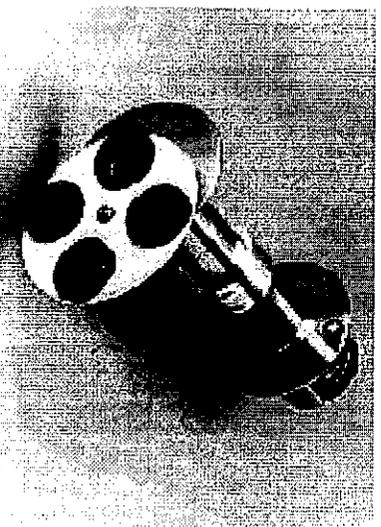


Figura 3.5a - Pireliômetros de Cavidade Figura 3.5b - Pireliômetros de Incidência Absoluta. Fonte: Internet [9] Normal. Fonte: Internet [9].

Heliógrafo

O heliógrafo é apresentado na figura 3.6. Este instrumento registra a duração do brilho solar. A radiação solar é focalizada por uma esfera de cristal de 10 cm de diâmetro sobre uma fita que, pela acção da radiação é enegrecida. O comprimento desta fita exposta a radiação solar mede o número de horas de insolação [9].



Figura.3.6
Heliógrafo Cappel-Stokes

Fonte: Internet [9].

Actinógrafo

Instrumento usado para medir a radiação global. Este instrumento é composto de sensores baseados na expansão diferencial de um par biográfico. Os sensores são conectados a uma pena que, quando de suas expansão, registram o valor instantâneo da radiação solar. Sua precisão encontra-se na faixa de 15 a 20% e é considerado um instrumento de terceira classe [9]. O Exemplo de um actinógrafo está representado na figura 3.7.



Figura 3.7

Actinógrafo Robitzsch-Fuess.

Fonte: Internet [9].

4. ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

A radiação solar é uma fonte energética renovável cujo aproveitamento pressupõe a utilização de dispositivos apropriados para a sua conversão para a forma desejada.

Com a crise mundial de energia de 1973/74, a preocupação em estudar novas formas de produção de energia fez com que a utilização de células fotovoltaicas não se restringisse somente para programas espaciais mas que fosse intensamente estudados e utilizados no meio terrestre para suprir a crise de fornecimento de energia [10].

Neste capítulo são apresentadas as formas de aproveitamento da radiação solar fotovoltaica e suas aplicações.

4.1 História da energia solar fotovoltaica

A conversão de energia solar em energia eléctrica foi verificada pela primeira vez por Edmond Becquerel, em 1839 onde constatou uma diferença de potencial nos extremos de uma estrutura de material semiconductor quando exposto a luz. Em 1876 foi montado o primeiro aparato fotovoltaico resultado de estudos das estruturas no estado sólido, e apenas em 1956 iniciou-se a produção industrial seguindo o desenvolvimento da microeletrônica [10].

Nos últimos tempos, houve um avanço significativo na tecnologia fotovoltaica onde aprimorou-se o processo de fabricação, a eficiência das células e seu peso. Um dos factores que impossibilitava a utilização da energia solar fotovoltaica em larga escala era o alto custo das células fotovoltaicas. As primeiras células foram produzidas com o custo de US\$600/W para o programa espacial. Com a ampliação dos mercados e várias empresas voltadas para a produção de células fotovoltaicas, o preço tem reduzido ao longo dos anos podendo ser encontrado hoje, para grandes escalas, o custo médio de US\$ 8,00/W [10].

Actualmente, os sistemas fotovoltaicos vêm sendo utilizados em instalações remotas possibilitando vários projectos sociais, agro pastoris, de irrigação e comunicações. As

facilidades de um sistemas fotovoltaico tais como: modularidade, baixos custos de manutenção e vida útil longa, fazem com que sejam de grande importância para instalações em lugares desprovidos da rede eléctrica [10].

4.2 Efeito fotovoltaico

O efeito fotovoltaico dá-se em materiais da natureza denominados semicondutores que se caracterizam pela presença de bandas de energia onde é permitida a presença de electrões (banda de valência) e de outra totalmente "vazia" (banda de condução) [10].

O semicondutor mais usado é o silício. Seus átomos se caracterizam por possuírem quatro electrões que se ligam aos vizinhos, formando uma rede cristalina. Ao adicionarem-se átomos com cinco electrões de ligação, como o fósforo, por exemplo, haverá um electrão em excesso que não poderá ser emparelhado e que ficará "sobrando", fracamente ligado a seu átomo de origem. Isto faz com que, com pouca energia térmica, este electrão se livre, indo para a banda de condução. Diz-se assim, que o fósforo é um dopante doador de electrões e denomina-se *dopante n* ou *impureza n* [10]. A figura 4.1 ilustra o princípio de uma célula fotovoltaica.

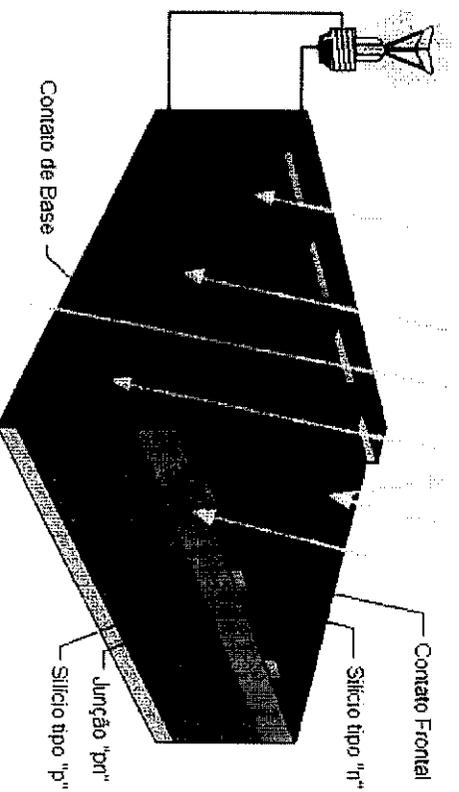


Figura 4.1 - Corte transversal de uma célula fotovoltaica, Fonte: Internet [10]

Se, por outro lado, introduzem-se átomos com apenas três electrões de ligação, como é o caso do boro, haverá uma falta de um electrão para satisfazer as ligações com os átomos de silício da rede. Esta falta de electrão é denominada *buraco* ou *lacuna* e ocorre que, com pouca energia térmica, um electrão de um sítio vizinho pode passar a esta posição, fazendo com que o buraco se desloque. Diz-se portanto, que o boro é um *aceitador de electrões* ou um *dopante p* [10].

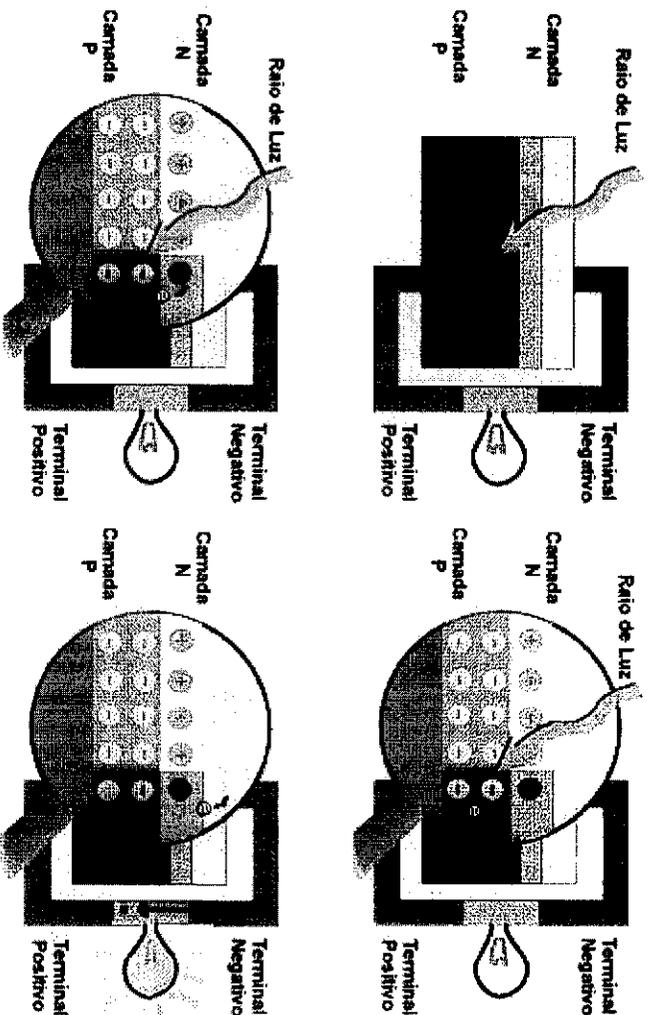


Figura 4.2 - Efeito fotovoltaico na junção pn , Fonte: Internet [10].

