SISTEMAS FOTOVOLTAICOS PARA BOMBEAMENTO DE ÁGUA

Daniel Augusto Pereira de Sá

PROJETO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO ELETRICISTA.

Aprovado por:	
	Prof. Jorge Luiz do Nascimento, Dr. Eng. (Orientador)
	Prof. Luís Guilherme Barbosa Rolim, Dr. Ing.
	Prof. Walter Issamu Suemitsu, Dr. Ing.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

NOVEMBRO DE 2010

AGRADECIMENTOS:

Primeiramente à minha família por tornar este momento possível e por servirem de inspiração.

Em segundo, mas não menos importante, à Marcela Jardim, minha companheira, por todas as nossas conversas e trocas. Obrigado por fazer parte da minha vida.

Aos amigos da Equipe Berimbal, meus companheiros que tornaram esta jornada um pouco mais prazerosa e engraçada.

Aos amigos do Pérola Verde por tudo que já passamos juntos.

Ao Professor Jorge Luiz, orientador deste trabalho e sempre disposto a ajudar.

E a todos aqueles que de alguma forma fizeram parte desta história...

RESUMO.

Uma das maiores preocupações do mundo atual é a necessidade de ser obter energia através de fontes limpas. Os sistemas fotovoltaicos surgem como alternativa para esse problema.

Este trabalho discutirá a utilização da energia solar fotovoltaica aplicada para o bombeamento de água. A partir dos casos que serão apresentados será possível analisar que a energia fotovoltaica é confiável e serve de solução para o problema de abastecimento residencial de água e também para o desenvolvimento da agricultura em regiões que não tem acesso a rede elétrica.

Sumário

1.	INTRODUÇÃO.	1
2.	ENERGIA SOLAR.	2
2.1	O EFEITO FOTOVOLTAICO.	2
2.2	APLICAÇÕES DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA.	5
3.	DEFINIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS.	7
3.1	ARRANJOS FOTOVOLTAICOS	7
3.2	BOMBAS.	8
3.2.1	BOMBA CENTRÍFUGA.	9
3.2.2	BOMBA AUTO-ESCORVANTE.	10
3.3	BATERIAS.	11
3.3.1	BATERIAS PARA USO EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	12
3.4	INVERSORES.	13
3.5	CONTROLADORES DE CARGA	15
4. ÁGU	APLICAÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS PARA O BOMBEAMENTO	
4.1	IRRIGAÇÃO.	
4.2	ABASTECIMENTO RESIDENCIAL.	18
4.3	CIRCULAÇÃO DE ÁGUA EM PISCINAS.	19
4.4	ESGOTAMENTO	19
4.5	REFRIGERAÇÃO.	20
4.6	PECUÁRIA	20

5.	ANÁLISE DOS SISTEMAS PROPOSTOS	21
5.1	BOMBEAMENTO DE ÁGUA PARA IRRIGAÇÃO	22
	REDUZINDO O TEMPO DE CARREGAMENTO DAS BATERIAS ENTANDO A CONFIABILIDADE DO SISTEMA	
5.1.2	INVESTIMENTO INICIAL	35
5.2	BOMBEAMENTO DE ÁGUA PARA USO RESIDENCIAL	35
	BOMBEAMENTO DE ÁGUA PARA USO RESIDENCIAL CON AZENAMENTO DE ENERGIA3	
	1 REDUZINDO O TEMPO DE CARREGAMENTO DAS BATERIAS ENTANDO A CONFIABILIDADE DO SISTEMA4	
5.2.1.2	2 INVESTIMENTO INICIAL4	1 5
	BOMBEAMENTO DE ÁGUA PARA USO RESIDENCIAL SEI AZENAMENTO DE ENERGIA4	
5.2.2.	1 INVESTIMENTO INICIAL5	53
6.	CONCLUSÃO.	54
7.	BIBLIOGRAFIA5	55

Índice de figuras

Figura 1 - Esquema simplificado de uma célula fotovoltaica.	3
Figura 2 - Curva característica V x I	4
Figura 3 - Curva característica V x P.	4
Figura 4 - Parâmetros de máxima potência	4
Figura 5 - Perfis de radiação solar diária com valores equivalentes de Sol Pleno	8
Figura 6 - Bomba centrífuga	9
Figura 7 - Bomba auto-escorvante	10
Figura 8 - Formas de ondas de inversores monofásicos.	14
Figura 9 - Forma de onda PWM senoidal.	15
Figura 10 - Diagrama esquemático de um controlador de carga	16
Figura 11 - Sistema de bombeamento fotovoltaico do Município de Capim Grande	18
Figura 12 - Sistema de bombeamento fotovoltaico de Santa Cruz I, São Paulo	19
Figura 13 - Sistema fotovoltaico para bombeamento de água para irrigação	22
Figura 14 - Curva NH para seleção de fusíveis.	32
Figura 15 - Desenho esquemático do sistema proposto	34
Figura 16 - Exemplificação de um sistema solar fotovoltaico, com armazenamento de en para bombeamento de água para uso residencial	_
Figura 17 - Desenho esquemático do sistema proposto	45
Figura 18 - Sistema fotovoltaico, sem armazenamento de energia, para bombeamento	46
Figura 19 - Sistema fotovoltaico proposto.	49
Figura 20 - Desenho esquemático do sistema proposto	53

Índice de tabelas

Tabela 1 - Radiação média mensal para o bairro de Santa Cruz - RJ	21
Tabela 2 - Especificações da bomba selecionada	23
Tabela 3 - Especificação dos painéis solares	23
Tabela 4 - Especificação das baterias.	26
Tabela 5 - Especificações do inversor	31
Tabela 6 - Especificações do controlador de carga	32
Tabela 7 - Estimativa do custo inicial do projeto.	35
Tabela 8 - Especificação da bomba selecionada	37
Tabela 9 - Especificações do controlador de carga	43
Tabela 10 - Estimativa do custo inicial do projeto.	45
Tabela 11 - Especificações da bomba selecionada.	47
Tabela 12 - Especificação do painel fotovoltaico selecionado	47
Tabela 13 - Características elétricas da motobomba alimentada em corrente contínua	50
Tabela 14 - Estimativa do custo inicial do projeto.	53

Lista de Símbolos Utilizados.

I	Corrente.
V	Tensão.
I_{SC}	Corrente de curto circuito da célula fotovoltaica.
V_{OC}	Tensão de circuito aberto da célula fotovoltaica.
P_{M}	Potência máxima da célula fotovoltaica.
V_{MP}	Tensão de máxima potência.
I_{MP}	Corrente de máxima potência.
P_{B}	Potência elétrica da bomba.
E_{B}	Energia consumida pela bomba.
SP	Número de horas a Sol Pleno.
E_{P}	Energia gerada por um painel fotovoltaico.
P_P	Potência de um painel fotovoltaico.
n	Número de painéis do arranjo fotovoltaico.
E_S	Energia gerada pela arranjo fotovoltaico.
E_{E}	Energia excedente.
C_B	Consumo da bomba.
C_R	Capacidade do banco de baterias.

- N_B Número de baterias utilizadas.
- d Dias necessários para a recarga do banco de baterias.
- ${I_{CC}}^A$ Corrente de curto circuito do arranjo fotovoltaico.
- I_M Corrente mínima necessária ao controlador de carga.
- p Número de controladores de carga em paralelo.