Se, partindo de um silício puro, forem introduzidos átomos de boro em uma metade e de fósforo na outra, será formado o que se chama *junção pn*, representada na figura 4.2. O que ocorre nesta junção é que electrões livres do lado n passam ao lado p onde encontram os buracos que os capturam; isto faz com que haja um acumulo de electrões no lado p, tornando-o negativamente carregado e uma redução de electrões do lado n, que o torna electricamente positivo [10]. Estas cargas aprisionadas dão origem a um campo eléctrico permanente que dificulta a passagem de mais electrões

do lado n para o lado p; este processo alcança um equilíbrio quando o campo eléctrico forma uma barreira capaz de barrar os elétrons livres remanescentes no lado n [10].

Se uma junção pn for exposta a fótons com energia maior que o *gap*, ocorrerá a geração de pares elétron-lacuna. Se isto acontecer na região onde o campo eléctrico é diferente de zero, as cargas serão aceleradas, gerando assim, uma corrente através da junção. Este deslocamento de cargas dá origem a uma diferença de potencial a qual chamamos de *Efeito Fotovoltaico*. Se as duas extremidades do "pedaço" de silício forem conectadas por um fio, haverá uma circulação de electrões [10].

4.3 Tipos de células fotovoltaicas

As células fotovoltaicas são fabricadas, na sua grande maioria, usando o silício (Si) podendo ser constituídas de cristais monocristalinos, policristalinos ou de silício amorfo.

4.3.1 Silício Monocristalino

A célula de silício monocristalino é, historicamente, das mais usadas e comercializada como conversor directo de energia solar em electricidade, e a tecnologia para sua fabricação é um processo básico muito bem constituído [10].

A fabricação da célula de silício começa com a extracção do cristal de dióxido de silício. Este material é desoxidado em grandes fornos, purificado e solidificado. Este processo atinge um grau de pureza em 98 e 99% o que é razoavelmente eficiente sob o ponto de vista energético e custo. Este silício para funcionar como células fotovoltaicas necessita de outros dispositivos semicondutores e de um grau de pureza maior devendo chegar na faixa de 99,99999% [10]. Um exemplo de uma célula monocristalina de silício está apresentado na figura 4.3.

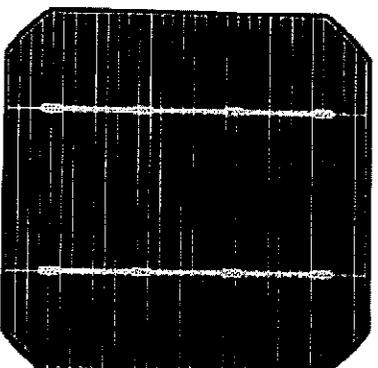


Figura 4.3 Célula de silício monocristalino, Fonte: Internet [10]

Para se utilizar o silício na indústria eletrônica, além do alto grau de pureza, o material deve ter a estrutura monocristalina e baixa densidade de defeitos na rede. O processo mais utilizado para se chegar às qualificações desejadas é chamado "processo Czochralski" [1]. Neste processo o silício é fundido juntamente com uma pequena quantidade de dopante, normalmente o boro que é do tipo p. Com um fragmento do cristal devidamente orientado e sob rígido controle de temperatura, vai se extraindo do material fundido um grande cilindro de silício monocristalino levemente dopado. Este cilindro obtido é cortado em fatias finas de aproximadamente $300 \mu\text{m}$ [10].

Após o corte e limpeza de impurezas das fatias, deve-se introduzir impurezas do tipo N de forma a obter a junção. Este processo é feito através da difusão controlada onde as fatias de silício são expostas a vapor de fósforo em um forno onde a temperatura varia entre 800 a 1000°C [10].

Dentre as células fotovoltaicas que utilizam o silício como material base, as monocristalinas são, em geral, as que apresentam as maiores eficiências. As fotocélulas comerciais obtidas com o processo descrito atingem uma eficiência de até 15% podendo chegar em 18% em células feitas em laboratórios.

4.3.2 Silício Policristalino

As células de silício policristalino, ilustrada na figura 4.4, são mais baratas que as de silício monocristalino por exigirem um processo de preparação das células menos rigoroso. A eficiência, no entanto, cai um pouco em comparação com as células de silício monocristalino.

O processo de pureza do silício utilizado na produção das células de silício policristalino é similar ao processo do Si monocristalino, o que permite obtenção de níveis de eficiência compatíveis. Basicamente, as técnicas de fabricação de células policristalinas são as mesmas na fabricação das células monocristalinas, porém com menores rigores de controle [10].

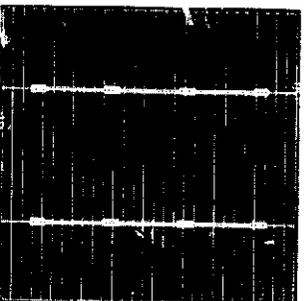


Figura 4.4 Célula de silício policristalino, Fonte: Internet [10]

Podem ser preparadas pelo corte de um lingote, de fitas ou depositando um filme num substrato, tanto por transporte de vapor como por imersão. Nestes dois últimos casos só o silício policristalino pode ser obtido. Cada técnica produz cristais com características específicas, incluindo tamanho, morfologia e concentração de impurezas. Ao longo dos anos, o processo de fabricação têm alcançado eficiência máxima de 12,5% em escalas industriais [10].

4.3.3 Silício Amorfo

Uma célula de silício amorfo difere das demais estruturas cristalinas por apresentar alto grau de desordem na estrutura dos átomos. A utilização de silício amorfo para uso em

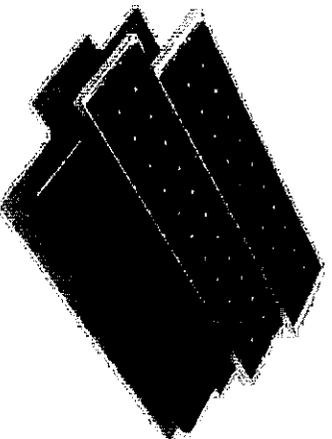
fotocélulas tem mostrado grandes vantagens tanto nas propriedades elétricas quanto no processo de fabricação [10]. Por apresentar uma absorção da radiação solar na faixa do visível e podendo ser fabricado mediante deposição de diversos tipos de substratos, o silício amorfo vem se mostrando uma forte tecnologia para sistemas fotovoltaicos de baixo custo. Mesmo apresentando um custo reduzido na produção, o uso de silício amorfo apresenta duas desvantagens: a primeira é a baixa eficiência de conversão comparada às células mono e policristalinas de silício; em segundo, as células são afetadas por um processo de degradação logo nos primeiros meses de operação, reduzindo assim a eficiência ao longo da vida útil [10].

Por outro lado, o silício amorfo apresenta vantagens que compensam as deficiências acima citados, são elas:

- Processo de fabricação relativamente simples e barato;
- Possibilidade de fabricação de células com grandes áreas;
- Baixo consumo de energia na produção.

4.4 Módulos fotovoltaicos

Pela baixa tensão e corrente de saída em uma célula fotovoltaica, agrupam-se várias células formando um módulo. O arranjo das células nos módulos pode ser feito conectando-as em série ou em paralelo [10]. A figura 4.5 é um exemplo de módulos fotovoltaicos.



4.5 Módulos fotovoltaicos, Fonte: Internet [10]

Ao conectar as células em paralelo, tal como indica a figura 4.6, soma-se as correntes de cada módulo e a tensão do módulo é exactamente a tensão da célula. A corrente produzida pelo efeito fotovoltaico é contínua. Pelas características típicas das células (corrente máxima por volta de 3A e tensão muito baixa, em torno de 0,7V) este arranjo não é utilizado salvo em condições muito especiais.