1. INTRODUÇÃO.

Devido a sua ampla aplicação, que vai desde fornecimento de energia à áreas remotas até sistemas que garantem a continuação do serviço em áreas urbanas, o aproveitamento da energia solar vem sendo umas das principais alternativas energéticas para o desenvolvimento do mundo atual.

Visto pelo lado do desenvolvimento social, a energia solar fotovoltaica desempenha um importante papel em áreas isoladas ao redor do mundo. A geração de energia elétrica a partir da conversão direta da luz em eletricidade garante o suprimento de água e luz para regiões que não tem acesso à rede de distribuição. Por outro lado, um sistema solar fotovoltaico pode ser usado de forma complementar para garantir o suprimento de energia elétrica nas regiões urbanas caso ocorra uma interrupção no fornecimento ou então como ferramenta para se economizar com a conta de luz.

Este trabalho possui dois objetivos principais. O primeiro deles pretende mostrar aplicações em que os sistemas fotovoltaicos para bombeamento de água possam ser utilizados. Alguns casos serão apresentados e em seguida comentados, mostrando seus prós e contras.

O segundo objetivo é dimensionar e projetar três sistemas fotovoltaicos. Um para irrigação, outro para o abastecimento de uma comunidade e por último um sistema para abastecimento residencial de forma individual. Para todos os casos será utilizado o método simplificado para o dimensionamento do sistema solar fotovoltaico. Ao final de cada caso será apresentada uma estimativa do investimento inicial para a implantação do mesmo.

2. ENERGIA SOLAR.

Energia solar é o nome dado a qualquer tipo de captação de radiação proveniente do sol e posterior transformação em alguma forma utilizável pelo homem. É a fonte de quase todos os recursos energéticos da Terra.

Existem diversas maneiras de se converter a energia solar e uma delas é através do efeito fotovoltaico que ocorre em dispositivos que são chamados de células fotovoltaicas.

2.1 O EFEITO FOTOVOLTAICO.

O efeito fotovoltaico consiste na propriedade dos semicondutores de apresentarem uma diferença de potencial quando atingidos por feixes de luz. Foi observado pela primeira vez em 1839 por Edmund Becquerel que produziu corrente elétrica expondo dois eletrodos de prata à luz^[1]. Em 1877 foi construída a primeira célula fotovoltaica sendo que esta apresentava um rendimento baixíssimo e consequentemente não houve desenvolvimento da mesma. Somente em 1954 foi publicado o primeiro artigo^[2] sobre células fotovoltaicas de Silício, que apresentavam um rendimento de aproximadamente 4,5%. O rendimento de uma célula fotovoltaica é definido como a razão entre a potência da luz incidente e a potência elétrica disponível nos terminais. A produção industrial da célula somente iniciou-se em 1956. Para células de silício, o valor máximo obtido é de aproximadamente 24,4%.

O Silício, que é utilizado na construção das células fotovoltaicas, é um material semicondutor e não possui uma condutividade elétrica muito elevada. Para contornar esta condição utiliza-se um processo chamado *dopagem*, onde outros elementos são misturados ao cristal de Silício. No caso das células fotovoltaicas, o Silício passa por dois processos de dopagem; um com Fósforo (Silício tipo N) e outro com Bóro (Silício tipo P).

Cada uma das células apresenta uma fina camada de material tipo N e outra de material tipo P, como pode ser visto na *Figura 1*.

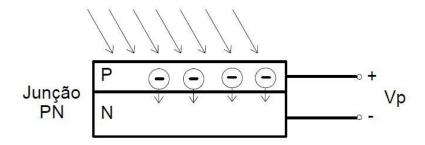


Figura 1 - Esquema simplificado de uma célula fotovoltaica.

Quando há incidência de luz sobre a célula fotovoltaica, há a formação de um campo elétrico entre as camadas P e N e os elétrons são orientados a fluírem da camada P para a camada N. É importante frisar que separadamente as camadas são eletricamente neutras.

Cada célula com cerca de 100 mm² gera em seus terminais uma tensão entre 0,5 e 1 V. Como o valor é muito baixo, as células são montadas em série para alcançar tensões da ordem de 12 V em corrente contínua. Estes módulos podem ser utilizados individualmente, em série e/ou em paralelo dependendo da aplicação dos mesmos.

As curvas características "V x I", "V x P" e os parâmetros de máxima potência de uma célula de silício para um certo valor de radiação podem ser observadas nas *Figuras 2, 3 e 4*.

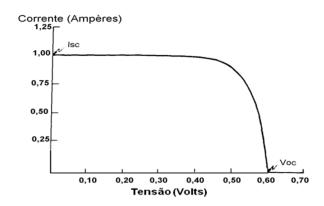


Figura 2 - Curva característica V x I.

Adaptado do Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos, CEPEL.

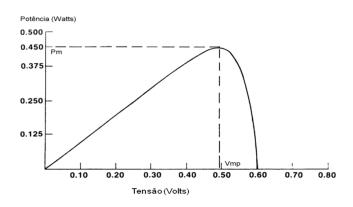


Figura 3 - Curva característica V x P.

Adaptado do Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos, CEPEL.

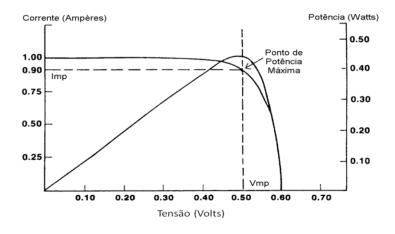


Figura 4 - Parâmetros de máxima potência.

Adaptado do Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos, CEPEL.

Das figuras mostradas acima, temos que: I_{SC} corresponde a corrente de curto circuito da célula, V_{OC} é a tensão de circuito aberto, P_m é a potência máxima, V_{mp} é a tensão de máxima potência e I_{mp} é a corrente de máxima potência.

De acordo com a *Figura 4*, o ponto de máxima potência é aquele para o qual a máxima potência é extraída do painel fotovoltaico e se localiza no "joelho" da curva V x I. Logo, para esse ponto da curva apresentada, o produto da tensão pela corrente apresenta o seu maior valor.

2.2 APLICAÇÕES DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA.

Qualquer tipo de carga acionada por eletricidade é passível de alimentação via energia solar fotovoltaica, basta que o sistema seja corretamente projetado. As aplicações mais comuns são apresentadas abaixo.

- Irrigação;
- Alimentação de equipamentos de telecomunicação em locais remotos;
- Fornecimento de energia a pequenos povoados ou residências individuais;
- Sistemas de emergência;
- Sinalização de estradas e portos;
- Cerca elétrica;
- Bombeamento de água;
- Equipamentos de uso marítimo;

• Iluminação de áreas abertas (praças, jardins, estacionamentos, áreas de lazer).

Para este trabalho, serão considerados apenas sistemas que envolvam bombeamento de água. No *Capítulo 4* serão apresentadas algumas dessas aplicações com suas vantagens e desvantagens.

3. DEFINIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS.

Neste capítulo, iremos apresentar a teoria referente aos equipamentos que serão utilizados para o dimensionamento dos sistemas fotovoltaicos que serão estudados mais a frente.

3.1 ARRANJOS FOTOVOLTAICOS

Arranjo fotovoltaico é o conjunto por módulos fotovoltaicos ligados eletricamente entre si e que funcionam como um único gerador de energia elétrica. Como dito anteriormente, os módulos podem ser ligados entre si em paralelo ou em série, dependendo da sua aplicação. Quando é feita a ligação série, as tensões são somadas e a corrente permanece inalterada. Quando temos uma ligação em paralelo, as tensões nas células são iguais e as correntes são somadas.

Para o correto dimensionamento dos módulos, é necessário que se conheça o comportamento da carga bem como o seu ciclo de utilização. Deve-se levar em consideração também alguns fatores que influenciam na potência de saída dos painéis, tais como:

- Sombreamento devido a projeção do que se encontra ao redor;
- Intensidade luminosa;
- Inclinação;
- Temperatura das células;
- Nebulosidade.

Um dado de extrema importância é o número de horas de *Sol Pleno*, que corresponde ao número equivalente de horas com radiação constante e igual a 1 kW/m², de forma que a energia total diária acumulada é mantida^[1]. A *Figura 5* mostra dois perfis de radiação solar diária onde a área da figura formada pela curva corresponde à quantidade de energia acumulada no período em questão. Dividindo-se a área da curva pelo valor de 1 kW/m² encontraremos o total de horas a Sol Pleno.

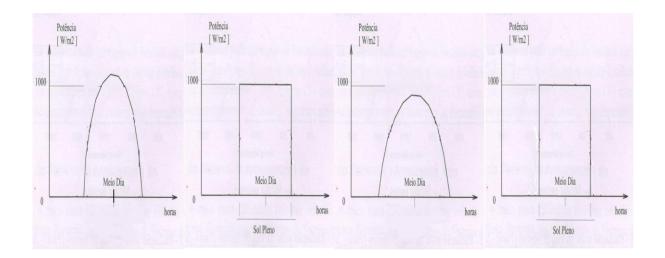


Figura 5 - Perfis de radiação solar diária com valores equivalentes de Sol Pleno.

Disponível no Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos, CEPEL.

3.2 BOMBAS.

Bomba é o dispositivo que adiciona energia aos líquidos e tem como finalidade facilitar o movimento dos mesmos^[3]. A energia é tomada de um eixo, de uma haste ou de um outro fluido e transmitida através do aumento de pressão, aumento de velocidade ou aumento de elevação — ou combinação destas formas de energia. As bombas de uma maneira geral apresentam as seguintes características:

- Resistência: adequadas para resistir aos esforços mecânicos provenientes da operação;
- Facilidade de operação: adaptáveis às mais diversas fontes de energia;
- Manutenção simplificada;
- Alto rendimento: transformação de energia com o mínimo de perdas.
- Economia: custos de aquisição e operação compatíveis com as condições de mercado.

Existe uma infinidade de tipos de bombas, porém para este trabalho serão consideradas apenas as bombas do tipo centrífuga e auto-escorvante.

3.2.1 BOMBA CENTRÍFUGA.

É o tipo de bomba mais utilizado para bombeamento de água. Seu funcionamento se dá em consequência da rotação de um eixo no qual é acoplado um disco dotado de hélices (rotor). O eixo recebe o fluido pelo seu centro e o expulsa para os lados devido à ação da força centrífuga.



Figura 6 - Bomba centrífuga.

Disponível em http://www.schneider.ind.br/.

3.2.2 BOMBA AUTO-ESCORVANTE.

Bomba auto-escorvante é aquela que retira líquido de um reservatório que fica a um nível inferior a ela, ou seja, não precisa trabalhar inundada ao líquido. No momento da partida, o líquido retido em reservatório auxiliar da bomba é liberado e preenche a tubulação, dando condições de partida à bomba. A maioria das bombas, a centrífuga por exemplo, não conseguem puxar líquido nesta condição devido ao ar existente na tubulação. Daí a necessidade de ser ter bombas auto-escorvantes.

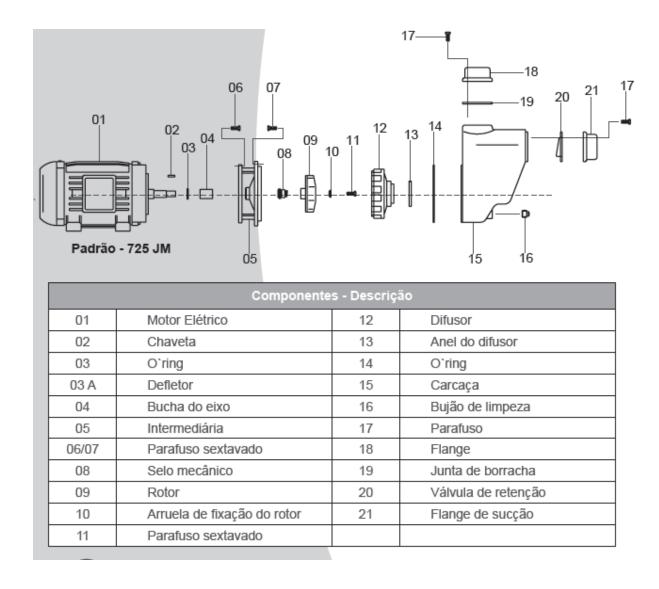


Figura 7 - Bomba auto-escorvante.

Disponível em http://www.dancor.com.br/.

3.3 BATERIAS.

Bateria é um dispositivo que armazena energia química e a disponibiliza sob a forma de energia elétrica. Podem ser classificadas em recarregáveis e não-recarregáveis

As baterias não recarregáveis são compostas por células primárias e possuem vida útil limitada. Seu ciclo chega ao fim assim que são descarregadas por completo. São normalmente utilizadas para aplicações de baixa potência.

As células secundárias são encontradas nas baterias recarregáveis e são comumente chamadas de baterias de armazenamento. São baterias de uso geral, utilizadas nas mais diversas aplicações, podendo ser usadas durante longos períodos.

Para cada tipo de bateria existe uma infinidade de formas de construção e uma outra grande variedade de materiais que as compõe. Atualmente, as baterias recarregáveis mais utilizadas são compostas de chumbo-ácido e íon lítio. Quanto à aplicação, podem ser classificadas como:

- Automotivas são aquelas que projetadas para descargas rápidas com alta taxa de corrente e baixa profundidade de descarga.
- Tração são projetadas para operar em regime de ciclos diários profundos e com taxa de descarga moderada
- Estacionárias baterias que permanecem em flutuação e são solicitadas ocasionalmente para ciclos de carga e descarga. São utilizadas em sistemas de emergência.

 Fotovoltaicas - são aquelas que devem suportar descargas profundas quando solicitadas na ausência de Sol.

Uma outra forma de se classificar as baterias recarregáveis é quanto à forma de confinamento do eletrólito. Assim sendo, podem ser:

- Abertas: quando há a necessidade de se verificar o nível do eletrólito.
- Seladas: também conhecidas como "sem manutenção", pois não necessitam da adição de líquido.

A eficiência das baterias recarregáveis está diretamente relacionada com a forma com que é utilizada. Alguns procedimentos podem ser tomados para aumentar a vida útil da bateria; são eles: manutenção do estado de carga, operação em ambientes de temperatura controlada e controle de sobrecarga.