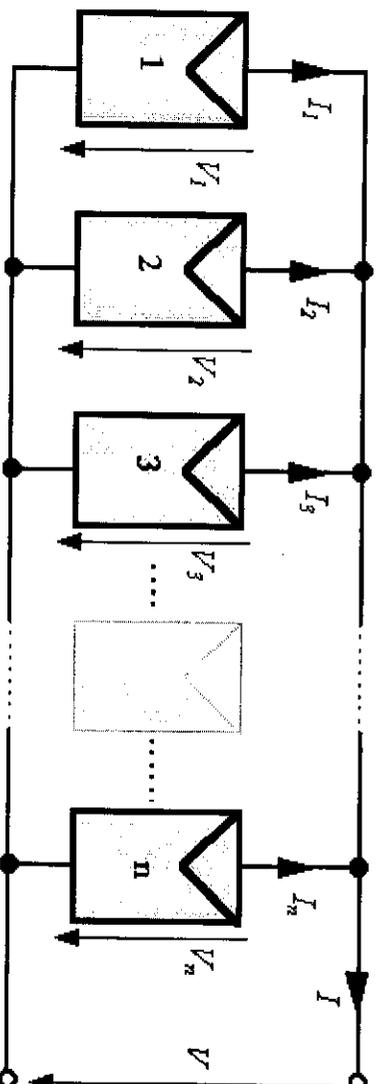


Figura 4.6 Conexão de células em paralelo, Fonte: Internet [10]

A conexão mais comum de células fotovoltaicas em módulos é o arranjo em série, representado na figura 4.7. Este consiste em agrupar o maior número de células em série onde soma-se a tensão de cada célula chegando a um valor final de 12V o que possibilita a carga de acumuladores (baterias) que também funcionam na faixa dos 12V [10].

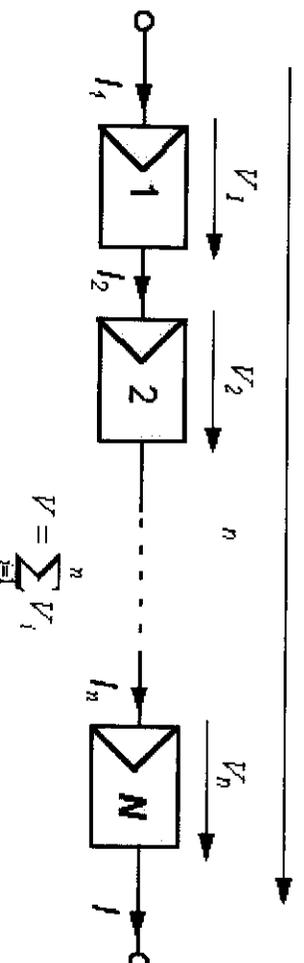


Figura 4.7 Arranjo das células em série, Fonte: Internet [10]

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 [1]. Para que toda a corrente de um módulo não seja limitada por uma célula de pior desempenho (o caso de estar encoberta), usa-se um diodo de passo ou de "bypass" cujo esquema apresenta-se na figura 4.8. Este diodo serve como um caminho alternativo para a corrente e limita a dissipação de calor na célula defeituosa. Geralmente o uso do diodo bypass é feito em agrupamentos de células o que, torna muito mais barato comparado ao custo de se conectar um diodo em cada célula [10].

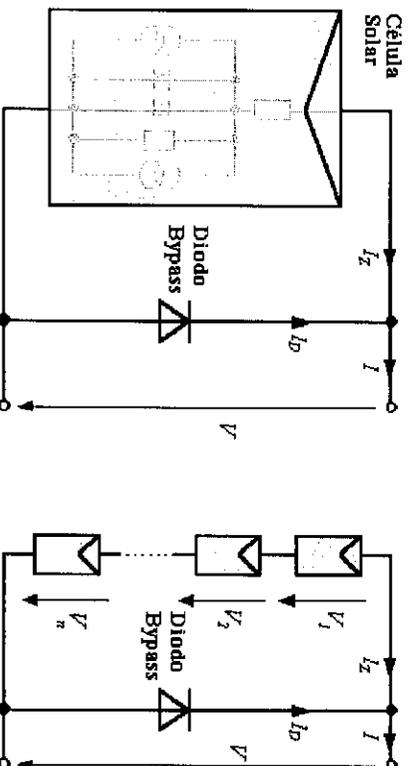


Figura 4.8 Possível ligação para um diodo bypass entre células, Fonte: Internet [10]

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 [10]. 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, cuja ligação ilustra-se na figura 4.9, impedindo assim correntes reversas que podem ocorrer caso liguem o módulo directamente em um acumulador ou bateria [10].

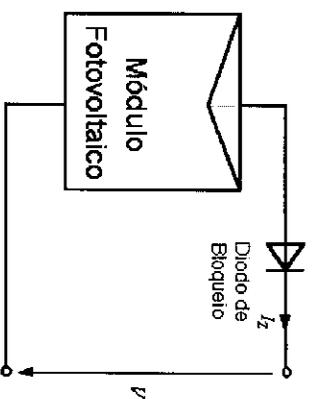


Figura 4.9 Diodo de bloqueio, Fonte: Internet [10]

4.5 Características elétricas dos módulos fotovoltaicos

Geralmente, a potência dos módulos é dada pela potência de pico. Tão necessário quanto este parâmetro, existem outras características elétricas que melhor caracterizam a funcionalidade do módulo. As principais características elétricas dos módulos fotovoltaicos são as seguintes:

1. Voltagem de Circuito Aberto (V_{oc})
2. Corrente de Curto Circuito (I_{sc})
3. Potência Máxima (P_m)
4. Voltagem de Potência Máxima (V_{mp})
5. Corrente de Potência Máxima (I_{mp})

A condição padrão para se obter as curvas características dos módulos é definida para radiação de $1000W/m^2$ (radiação recebida na superfície da Terra em dia claro, ao meio dia), e temperatura de $25^\circ C$ na célula (a eficiência da célula é reduzida com o aumento da temperatura). A entre os diferentes características elétricas dos módulos fotovoltaicos é representada graficamente nas figuras 4.10, 4.11 e 4.12.

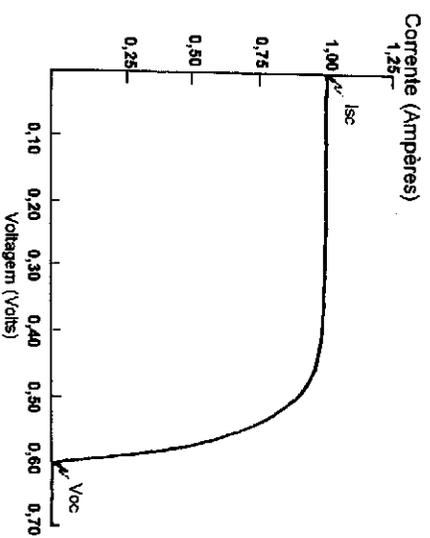


Figura 4.10- Curva característica IxV mostrando a corrente I_{sc} e a tensão V_{oc} , Fonte: Internet [10]

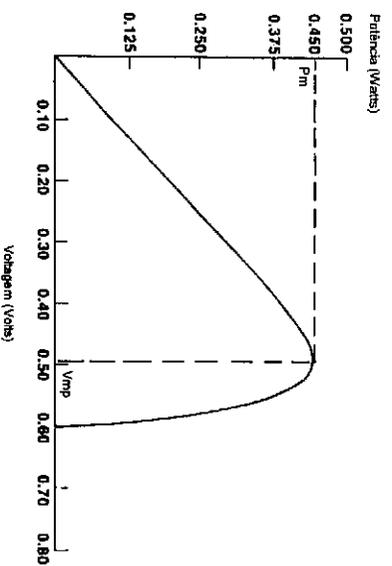


Figura 4.11 - Curva típica de potência versus tensão, Fonte: Internet [10]

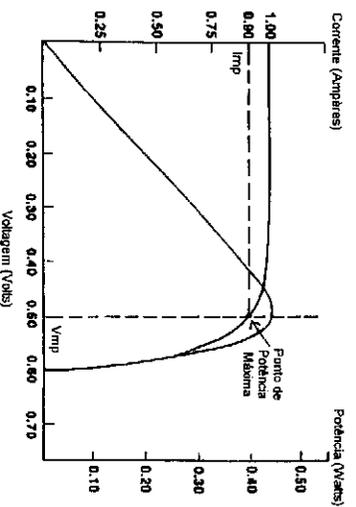


Figura 4.12 Parâmetros de potência máxima, Fonte: Internet [10]

4.6 Factores que afectam as características eléctricas dos módulos

Os principais factores que influenciam nas características eléctricas de um painel são:

- Intensidade Luminosa
- Temperatura das Células.

A corrente gerada nos módulos aumenta linearmente com o aumento da Intensidade luminosa. Por outro lado, o aumento da temperatura na célula faz com que a eficiência do módulo caia abaixando assim os pontos de operação para potência máxima gerada. Estas variações são graficamente ilustradas nas figuras 4.13 e 4.14.

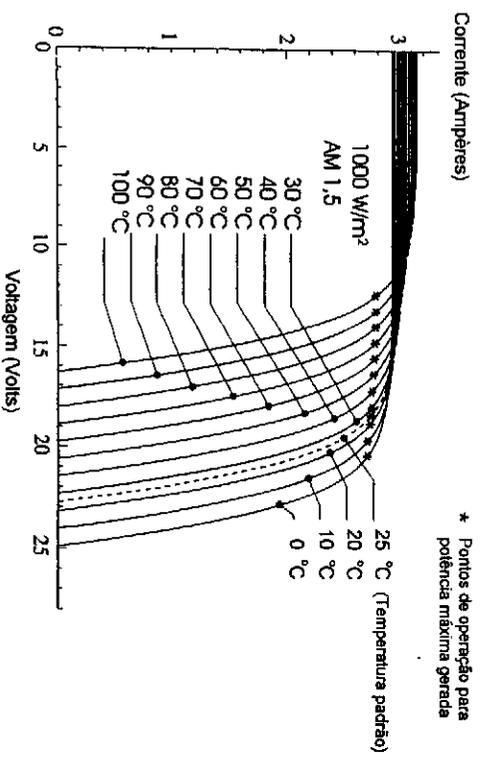
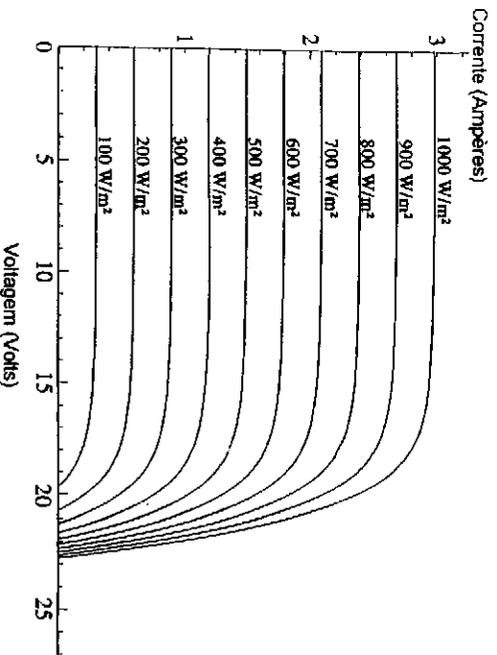


Figura 4.13- Efeito causado pela variação de Figura 4.14 - Efeito causado pela temperatura na intensidade luminosa, Fonte: Internet [10] célula, Fonte: Internet [10]

4.7 Componentes de um sistema fotovoltaico

Um sistema fotovoltaico pode ser classificado em três categorias distintas: sistemas isolados, híbridos e conectados a rede. Os sistemas obedecem a uma configuração básica ilustrada na figura 4.15, onde o sistema deverá ter uma unidade de controle de potência e também uma unidade de armazenamento [10].

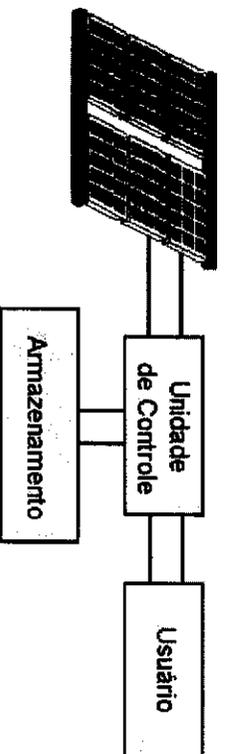


Figura 4.15 Configuração básica de um sistema fotovoltaico, Fonte: Internet [10]

4.7.1 Sistemas Isolados

Nos sistemas isolados, em geral, utiliza-se alguma forma de armazenamento de energia. Este armazenamento pode ser feito através de baterias, quando se deseja utilizar aparelhos eléctricos ou armazena-se na forma de energia gravitacional quando se bombeia água para tanques em sistemas de abastecimento. Alguns sistemas isolados não necessitam de armazenamento, o que é o caso da irrigação onde toda a água bombeada é directamente consumida ou estocada em reservatórios [10].

Em sistemas que necessitam de armazenamento de energia em baterias, usa-se um dispositivo para controlar a carga e a descarga na bateria. O "controlador de carga" tem como principal função não deixar que haja danos na bateria por sobrecarga ou descarga profunda. O controlador de carga é usado em sistemas pequenos onde os aparelhos utilizados são de baixa tensão e corrente contínua (CC) [10].

Para alimentação de equipamentos de corrente alternada (CA) é necessário um inversor. Este dispositivo geralmente incorpora um seguidor de ponto de máxima potência necessário para optimização da potência final produzida. Este sistema é usado quando se deseja mais conforto na utilização de electrodomésticos convencionais [1]. Portanto, o tipo de carga a utilizar afecta o modelo de funcionamento na unidade fotovoltaica, facto a perceber pelo diagrama da figura 4.16.

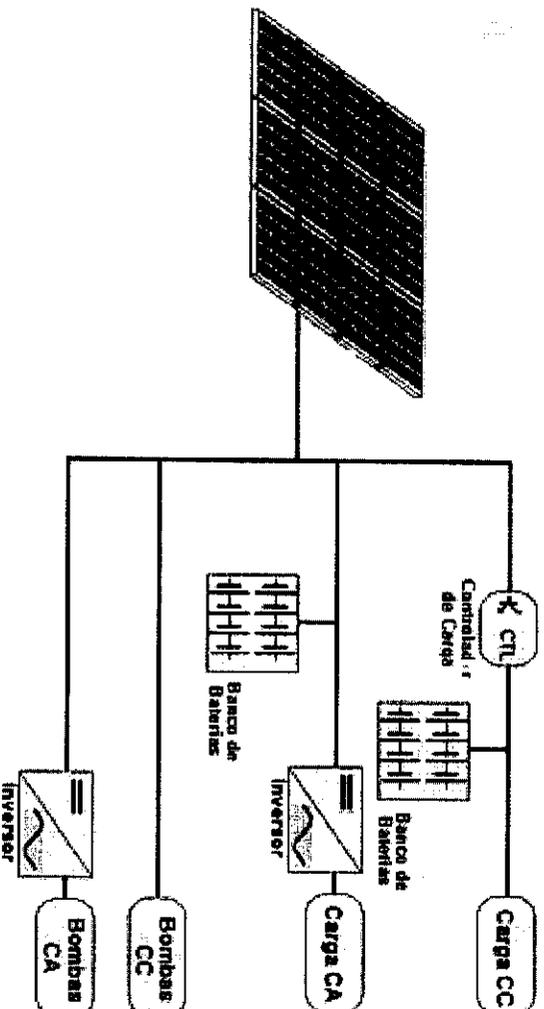


Figura 4.16 Diagrama de sistemas fotovoltaicos em função da carga utilizada, Fonte:

Internet [10]

4.7.2 Sistemas Híbridos

Sistemas híbridos, cujo esquema apresenta-se na figura 4.17, são aqueles que, desconectado da rede convencional, apresenta várias fontes de geração de energia como por exemplo: turbinas eólicas, geração diesel, módulos fotovoltaicos entre outras [4]. A utilização de vários formas de geração de energia eléctrica torna-se complexo na necessidade de optimização do uso das energias . É necessário um controle de todas as fontes para que haja máxima eficiência na entrega da energia para o usuário [10].

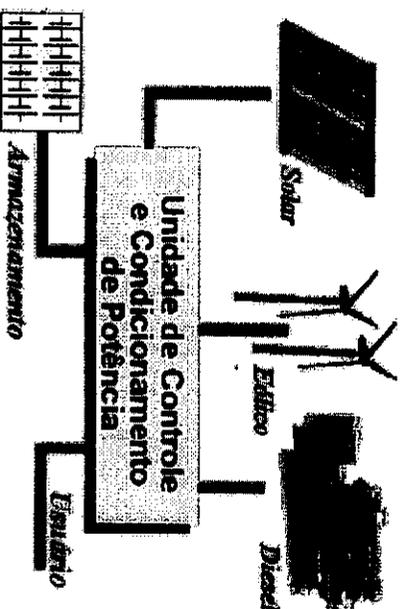


Figura 4.17 Exemplo de sistema híbrido.