3.3.1 BATERIAS PARA USO EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.

Para utilização em sistemas fotovoltaicos, a bateria deve atender a dois tipos de ciclos: ciclos rasos a cada dia e ciclos profundos por vários dias. Outros fatores que devem ser observados:

- Baixa taxa de auto-descarga (processo espontâneo em que a bateria descarrega através de processos químicos internos);
- Elevada vida cíclica (número de ciclos que uma bateria pode ser submetida antes de apresentar falhas que comprometam o seu correto funcionamento);

 Confiabilidade (capacidade de atender a carga de forma ininterrupta e sem falhas durante o seu ciclo de funcionamento).

As mais utilizadas em sistemas fotovoltaicos são as baterias de chumbo-ácido, porém as baterias de níquel-cádmio são as que apresentam características mais próximas das ideais; porém seu elevado custo impede que seja utilizada em larga escala.

3.4 INVERSORES.

Inversor é um dispositivo elétrico que utiliza um mecanismo de chaveamento (transistores, IGBT ou MOSFET) para alternar o fluxo de corrente sendo assim capaz de converter corrente contínua(CC) em corrente alternada(CA). Normalmente possui tensão de entrada de 12, 24 ou 48 V (CC) e converte em 127 ou 220 V (CA). Com isso, é possível utilizar equipamentos projetados para funcionar em corrente alternada a partir de uma fonte de corrente contínua.

Os inversores são classificados de acordo com a forma de onda produzida em corrente alternada. Podem ser encontrados nas seguintes formas:

- Inversores de onda quadrada: apresentam muitos harmônicos na saída. Geralmente utilizado para cargas resistivas.
- Inversores de onda quadrada modificada: apresentam menor distorção harmônica e a forma de onda da saída aproxima-se mais de uma onda senoidal. Adequado para alimentar lâmpadas, equipamentos eletrônicos e motores.

- Inversor de onda senoidal: são os que produzem tensão de saída e desempenho mais adequados. Podem operar qualquer aparelho CA.
- PWM: baixa distorção harmônica apesar do aspecto visual da forma de onda. Não é
 indicado para equipamentos muito sensíveis uma vez que apresenta picos de tensão e
 com isso pode atrapalhar o funcionamento do equipamento em questão..

A Figura 8 mostra as formas de ondas típicas de inversores monofásicos.

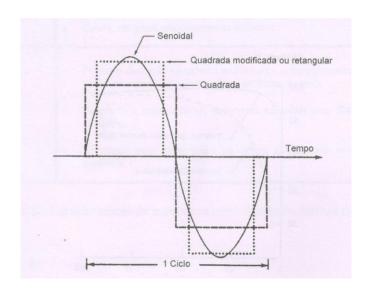
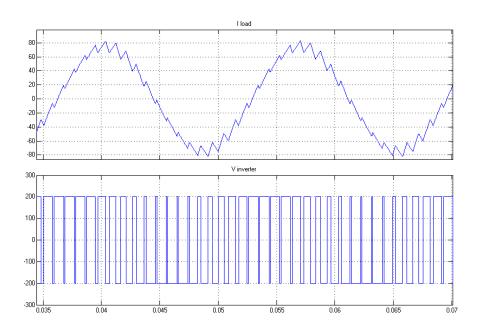


Figura 8 - Formas de ondas de inversores monofásicos.

Disponível no Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos, CEPEL.

Um exemplo de onda PWM senoidal é mostrada na Figura 9.



 $Figura \ 9 - Forma \ de \ onda \ PWM \ senoidal.$

Disponível em http://www.phph.com.br/Maquinas-Eletricas/

A forma de onda está diretamente relacionada com a qualidade e o custo do inversor. Sua eficiência geralmente está na faixa de 50 a 90%.

3.5 CONTROLADORES DE CARGA.

Estão presentes na maioria dos sistemas fotovoltaicos e são responsáveis pela máxima transferência de potência do arranjo fotovoltaico para o banco de baterias com a finalidade de carregá-las corretamente^[4]. Possuem função de proteção contra corrente reversa, carga e descarga excessiva das baterias e sobrecorrente. Também são conhecidos por "Gerenciador de carga", "Regulador de carga" ou "Regulador de tensão".

Seu funcionamento se dá através da leitura da tensão das baterias para determinar o seu estado de carga. Os circuitos internos dos controladores variam, mas a maioria dos

controladores fazem a leitura da tensão para controlar a intensidade de corrente que flui para as baterias na medida em que estas se aproximam da sua carga máxima.

Para o seu correto dimensionamento, primeiramente leva-se em consideração o tipo de bateria que será utilizada e em seguida determina-se a tensão e corrente de operação do sistema. O controlador mais utilizado é o do tipo *shunt* que tem um menor consumo se comparado ao regulador série.

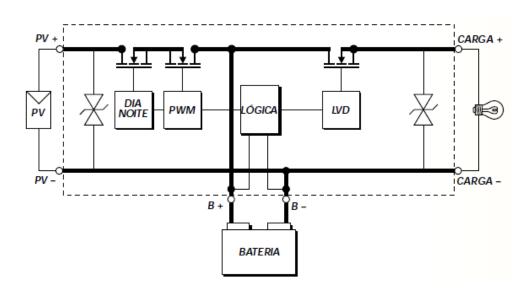


Figura 10 - Diagrama esquemático de um controlador de carga. http://www.kyocerasolar.com.br/site/arquivos/produtos/19.pdf

4. APLICAÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS PARA O BOMBEAMENTO DE ÁGUA.

Sistemas fotovoltaicos para bombeamento são umas das principais e mais vantajosas aplicações da energia solar. Neste capítulo serão discutidas algumas aplicações de sistemas fotovoltaicos para o bombeamento de água.

4.1 IRRIGAÇÃO.

Consiste em bombear a água de um reservatório diretamente para o campo a ser irrigado. É uma alternativa bastante viável para o desenvolvimento da agricultura, uma vez que as plantações se encontram em áreas distantes e muitas vezes não são atendidas pela rede de distribuição de energia elétrica.

Essa tecnologia já vem sendo empregada no Brasil, e dois casos servirão de exemplo para ilustrar tal situação. Temos no Município de Capim Grande, na Bahia^[5], um sistema formado por 16 painéis M55 da Siemens e uma bomba de superfície Mc Donald de 1cv CC que em época de cheia chega a bombear até 12m³ de água por dia, e no Município de Pão de Açúcar, em Alagoas, um outro sistema que é capaz de irrigar 1ha através do bombeamento de 40m³ de água por dia^[6].

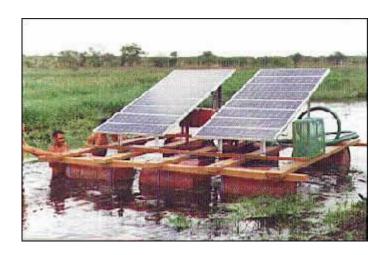


Figura 11 - Sistema de bombeamento fotovoltaico do Município de Capim Grande.

Disponível em http://www.cresesb.cepel.br/cresesb.html.

Temos a possibilidade de utilizar uma outra configuração que possibilita o armazenamento de energia e assegura a irrigação para dias em que a energia gerada pelos painéis fotovoltaicos não é suficiente para suprir a demanda da carga. Dessa forma, a irrigação está garantida independentemente da condição climática momentânea.

4.2 ABASTECIMENTO RESIDENCIAL.

O abastecimento residencial é um dos usos mais difundidos e viáveis. O sistema pode ser dimensionado para atender uma residência individualmente ou uma pequena comunidade. Temos alguns exemplos espalhados pelo Brasil.