Em geral, os sistemas híbridos são empregados para sistemas de médio a grande porte vindo a atender um número maior de usuários [10]. Por trabalhar com cargas de corrente contínua, o sistema híbrido também apresenta um inversor. Devido a grande complexidade de arranjos e multiplicidade de opções, a forma de otimização do sistema torna-se um estudo particular para cada caso [10].

4.7.3 Sistemas Interligados à Rede

Estes sistemas utilizam grandes números de painéis fotovoltaicos, e não utilizam armazenamento de energia pois toda a geração é entregue directamente na rede. Este sistema representa uma fonte complementar ao sistema eléctrico de grande porte ao qual esta conectada. Todo o arranjo é conectado em inversores e logo em seguida guiados directamente na rede, tal como na figura 4.18. Estes inversores devem satisfazer as exigências de qualidade e segurança para que a rede não seja afectada [10].

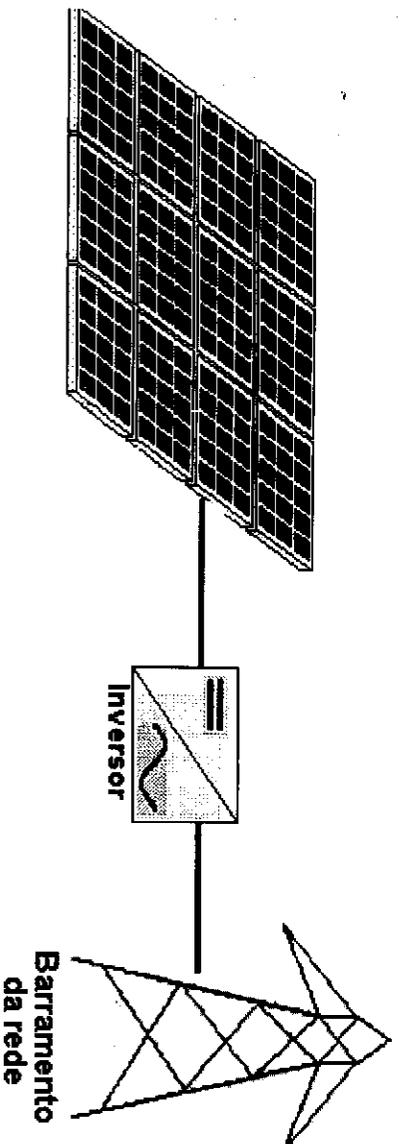


Figura4.18 - Sistema conectado à rede, Fonte: Internet [10].

4.8 Descrição eléctrica

4.8.1 Gerador Fotovoltaico Ideal

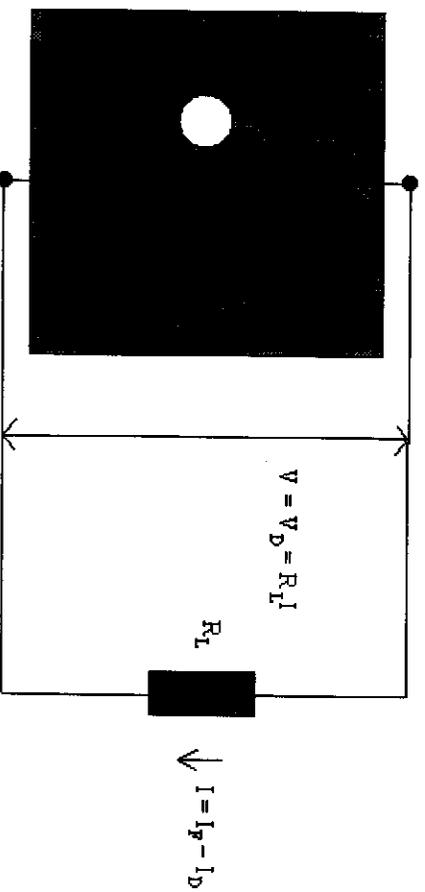


Figura 4.19. Gerador fotovoltaico ideal descarregando através de resistência finita,

Fonte: Internet [10]

A maneira mais simples de se descrever um gerador fotovoltaico é representá-lo como uma fonte de corrente ideal, que gera uma corrente I_p aproximadamente proporcional à

potência de radiação incidente, em paralelo com um diodo, como mostrado na Figura 4.19. Em tais condições, uma parte da corrente produzida pela radiação solar passa pelo resistor externo R_L (corrente externa I) e outra parte volta pelo diodo (I_D). Dessa forma, a corrente externa é dada por :

$$I = I_F - I_D \quad (4.1)$$

Vê-se ainda, na Figura 1, que no gerador fotovoltaico ideal a diferença de potencial V sobre o resistor é igual à diferença de potencial V_D sobre o diodo:

$$V = V_D \quad (4.2)$$

O diodo é um elemento não linear cuja curva tensão-corrente é dada numa forma geral por

$$I_D = I_S \left[\exp\left(\frac{V_D}{V_T}\right) - 1 \right] \quad (4.3)$$

onde I_S e V_T são características do gerador, com V_T dependente da temperatura.

Substituindo (4.2) em (4.3), e o resultado em (4.1), obtemos a função que descreve a curva característica $I \times V$ de um gerador fotovoltaico ideal Figura 3.10:

$$I = I_F - I_S \left[\exp\left(\frac{V}{V_T}\right) - 1 \right] \quad (4.4)$$

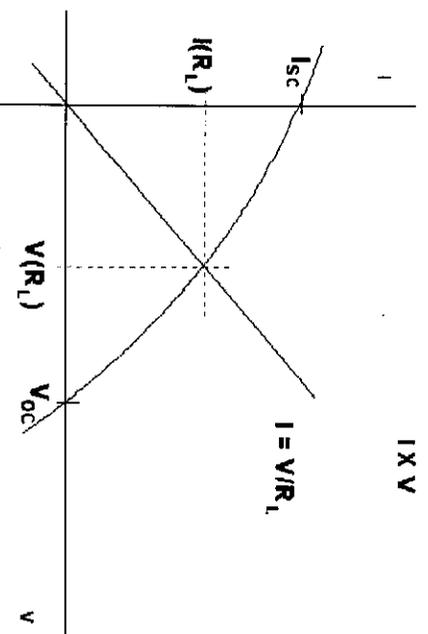


Figura 4.20 Curva característica $I \times V$ de um gerador fotovoltaico ideal, Fonte: Internet [10]

O facto de construir-se um gráfico $I \times V$ pode dar a falsa impressão de que a tensão (ou a corrente) é uma variável que pode ser variada independentemente; na verdade, na situação mostrada, a variável independente - mantida constante a intensidade luminosa - é a resistência externa R_L . Na verdade, na (eq. 4.4), a corrente I e a tensão V externas estão relacionadas por:

$$V = R_L I \quad (4.5)$$

Assim é possível eliminar uma das variáveis da (eq. 4.4) e escrever a outra como função de R_L [2]. Essa é uma função transcendente, determinada conforme mostrado no gráfico. Para cada valor da resistência correspondente um par I e V sobre a curva característica, que são as coordenadas do ponto no qual a curva é interceptada pela reta $I = V / R_L$.

Os valores da corrente de curto circuito I_{sc} e da tensão em circuito aberto V_{oc} , que correspondem aos pontos onde a curva característica cruza os eixos $V = 0$ e $I = 0$, respectivamente, são calculados abaixo para um gerador fotovoltaico ideal:

a) Gerador fotovoltaico ideal em circuito aberto

$$V_{oc} = V_T \ln \left(\frac{I_F + I_S}{I_S} \right)$$

(4.6)

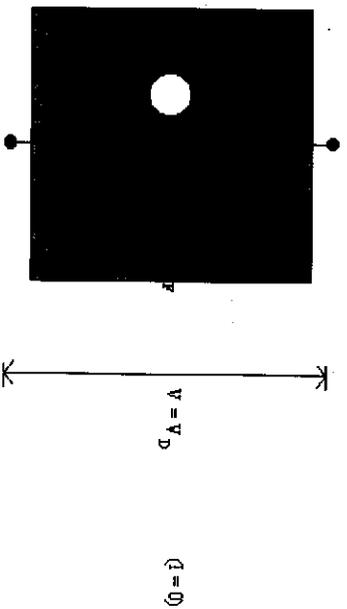


Figura 4.21- Gerador fotovoltaico ideal em circuito aberto, Fonte: Internet [10]

Quando o gerador está desconectado de qualquer carga externa a corrente externa I é zero e toda a corrente fotovoltaica gerada pela radiação incidente volta pelo diodo. Fazendo $I = 0$ na (eq. 4) obtemos a tensão no gerador em circuito aberto:

$$V_{oc} = V_T \ln \left(\frac{I_F + I_S}{I_S} \right)$$

(4.7)

b) Gerador fotovoltaico ideal em curto-circuito

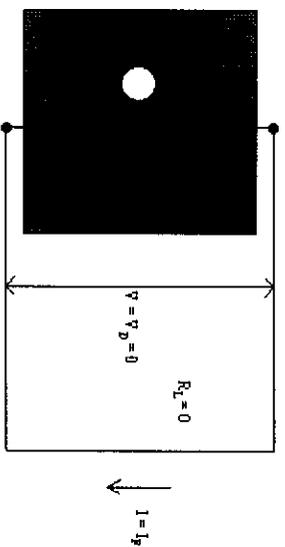


Figura 4.22- Gerador fotovoltaico ideal em curto-circuito, Fonte: Internet [10]

Quando o gerador está curto-circuitado (terminais ligados por resistência nula, como na Figura 3.10b) toda a corrente I_p circula por fora do gerador. Nesse caso, tanto a corrente como a tensão no diodo são nulas [9]. A tensão medida externamente é $V = 0$, e a corrente de curto circuito é a corrente fotovoltaica [9].

$$I_{SC} = I_p$$

(4.8)

4.8.2 Gerador Fotovoltaico Real

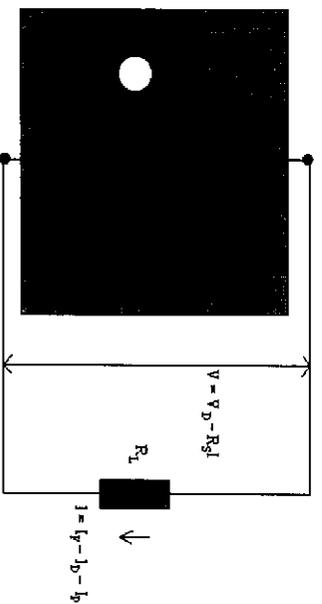


Figura4.23 Gerador fotovoltaico real descarregando através de resistência finita, Fonte: Internet [10]

Num gerador fotovoltaico real existem dois efeitos que precisam ser considerados:

- i) a resistência interna e dos contatos do gerador, que é representada como uma resistência R_s em série com o gerador, já que ela se opõe à circulação externa da corrente; e
- ii) a corrente resistiva através do cristal, representada como uma resistência R_p em paralelo com o diodo, já que ela representa um outro mecanismo para a circulação interna da corrente [9].

A equação que relaciona a corrente externa I e a diferença de potencial V sobre o resistor ainda é obtida a partir da equação $I(V)$ do diodo (eq. 4.3), só que agora as relações entre I e I_D (eq. 1) e entre V e V_D (eq. 4.2) são dadas por

$$I = I_f - I_D - I_p \quad (4.9)$$

$$V = V_D - R_s I \quad (4.10)$$

Substituindo (eq. 4.8) e (eq. 4.9) em (eq. 4.3), e usando a relação dada pela lei de Ohm entre I_p e V_D , obtemos

$$I = I_f - I_s \left[\exp \left\{ \left(1 + \frac{R_s}{R_L} \right) \frac{V}{V_T} \right\} - 1 \right] - \left(1 + \frac{R_s}{R_L} \right) \frac{V}{R_p} \quad (4.11)$$

4.8.3 Efeitos dos aparelhos de medida na determinação de I e V

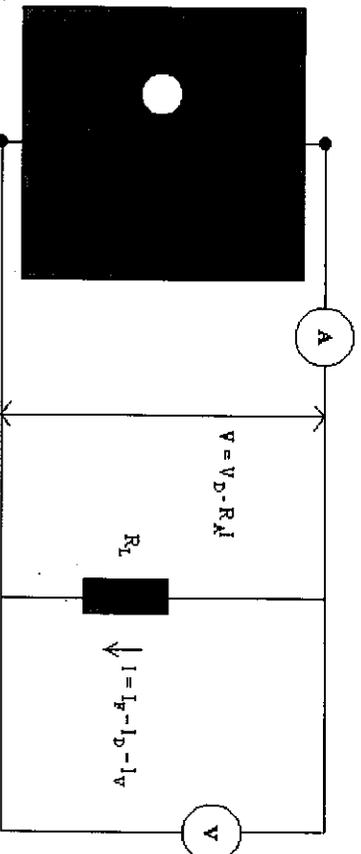


Figura 4.24 Efeito dos medidores de corrente e tensão sobre um gerador fotovoltaico ideal descarregando através de resistência finita, Fonte: Internet [10]

A Figura 4.24 mostra o efeito dos aparelhos de medida (amperímetro A e voltímetro V) sobre a tensão V e a corrente I externas em função da tensão V_D e a corrente I_D no diodo no gerador fotovoltaico ideal. O efeito da resistência do amperímetro R_A é idêntico ao efeito da resistência interna em série R_s e o efeito da resistência do amperímetro R_V é o mesmo que o da resistência interna em paralelo R_p [10].

Exceptuando-se as questões relativas à acurácia de medidas simultâneas de corrente e tensão (vide Práticas em Medidas Eléctricas), o efeito dos medidores pode ser incorporado ao resultado de (eq. 4.10) usando-se valores efetivos de R_s e R_p [10].

5. DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA ELÉCTRICO SOLAR

5.1 Generalidades

O dimensionamento de um sistema eléctrico solar, consiste em calcular o número de módulos solares e de baterias necessárias para o fornecimento da carga desejada. As baterias são usadas para armazenar a energia gerada pelo sistema durante o dia para uso durante a noite e outros períodos sem presença de sol [5].

Etapas de dimensionamento do sistema eléctrico solar:

1. Calcular a necessidade diária de energia eléctrica com base na potência e no tempo de funcionamento do consumidor durante um dia;
2. Calcular a quantidade de energia capaz de ser produzida por um módulo. Este cálculo é baseado nos registos de temperatura e insolação da região e na corrente produzida por um módulo;
3. Dimensionamento das baterias. Este cálculo tem como base as necessidades diárias de energia e o tempo de armazenamento necessário [5].

Para determinar a necessidade diária de energia é preciso, primeiro, alistar todos os elementos consumidores da energia produzida pelo sistema tomando em conta a potência (P) de cada um. Posteriormente determina-se o tempo (T) de funcionamento de cada consumidor durante o dia [5]. Assim, o consumo diário de energia é dado por:

$$E = P \times T \text{ Wh/dia} \quad (5.1)$$

Onde:

P - é a potencia dada em Watts

T - é o tempo de funcionamento do consumidor em horas/dia

Um módulo de 40w pode produzir uma potência de 150w/dia e custava perto de US\$300 (em 1990).

Assim, para redução dos custos pela quantidade módulos necessários, para uma dada aplicação, durante o dimensionamento de um sistema solar os consumos diários devem ser cuidadosamente reduzidos considerando o tempo útil de aproveitamento do funcionamento do consumidor de energia.

5.1.1 Determinação do consumo para sistema eléctrico solar

A voltagem da electricidade obtida de sistemas solares é de 12V .dc e 24V dc. Nestes sistemas é comum o uso de conversores e inversores [5].

Os conversores, são aplicados para reduzir a voltagem de 24V para 12V, porém são elementos muito caros e conseqüentemente pouco usados [5].

Os inversores têm a função de converter corrente contínua de baixa voltagem produzida pelo sistema solar, em corrente alternada de alta voltagem. Os inversores são necessários nos sistemas cuja energia produzida é para alimentação de dispositivos que funcionem somente com corrente alternada de voltagem superior a produzida pelo sistema solar.

5.1.2 Energia produzida por um módulo

No sistema eléctrico solar, o dimensionamento é complexo pois a energia gerada em cada dia, depende simultaneamente da capacidade do módulo e da intensidade da radiação que incide sobre o mesmo durante o dia. A insolação diária é a medida usada para estimar a produção de um módulo e toma em conta a variação do ângulo de inclinação do sol em relação a superfície horizontal [5].

O módulo solar é montado num ângulo igual ou superior a 15° para garantir o fluxo das correntes de água. O valor do ângulo é escolhido para otimizar o efeito da radiação sobre o módulo ao longo do ano. A melhor forma de escolher este ângulo é sobre a latitude do ângulo do lugar [5].