Não necessita de armazenamento de energia, uma vez que a água bombeada pode ser estocada em reservatórios e depois usada. Apesar de não ser necessário, a utilização de banco de baterias dá uma maior confiabilidade ao sistema evitando que haja desabastecimento.



Figura 12 - Sistema de bombeamento fotovoltaico de Santa Cruz I, São Paulo.

4.3 CIRCULAÇÃO DE ÁGUA EM PISCINAS.

O arranjo fotovoltaico gera energia elétrica necessária para o funcionamento da bomba durante o processo de filtragem e circulação da água na piscina. É uma alternativa pouco explorada por apresentar um alto investimento inicial para um uso que não é essencial.

4.4 ESGOTAMENTO.

O sistema pode ser utilizado para esgotar água de poços artesianos, de minas, de garagens e subestações alagadas pelo excesso de chuva. É visto como sistema de emergência em caso de interrupção no fornecimento de energia elétrica pela rede ou dano às instalações de suprimento de energia. É necessário que se use um banco de baterias com uma boa autonomia para garantir que a água será esgotada mesmo em períodos de chuva constante.

Muitas vezes a sua utilização é contestada já que os locais onde esse sistema pode ser instalado ficam em áreas urbanas ou com acesso direto à rede de distribuição. Nesses casos, a alternativa é a utilização de uma unidade de fonte de alimentação ininterrupta (UPS).

4.5 REFRIGERAÇÃO.

É uma aplicação de uso industrial. A água bombeada de um reservatório é utilizada para o resfriamento forçado de um equipamento. O sistema é formado por um arranjo fotovoltaico, controlador de carga, banco de baterias, inversor e bomba e tem como objetivo reduzir o valor pago à concessionária de energia.

4.6 PECUÁRIA

Sistema utilizado em bebedouros de animais no campo. A água será bombeada e então consumida no pasto. É composta por um sistema fotovoltaico sem armazenamento de energia e surge como alternativa para a expansão da pecuária.

5. ANÁLISE DOS SISTEMAS PROPOSTOS.

Como dito anteriormente, neste trabalho serão projetados um sistema fotovoltaico para bombeamento de água voltado para a irrigação e outros dois para o abastecimento residencial utilizando-se o método simplificado para o dimensionamento do sistema.

Serão criados três casos fictícios, apenas com fins de estudo, com localização na cidade do Rio de Janeiro, bairro de Santa Cruz (Latitude: 22,902777° SUL, Longitude: 43,207500° OESTE). O dimensionamento do sistema fotovoltaico será feito baseado no índice de radiação diária média mensal medida pelo *CRESESB*.

		RADIAÇÃO DIÁRIA MÉDIA MENSAL (kWh/m².dia)												
Ângulo	Inclinação	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
Plano Horizontal	O° N	5,86	5,67	5,22	4,06	3,83	3,22	3,78	4,06	4,22	4,86	5,28	5,61	4,64
Ângulo igual a latitude	23° N	5,29	5,41	5,38	4,56	4,76	4,14	4,85	4,77	4,47	4,74	4,85	5,01	4,85
Maior média anual	21° N	5,36	5,45	5,39	4,54	4,70	4,08	4,78	4,73	4,47	4,77	4,91	5,08	4,85
Maior mínimo mensal	34° N		5,07	5,23		5,00	4,41	5,15	4,90	4,41	4,50	4,47	4,55	4,76

Tabela 1 - Radiação média mensal para o bairro de Santa Cruz - RJ.

Fonte: CRESESB - http://www.cresesb.cepel.br

5.1 BOMBEAMENTO DE ÁGUA PARA IRRIGAÇÃO.

O sistema será composto por um arranjo fotovoltaico, um controlador de carga, um banco de baterias, um inversor e uma motobomba. A captação de água será feita diretamente de um rio que passa ao lado da área a ser irrigada e a altura manométrica total a ser considerada será de 8 mca.

A energia gerada pelo arranjo fotovoltaico alimentará a motobomba e o seu excedente será armazenado pelo banco de baterias e poderá ser usado caso a energia gerada nos terminais dos painéis não seja suficiente para acionar a carga.

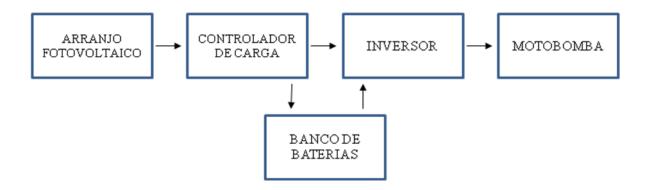


Figura 13 - Exemplificação do sistema fotovoltaico para bombeamento de água para irrigação.

Começaremos estimando a quantidade total de água que será necessária para irrigar completamente o terreno. Considerando que nos meses de verão a quantidade de água necessária pode chegar aos 6 L/m² por dia^[7] e o terreno possui 8000m² então, teremos que bombear 48000 L por dia.

Agora que sabemos a quantidade de água a ser bombeada, poderemos escolher a bomba que será utilizada. Foi escolhida uma bomba monofásica, auto-escorvante do fabricante *DANCOR* modelo 709 S que é movida por um motor *WEG*. Para essa situação, a vazão da bomba é de 18,5 m³/h e ela trabalhará por 2,60 horas (156 minutos).

MODELO	POTÊNCIA	TENSÃO	CORRENTE
	(cv)	(V)	(A)
709 S	1	110	14,4

Tabela 2 - Especificações da bomba selecionada.

A potência elétrica máxima (P_B) dessa bomba é dada pelo produto da corrente pela tensão e vale:

$$P_B = V \times I;$$

$$P_B = 110 \text{ V x } 14,4 \text{ A};$$

$$P_B = 1584 \text{ VA}.$$

Os painéis solares escolhidos são fabricados pela *KYOCERA*^[8]. As especificações do modelo escolhido são apresentadas abaixo:

MODELO	MÁXIMA	MÁXIMA TENSÃO DE			
	POTÊNCIA	MÁXIMA	MÁXIMA		
	(W)	POTÊNCIA	POTÊNCIA		
		(V)	(A)		
KC 130T	130	17,6	7,39		

Tabela 3 - Especificação dos painéis solares.

Observação: As especificações elétricas estão sob condições de teste de irradiação de 1 kW/m², espectro de 1,5 de massa de ar e temperatura de célula de 25°C.

Para o correto dimensionamento do arranjo fotovoltaico é preciso saber qual a energia utilizada pela bomba durante o período em que ela permanecer em funcionamento. Já foi dito anteriormente que a mesma funcionará por 2,60 horas por dia. Então, a energia da bomba será dada por:

$$E_B = P_B \times t$$
;

$$E_B = 1584 \times 2,60;$$

$$E_B = 4118,4 \text{ Wh/dia}.$$

Para calcular a energia gerada por um painel fotovoltaico (E_P), multiplicaremos a potência do painel fotovoltaico (P_P) pelo tempo de horas a *Sol Pleno*. Calcularemos o número de horas a *Sol Pleno* para a situação mais extrema e será utilizada a condição de *maior mínimo mensal*. Junho é o mês com menor média mensal, e é importante que se consiga a maior quantidade possível de energia acumulada. Para tal, utilizaremos o arranjo fotovoltaico com inclinação de 34° N e teremos um total de 4,41 kWh/m² conforme indicado na *Tabela 1*. Por definição, o número de horas a *Sol Pleno* para este caso é:

$$\mathrm{SP} = \frac{4{,}41\frac{kWh}{m^2.\,dia}}{1\frac{kW}{m^2}} = 4{,}41\frac{h}{dia}$$

Agora poderemos calcular a energia gerada por um único painel, que será:

$$E_P = P_P \times SP$$
;

$$E_P = 130 \times 4,41;$$

$$E_P = 573,3 \text{ Wh/dia.}$$

O número mínimo de painéis que formarão o arranjo fotovoltaico é dado pelo resultado aproximado da divisão da energia da bomba (E_B) pela energia gerada por um único painel (E_P) .

$$n = E_B \div E_P$$
;

$$n = 4118,4 \div 573,3$$

$$n = 7,184$$
 painéis.

O resultado será arredondado para cima e será utilizado um arranjo de 8 painéis ligados em paralelo para conseguir a energia diária de suprimento (E_S) que será calculada a seguir:

$$E_S = E_P \times n$$
, para n=8

$$E_S = 573,3 \times 8$$

$$E_S = 4586,4 \text{ Wh/dia}.$$

A diferença entre a energia diária de suprimento e a energia da bomba é o excedente $(E_{\rm E})$ de energia produzido e será utilizado para carregar o banco de baterias.

$$E_E = E_S - E_B$$
;

$$E_E = 4586,4 - 4118,4;$$

$$E_E = 468 \text{ Wh/dia.}$$

Para o dimensionamento do banco de baterias, foram consideradas situações extremas de escassez de radiação solar, como por exemplo em dias chuvosos. A escolha das baterias foi feita considerando que a mesma deveria ter capacidade para descargas profundas, uma longa

vida útil e deveria ser desenvolvida para aplicação em sistemas fotovoltaicos. Seguindo esse raciocínio, escolhemos baterias da marca *SUNLAB* ^[9].

MODELO	CAPACIDADE	TENSÃO	CAPACIDADE
	(Ah)	(V)	PARA
			DESCARGA
SUNLAB 115	115	12	90%

Tabela 4 - Especificação das baterias.

Estabeleceu-se que o banco de baterias deverá ter uma autonomia de 3 dias, ou seja, será capaz de suprir energia à carga durante esse período. Como o sistema é projetado para a irrigação, a presença de chuva não compromete o desenvolvimento da atividade, sendo assim, 3 dias de autonomia dão a confiabilidade necessária ao sistema.

Os cálculos para dimensionamento do banco de baterias foram baseados no consumo da carga, que será constante durante um dia. O consumo normalmente é dado em termos de Ampere-hora e esse dado não está disponível. Para contornar este problema, dividiremos a energia da bomba (E_B) pela tensão nos terminais da bateria (12 V). Então, o consumo da bomba (C_B) em Ampere-hora por dia será:

$$C_B = E_B \div 12$$
;

 $C_B = 4118, 4 \div 12;$

 $C_B = 343,2$ Ah/dia.

Devemos levar em consideração a eficiência do sistema de conversão de energia que gira em torno de 70%. Teremos então que corrigir o consumo da bomba acrescentando esse fator de eficiência. O consumo corrigido da bomba (C_B') será:

$$C_{B}' = C_{B} \div 0.7;$$

$$C_B' = 490,29 \text{ Ah/dia.}$$

Podemos agora calcular a capacidade do banco de baterias (C_R) . Sendo o consumo da bomba de 490,28 Ah por dia, para 3 dias teremos:

$$C_R = 490,28 \times 3;$$

$$C_R = 1470,84$$
 Ah.

Levando-se em conta que as baterias possuem 90% de capacidade de descarga, então a capacidade do banco de baterias deverá ser de:

$$C_R = 1470,84 \div 0,9;$$

$$C_R = 1634,3$$
 Ah.

Essa capacidade deverá ser dividida entre algumas baterias. Para descobrir quantas serão necessárias basta dividir a capacidade do banco de baterias (C_R) pela capacidade de uma única bateria (115 Ah), e então:

$$N_B = C_R \div 115;$$

$$N_B = 1634,3 \div 115;$$

$$N_B = 15;$$

Teremos 15 baterias ligadas em paralelo para suprir a demanda da carga por 3 dias. Com o intuito de diminuir a corrente do banco de baterias e assim economizar com a fiação do sistema, recomenda-se que a tensão do sistema seja elevada para 48 V.

A recarga da bateria é feita simultaneamente ao funcionamento da bomba. Considerando a energia excedente diária (E_E) e transformando-a para Ampere-hora, teremos:

$$E_E = 468 \div 12$$
;

$$E_E = 39 \text{ Ah/dia}.$$

Para sabermos quantos dias serão necessários para recarregar a bateria, basta dividir a capacidade do banco de baterias (C_R) pelo excedente de energia diário e assim teremos:

$$d = C_R \div E_E;$$

$$d = 1634,3 \text{ Ah} \div 39 \text{ Ah/dia};$$

$$d = 41,9 \text{ dias.}$$

Caso ocorra descarga completa do banco de baterias, serão necessários 37,71 dias para a recarga total do sistema. Lembrando que enquanto a bomba está em funcionamento, as baterias são carregadas com o excedente gerado. Esse sistema não é muito confiável, já que são necessários muitos dias para se chegar a condição inicial. Para contornar este problema, adicionaremos mais painéis e consequentemente teremos um maior excedente de energia gerado.

5.1.1 REDUZINDO O TEMPO DE CARREGAMENTO DAS BATERIAS E AUMENTANDO A CONFIABILIDADE DO SISTEMA.

Utilizando o mesmo raciocínio que foi anteriormente empregado, e não alterando as características do banco de baterias e nem as do conjunto motobomba, podemos calcular a energia de suprimento para o novo arranjo fotovoltaico. Vamos considerar que se deseja recarregar as baterias em até d'=7 dias. Para isso teremos que encontrar a nova energia excedente $(E_{\rm E}')$ gerada pelos painéis:

$$E_E{'}=C_R\div d{'}$$

$$E_{E}' = 1634,3 \div 7;$$

 $E_E' = 233,47$ Ah/dia; transformando para Watt-hora:

$$E_{E'} = 233,47 \text{ x } 12;$$

$$E_{E'} = 2801,64 \text{ Wh/dia.}$$

Para encontrarmos a nova energia diária de suprimento (E_S') , somaremos a energia da bomba (E_B) com a nova energia excedente $(E_{E'})$:

$$E_{S}' = E_{B} + E_{E}';$$

$$E_{S}' = 4118,4 + 2801,64;$$

$$E_S' = 6920,04 \text{ Wh/dia}.$$

Para encontrar o número de painéis necessários para suprir essa quantidade de energia basta dividir a nova energia diária de suprimento (E_S') pela energia de um único painel (E_P) :

$$n' = E_S' \div E_P;$$

$$n' = 6920,04 \div 573,3;$$

n' = 12,07 painéis.