A produção diária de electricidade para um módulo em unidades de Wh/dia a 12V é calculada pela fórmula seguinte:

$$\text{PRODUÇÃO DIÁRIA DO MÓDULO} = I \times T_{sc} \times 12V \quad (\text{Wh/dia}) \quad (5.2)$$

Onde:

I - Corrente gerada por um módulo de 14V para uma irradiação de 1000W/m². Se possível pode-se usar a curva I-V para 1000W/m² na temperatura de operação que ronda a volta de 30°C (55°F).

T_{sc} – É a insolação diária dada para as goras de pico/dia

5.1.3 Determinação do número de módulos necessários

Ao determinar o número de módulos necessários é importante considerar as perdas de electricidade com o carregamento das baterias, considerada eficiência do carregamento.

O número mínimo de módulos necessários para uma determinada aplicação é calculado pela fórmula seguinte:

$$\frac{\text{Necessidade diária de energia (Wh/dia)} \times 100 (\%)}{\text{Produção o diária de um módulo (Wh/dia)} : \text{Eficiência do carregamento da bateria (\%)}} = \text{Número mínimo necessário de módulos} \quad (5.3)$$

5.1.4 Determinação do número de baterias

As baterias carregam-se durante o dia, na presença da luz solar e a sua energia é utilizada durante a noite. O período de armazenamento deve tomar em conta o número máximo de dias consecutivos com chuva ou céu nublado que deve ser 2 dias para zonas áridas como arábia saudita e 5 dias para zonas de baixa latitude. Para latitudes abaixo de 30° consideram-se 10 ou mais dias [5].

Outro propósito do uso de baterias é fornecer carga sazonalmente e cobrir as variações diárias da insolação entre meses. A capacidade de reserva é calculada para um período de 10 a 20 dias. É aconselhável usar baterias de alta qualidade [5].

A capacidade usual requerida é calculada a partir da necessidade diária de energia e do período de armazenamento, pela seguinte fórmula:

$$\begin{array}{c}
 \boxed{\text{Necessidade diária de energia (Wh/dia)}} \quad \times \quad \boxed{\text{Período de armazenamento pretendido (Wh/dia)}} \quad \times \quad \boxed{12 \text{ (V)}} \quad = \quad \boxed{\text{Capacidade usual total necessária (Ah a 12V)}} \\
 \text{(5.4)}
 \end{array}$$

O número de baterias necessárias é calculado a partir da capacidade usual e do ciclo de carregamento.

$$\begin{array}{c}
 \boxed{\text{Capacidade e usual total necessária (Ah a 12V)}} \quad \times \quad \boxed{100 \text{ (\%)}} \quad : \quad \boxed{\text{Capacidade específica para uma bateria de 12V (Ah)}} \quad : \quad \boxed{\text{Ciclo máximo de carregamento}} \quad = \quad \boxed{\text{Número mínimo necessário de baterias de 12V}} \\
 \text{(5.5)}
 \end{array}$$

5.2 Dimensionamento do sistema solar para bombeamento de água

Neste subcapítulo é apresentado o modelo de cálculo usado para o dimensionamento do sistema solar fotovoltaico para abastecimento de água. Toda a sequência de cálculo foi adaptada numa planilha de cálculo em Excel, o que permitiu a realização de diversas simulações mediante a escolha de diferentes características de painéis para a mesma necessidade de abastecimento. A comparação dos resultados obtidos conduz a identificação do caso mais económico e eficaz do ponto de vista de execução. Os resultados do cálculo estão apresentados no anexo 1 na forma em que se apresenta a folha de cálculo em excel.

5.2.1 Metodologia usada para o cálculo de dimensionamento

A primeira etapa para o dimensionamento de um sistema solar para bombeamento de água é a determinação da energia necessária para o bombeamento. Isto foi feito através do balanço de energia, que pressupõe que a energia demandada deve ser igual a energia gerada.

Em qualquer sistema energético adoptado para o bombeamento de água, o processo de dimensionamento começa com o cálculo básico da potência hidráulica (P_h) requerida, para elevar água a uma certa altura manométrica (H_m), uma determinada vazão (Q_m). Este cálculo é fundamental para a determinação do tipo e tamanho do sistema.

O esquema da instalação em projecção está representado na figura 5.1 onde estão indicadas todas as alturas importantes a considerar para o dimensionamento especificamente a altura dinâmica (H_{dt}), altura do reservatório (H_r), altura vertical (H_v) e a altura estática (H_{st}). Refira-se que o sistema usará uma bomba submersa para bombeamento de água, porém não foi efectuado o cálculo da altura de o seu posicionamento.

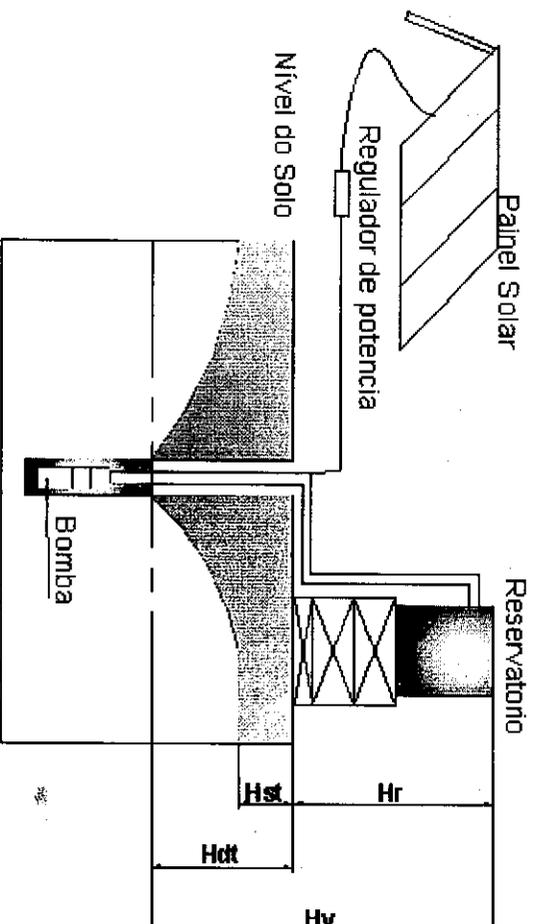


Figura 5.1 Esquema da instalação de bombeamento de água

O caudal mássico (Vazão) de água a bombear foi determinado pelo produto do número de pessoas a beneficiar-se da água da instalação e do consumo diário por pessoa. A vazão requerida (Q_m) deve tomar em conta a capacidade do poço. Ver tabela 5.1 do anexo 2. Esta instalação destina-se ao abastecimento de uma comunidade de 200 pessoas numa zona rural. Segundo dados obtidos da direcção nacional de águas, o consumo diário de água por pessoa nas zonas rurais, em Moçambique, situa-se na ordem de 20 litros.

Cálculo da altura manométrica (H_m)

A altura manométrica é calculada pela fórmula 5.1 e toma em conta as perdas na tubulação.

$$H_m = H_v + h_f + h_e \quad (5.1)$$

Onde:

H_v - Altura vertical (m).

h_f - Perda de carga ao longo da tubulação (m).

h_e - Perda de carga em pontos singulares (m).

A altura vertical (H_v) é determinada pela fórmula 5.1 onde a altura dinâmica é dada pelas características do furo. A altura dinâmica é a altura na qual mantém-se a água no poço durante o decurso do funcionamento da bomba.

$$H_v = H_{Dr} + H_r \quad (5.2)$$

As perdas de carga na tubulação (h_e) e nos pontos singulares (h_f) foram obtidas a partir de tabelas 5.2. e 5.3 do anexo 2.

Potência hidráulica e Energia hidráulica

A energia usada para a elevação de uma certa quantidade de água é denominada energia hidráulica e é directamente proporcional ao volume de água a elevar e à altura de elevação.

Uma vez conhecidas a vazão e a altura manométrica, é possível determinar a energia e potência reais necessárias para o bombeamento da água. A potência hidráulica e a energia hidráulica foram directamente determinadas a partir das fórmulas 5.3 e 5.4 respectivamente.

$$P_H = 2,725 \cdot Q_m \cdot H_m \quad (5.3)$$

Onde:

P_H - Potência hidráulica (W)

Q_m - Vazão (m^3/h)

H_m - Altura manométrica (m)

$$E_H = 2,725 \cdot Q_d \cdot H_m \quad (5.4)$$

Onde:

E_H - Energia hidráulica diária (Wh/dia).

H_m - Altura manométrica (m)

Q_d - Vazão (m^3/dia).