Arredondaremos o resultado e utilizaremos n'=12 painéis. Com um arranjo de 12 painéis fotovoltaicos, teremos uma nova energia diária de suprimento $(E_S^{\ 12})$ que será:

$$E_S^{12} = E_P \times 12;$$

$$E_S^{12} = 573,3 \times 12;$$

$$E_S^{12} = 6879,6 \text{ Wh/dia.}$$

O novo excedente (E_E¹²) gerado pelo arranjo de 12 painéis fotovoltaicos será:

$$E_{E}^{12} = E_{S}^{12} - E_{B};$$

$$E_E^{12} = 6879,6 - 4118,4;$$

 $E_E^{12} = 2761,2$ Wh/dia; transformando para Ampere-hora:

$$E_E^{12} = 2761, 2 \div 12;$$

$$E_E^{12} = 230,1 \text{ Ah/dia.}$$

E o número de dias (d¹²) que serão necessários para recarregar a bateria é dado por:

$$d^{12} = C_R \div E_E{}^{12};$$

$$d^{12} = 1634, 3 \div 230, 1;$$

$$d^{12} = 7,1 \text{ dias.}$$

Com um arranjo de 12 painéis fotovoltaicos, serão necessários 7,1 dias para recarregar por completo o banco de baterias.

Agora que já temos a configuração final do sistema, podemos dimensionar o inversor e o controlador de carga.

O inversor foi escolhido levando-se em consideração a potência total da carga, a forma de onda na saída e a corrente de partida do motor. Para motores de indução monofásicos, a corrente de partida pode chegar a ser seis vezes maior do que a corrente nominal. Portanto, será necessário utilizar um inversor que suporte essa corrente de pico. O inversor que será utilizado, é fabricado pela *Xantrex*^[9], e terá forma de onda senóide modificada na saída, devido ao custo mais barato se comparado a um inversor de onda senoidal pura.

MODELO	POTÊNCIA	POTÊNCIA DE	TENSÃO DE	TENSÃO DE
	NOMINAL	SURTO	ENTRADA	SAÍDA
	(W)	(W)	(V)	(V)
XP 5000-UL	4000	10000	12 CC	115 ± 5%

Tabela 5 - Especificações do inversor.

Dimensionaremos agora um sistema de proteção contra curto circuito. De acordo com o catálogo da *WEG* ^[11], esse motor possui uma corrente de partida 5 vezes maior do que a corrente nominal, ou seja, a corrente de partida vale 72 A. O tempo de partida do motor é de 5s e de acordo com a curva do fusível NH (*Figura 13*), um fusível de 25 A será suficiente para proteger o motor da bomba. Para proteção contra sobrecarga, será utilizado um disjuntor monopolar de 16 A.

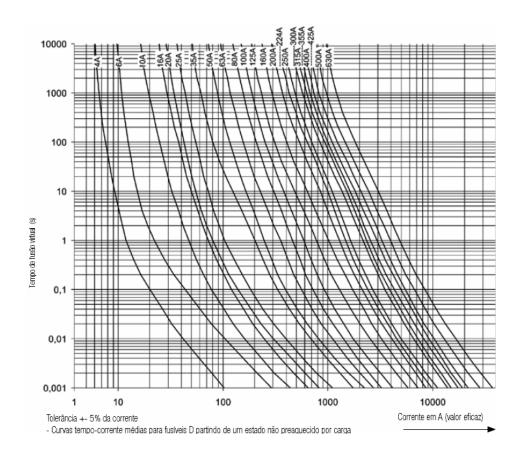


Figura 14 - Curva NH para seleção de fusíveis [11].

É importante frisar que o aterramento do motor elétrico se faz obrigatório conforme consta na NBR 5410^[12]. Este procedimento é utilizado para proteger as pessoas contra choque elétrico quando em contato com as partes metálicas eventualmente energizadas, permitindo uma utilização confiável e correta da instalação.

Os controladores de carga são fabricados pela *MORNINGSTAR* e foram escolhidos de acordo com a corrente de curto circuito do arranjo^[13]. O cálculo será apresentado abaixo:

MODELO	TENSÃO DO SISTEMA	CORRENTE SUPORTADA
	(V)	(A)
TriStar-45	12 a 48	45

Tabela 6 - Especificações do controlador de carga.

Número de módulos fotovoltaicos em paralelo: 12

Corrente de curto circuito do módulo fotovoltaico: 8,02 A

$$I_{CC}^{A} = 12 \times 8,02;$$

$$I_{CC}^{A} = 96,24 \text{ A}.$$

Para dimensionamento de componentes que serão instalados entre o arranjo e a bateria, é comum utilizar um fator multiplicativo de segurança de 1,25. Cálculo da corrente mínima necessária ao controlador de carga:

$$I_{\rm M} = 1.25 \text{ x } I_{\rm CC}^{\rm A};$$

$$I_M = 1,25 \times 96,24;$$

$$I_{\rm M} = 120,3$$
 A.

Cálculo do número de controladores em paralelo, onde I_R é a corrente suportada pelo controlador:

$$p = I_M \div I_R;$$

$$p = 120,3 \div 45;$$

$$p = 3$$
.

Serão necessários 3 controladores de 45 A em paralelo para suportar a corrente total estimada. Caso haja um curto circuito ou um defeito em um dos controladores, a proteção contra sobrecorrente é capaz de interromper o fluxo evitando que apenas um controlador assuma toda a carga. Para esses casos, o sistema de proteção desconecta os controladores do arranjo fotovoltaico.

Considerando a aplicação, 12 painéis fotovoltaicos e um banco de baterias com autonomia de 3 dias dão a confiabilidade necessária ao sistema para que ele seja implantado. Durante os 6,4 dias de recarga a bomba continuará em funcionamento ao passo que o banco de baterias será recarregado por completo. Caso ocorra de o banco de baterias descarregar por completo e no quarto dia tenhamos tempo chuvoso, veremos que o acionamento da bomba não se fará necessário. O mesmo ocorre em períodos de chuva torrencial, onde o solo permanecerá encharcado e a bomba não será necessária para irrigar o terreno.

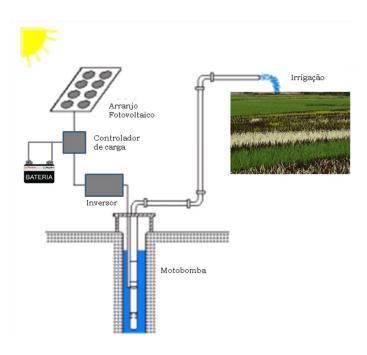


Figura 15 - Desenho esquemático do sistema proposto.

5.1.2 INVESTIMENTO INICIAL.

Para completar o estudo do sistema proposto, será apresentada uma tabela com os preços de cada equipamento e o total investido para esse caso.

EQUIPAMENTO	MODELO	QUANTIDADE	TOTAL (R\$)
BOMBA	DANCOR 709 S	1	900,00
PAINEL SOLAR	KYOCERA 130T	12	14580,00
BATERIA	SUNLAB 115 Ah	15	6300,00
INVERSOR	XANTREX 5000-UL	1	3200,00
CONTROLADOR	TRISTAR-45	3	690,00
			25670,00

Tabela 7 - Estimativa do custo inicial do projeto.