A energia hidráulica é convertida em energia eléctrica requerida (E_{bomba}) pela aplicação da equação (5.5).

$$E_{bomba} = \frac{E_H}{\eta_{bomba}} \quad (5.5)$$

Cálculo dos Parâmetros Fotovoltaicos

Apesar de o recurso solar ser gratuito, para que a energia radiante seja acessível em forma de energia eléctrica e produza trabalho, deve haver o elemento conversor (célula fotovoltaica), o qual, ainda apresenta elevado preço no mercado. Assim sendo, há a necessidade de que o dimensionamento seja preciso, uma vez que a unidade de conversão fotovoltaica é uma parte onerosa do sistema. Uma vez calculada a necessidade de energia para o sistema, escolhe-se o painel e procede-se com cálculo e segue-se ao cálculo verificativo de dimensionamento fotovoltaico. A sequência de cálculo dos parâmetros fotovoltaicos seguida neste estudo é apresentada a seguir.

1. Energia disponível na geração do painel fotovoltaico (E_{PV})

$$E_{PV} = P_{PV} \cdot T_{PSC} \quad [\text{Wh/dia}] \quad (5.6)$$

Onde:

P_{PV} – é a potência máxima para o painel escolhido e (V)

T_{PSC} – é a insolação dada em $[\text{kWh/m}^2]$

II. Necessidade energética (E_{need})

$$E_{need} = I_{need} \cdot V_{bat} \quad [\text{Wh/dia}] \quad (5.7)$$

Onde:

I_{need} – é a corrente necessária e calcula-se como o quociente da energia eléctrica necessária e da voltagem nominal em (V).

V_{bat} – é a voltagem da bateria em (V)

III. Necessidade energética mensal

$$E_{need\ mensal} = N \cdot E_{need} \quad [\text{Wh/mes}] \quad (5.8)$$

Onde:

N – é o número de dias do mês

IV. Total de energia disponível

Nem toda a energia gerada pelo painel é usada como energia de bombeamento devido a verificação de muitas perdas ao longo do processo, assim, a energia produzida pelos módulos fotovoltaicos deve ser maior que a energia necessária e é calculada pela equação (5.9).

$$E_{disp} = n_{PV} \cdot E_{PV} \geq E_{need} \quad [\text{Wh/dia}] \quad (5.9)$$

V. Corrente gerada nos painéis e nas baterias

$$I_{PV} = \frac{E_{PV}}{V_{PV}} \quad [\text{Ah}] \quad \text{ou} \quad I_{bat}^{disp} = \frac{E_{disp}}{V_{bat}} \quad [\text{Ah}] \quad (5.10)$$

VI. Corrente total necessária

$$I_{tot} = I_{need} \cdot f_r \cdot n_{aut} \quad [\text{Ah/dia}] \quad (5.11)$$

Onde:

f_r – é o factor de perdas

n_{aut} – Representa os dias de autonomia, que são os dias de céu coberto para cada mês.

VII. Corrente total mensal necessária para carregar as baterias

$$I_{tot\ mensa} = I_{tot} \cdot n_{dias} + I_{tot} \quad [\text{Ah/mês}] \quad (5.12)$$

VIII. Área ocupada pelos painéis

$$A_{tot} = n_{PV} \cdot A_{PV} \quad [\text{m}^2] \quad (5.13)$$

Para painéis rectangulares a equação (5.13) transforma-se para:

$$A_{tot} = n_{PV} \cdot A_{PV} = n_{PV} \cdot l_{PV} \cdot b_{PV} \quad [\text{m}^2] \quad (5.14)$$

Onde:

n_{PV} – é o número máximo entre os números de painéis calculados para cada mês.

IX. Condição a cumprir no projecto de para o cálculo de números de painéis

$$n_{PV} = \frac{I_{need}}{I_{PV}} \quad (5.15)$$

X. Cálculo do número de baterias

$$n_{bat} = \frac{I_{need_{sur}}}{I_{bat}} \quad (5.16)$$

XI. Tempo total de carregamento das baterias

$$t_{\text{carr}} = \frac{I_{\text{need}_{\text{carr}}}}{\eta_{\text{FV}} \cdot I_{\text{FV}}} \quad [\text{dias}] \quad (5.17)$$

XII. Saldo energético mensal

$$\Delta E_{\text{mensal}} = \eta_{\text{FV}} \cdot I_{\text{FV}} - I_{\text{need}} \quad [\text{Ah/mês}] \quad (5.18)$$

XIII. Saldo energético anual

$$\Delta E_{\text{anual}} = 4 \cdot \sum_{i=1}^{i=4} 3 \cdot \Delta E \quad [\text{Ah/mês}] \quad (5.19)$$

XIV. Potência máxima requerida

$$P_{\text{max}} = \frac{P_{\text{med}}}{f_{\text{carga}}} = \frac{E_{\text{need}}}{N \cdot f_{\text{carga}}} \quad (5.20)$$

6. CONCLUSÃO

O uso de energias renováveis não produz um efeito negativo sobre a natureza, facto que torna o seu uso mais atractivo e seguro para a humanidade. Nos países em vias de desenvolvimento como é o caso de Moçambique onde maior parte da população não tem acesso à energia eléctrica a exploração das fontes disponíveis de energia, constitui a alternativa viável para satisfação das inúmeras necessidades dependentes de energia. Assim, é importante o dimensionamento eficaz das condições de exploração das energias renováveis para garantir baixos custos de instalação e exploração dos sistemas de conversão.

No caso do bombeamento de água, analisado neste estudo, é importante dimensionar o sistema de maneiras a reduzir o custo pela aquisição dos módulos, um dos elementos mais caros da instalação. Os cálculos de dimensionamento devem oferecer um saldo energético aceitável, isto é, na negativo pra garantir a funcionalidade da instalação e também não muito positivo para adequar os custos económicos da instalação à capacidade energética necessária ao seu funcionamento. Para este fim, há que escolher características de painéis que possam produzir melhores resultados no funcionamento, estabelecendo uma relação óptima entre as potências necessária e disponível.

O estudo de abastecimento energético, por uma fonte renovável, deve tomar sempre em conta as fontes de energia renovável no local, as condições disponíveis para a aplicação ou exploração de cada tipo de energia e os custos de instalação e exploração também para cada fonte de energia, devendo assim, ser explorado o caso que oferecer melhor interação entre estes factores. Basicamente conclui-se da análise realizada, que o potencial de utilização da tecnologia de bombeamento com energia solar fotovoltaica não é desprezível, e já pode, no momento actual, ter um papel relevante no suprimento de água de comunidades rurais espalhadas por todo país.

7.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A ENERGIA SOLAR NA HABITAÇÃO, P. R Sabady, 3ª edição, 1979.
- [2] ENERGIA SOLAR, Pedro Portilho, 1985.
- [3] PHOTOVOLTAIC ENGINEERING HANDBOOK, F. Lasnier and TG Ang.
- [4] RENEWABLE ENERGY RESOURCES, John Twidell and Tony Weir 2a edição.
- [5] SOLAR ELECTRICITY (A Practical Guide to Designing and Installing Small Photovoltaic Systems), Simon Roberts, 1998.
- [6] SOLAR PUMPING, Roy Barlow, Bernard McNeils and Anthony Derrick, 1965.
- [7] TEXTO "MÓDULO SOBRE ENERGIAS RENOVÁVEIS", Prof. Doutor Boaventura Chongo Cuamba.

Endereços electrónicos

- [8] WWW.Aondevamos.energiasrenovaveis.com.br (23/03/06)
- [9] <http://www.cefetba.br/fisica/NFL/PBCN/solar/solardeu.html> (27/04/06)
- [10] <http://www.cresesh.cepel.br/tutorial/solar/apstenergiasolar.htm> (27/04/06)

ANEXOS

ANEXO 1

FOLHA DE CÁLCULO (Resultados)

ANEXO 2
TABELAS

Tabela 5.2 Coeficiente K de perda de carga para várias conexões

Conexões	K
Válvula esférica (totalmente aberta)	10
Válvula angular (totalmente aberta)	5
Válvula de retenção (totalmente aberta)	2,5
Válvula gaveta (totalmente aberta)	0,19
Curva de raio curto	2,2
T comum	1,8
Cotovelo comum	0,9
Cotovelo de raio médio	0,75
Cotovelo de raio longo	0,6

Tabela 5.3 Características do poço

Local do Furo	Profundidade Do furo (m)	Caudal (m ³ /h)	Aquífero	Nível Estático (m)	Nível Dinâmico (m)	Profundidade De imersão Da bomba (m)
Mbenhe	84	1	72.3 - 82	50.85	58.85	75
Lat: 24° 3						
Lon: 35°						

ANEXO 3
DESENHOS