5.2 BOMBEAMENTO DE ÁGUA PARA USO RESIDENCIAL.

De fundamental importância para o desenvolvimento social de áreas isoladas, o bombeamento de água através de sistemas fotovoltaicos surge como uma das mais promissoras aplicações da energia solar. A partir de agora estudaremos dois casos para esta aplicação: um com armazenamento de energia e outro sem armazenamento. Ambos serão projetados de acordo com a *Tabela 1*. Ou seja, novamente usaremos o Bairro de Santa Cruz, no Rio de Janeiro, como referência para os cálculos. Isso não impede que esse sistema possa

ser dimensionado e implantado em outra localidade; basta para tal utilizar os dados referentes à região desejada.

5.2.1 BOMBEAMENTO DE ÁGUA PARA USO RESIDENCIAL COM ARMAZENAMENTO DE ENERGIA.

O sistema será composto por um arranjo fotovoltaico, um controlador de carga, um banco de baterias, um inversor e uma motobomba. A captação de água será feita através de um poço e a água será bombeada até uma caixa d'água comunitária. A Altura manométrica a se considerar será de 26 mca.

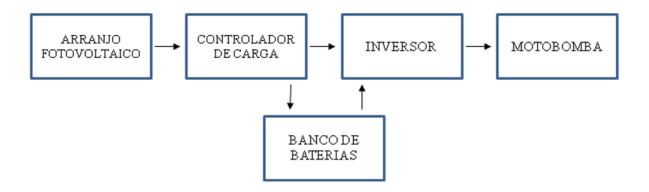


Figura 16 - Exemplificação de um sistema solar fotovoltaico, com armazenamento de energia, para bombeamento de água para uso residencial.

Começaremos estimando alguns valores. Segundo dados do *IBGE*^[14], na Região Sudeste há uma média de 3,4 habitantes por residência. Vamos considerar que cada habitante consuma 150 L de água por dia, logo o volume diário de água por residência vale 510 L. Para este caso, estudaremos o bombeamento para uma pequena comunidade de 30 casas, portanto o consumo diário esperado de água é de 15300 L. A capacidade total de armazenamento da caixa d'água é de 18000 L.

Iniciaremos o dimensionamento do sistema escolhendo uma bomba centrífuga monofásica, modelo CAM-W10 de 1,5cv do fabricante *DANCOR*. Para a altura manométrica estabelecida, a vazão da bomba é de 8,4 m³/h. No pior dos casos, será necessário bombear 18000 L de água e serão necessárias 2,15 horas para encher o reservatório.

MODELO	POTÊNCIA	TENSÃO	CORRENTE
	(cv)	(V)	(A)
		110	17.0
CAM-W10	1,5	110	15,2

Tabela 8 - Especificação da bomba selecionada.

A potência elétrica da bomba é dada pelo produto da corrente pela tensão.

 $P_B = V \times I;$

 $P_B = 110 \times 15,2;$

 $P_B = 1672 \text{ VA}.$

Os painéis solares escolhidos são fabricados pela *KYOCERA* e correspondem ao modelo KC 130T. As especificações do mesmo foram apresentadas na *Tabela 3*.

Para o dimensionamento do arranjo fotovoltaico, é preciso calcular a energia da bomba (E_{B}) :

 $E_B = P_B x t$;

 $E_B = 1672 \times 2,15;$

 $E_B = 3594.8 \text{ Wh/dia}.$

Do *Capítulo 5.1*, temos que a energia gerada por um único painel (E_P) vale 573,3 Wh/dia. Para sabermos a quantidade de painéis necessários para alimentar a carga, basta dividir a energia da bomba (E_B) pela energia gerada por um único painel (E_P) e assim teremos:

$$n = E_B \div E_P$$
;

$$n = 3594,8 \div 573,3$$
;

n = 6,27 painéis; arredondaremos para cima e usaremos n=7 painéis.

Com um arranjo de 7 painéis ligados em paralelo, consegue-se a energia diária de suprimento (E_S) de:

$$E_S = E_P \times n$$

$$E_S = 573,3 \times 7$$

$$E_S = 4013,1 \text{ Wh/dia}.$$

A diferença entre a energia diária de suprimento e a energia da bomba é o excedente $(E_E) \ de \ energia \ produzido \ e \ será utilizado \ para \ carregar \ o \ banco \ de \ baterias.$

$$E_E = E_S - E_B$$
;

$$E_E = 4013,1 - 3594,8;$$

$$E_E = 418,3 \text{ Wh/dia.}$$

Para o dimensionamento do banco de baterias, escolheu-se a mesma bateria descrita pela *Tabela 4*. Para garantir o fornecimento de água para as residências, a autonomia do sistema será de 5 dias.

Agora, é preciso que se converta a energia da bomba (E_B) em consumo da bomba (C_B) e para tal basta dividir E_B por 12 V, que é a tensão do sistema no lado de corrente contínua. Então,

$$C_B = E_B \div 12$$
;

$$C_B = 3594,8 \div 12;$$

$$C_B = 299,6 \text{ Ah/dia}.$$

Levando-se em consideração a eficiência do sistema de conversão, temos que o consumo corrigido da bomba (C_B ') vale:

$$C_{B}' = C_{B} \div 0.7;$$

$$C_B' = 428 \text{ Ah/dia}.$$

Agora estamos prontos para calcular a capacidade do banco de baterias (C_R) . Sendo o consumo da bomba de 428 Ah por dia, para 5 dias teremos:

$$C_R = 490,28 \times 5;$$

 $C_R = 2140$ Ah; considerando-se a descarga de 90%, $C_R = 2377.8$ Ah.

Essa capacidade deverá ser dividida entre as baterias que farão parte do banco. Para descobrir quantas serão necessárias basta dividir a capacidade do banco de baterias (C_R) pela capacidade de uma única bateria (115 Ah), e então:

$$N_B = C_R \div 115;$$

$$N_B = 2377,8 \div 115;$$

$$N_B = 21;$$

Teremos 21 baterias ligadas em paralelo para suprir a demanda da carga por 5 dias.

A recarga da bateria é feita simultaneamente ao funcionamento da bomba. Considerando a energia excedente diária (E_E) e transformando-a para Ampere-hora, teremos:

$$E_E = 418,3 \div 12;$$

$$E_E = 34,86 \text{ Ah/dia}.$$

Para calcularmos quantos dias serão necessários para recarregar todo o banco de baterias, basta dividir a capacidade do banco (C_R) pelo excedente de energia diário, logo:

$$d = C_R \div E_E;$$

 $d = 2377.8 \text{ Ah} \div 34.86 \text{ Ah/dia};$

d = 68,21 dias.

Precisaremos de 68,21 dias para recarregar o banco de baterias por completo. Essa demora para recompor o sistema ao estado inicial faz com que o mesmo não seja confiável mesmo tendo uma reserva de 2700 L de água para ser usado em uma emergência.

É desejável que se acelere o processo de recarga das baterias; para isso, será necessário instalar mais painéis fotovoltaicos para que o excedente de energia gerado seja ainda maior.

5.2.1.1 REDUZINDO O TEMPO DE CARREGAMENTO DAS BATERIAS E AUMENTANDO A CONFIABILIDADE DO SISTEMA.

Utilizando o mesmo raciocínio que foi anteriormente empregado, e não alterando as características do banco de baterias e nem as do conjunto motobomba, podemos calcular a

energia de suprimento para o novo arranjo fotovoltaico. Vamos considerar que se deseja recarregar as baterias em até d'=6 dias. Para isso teremos que encontrar a nova energia excedente (E_E) gerada pelos painéis:

$$E_E{'}=C_R\div d{'}$$

$$E_{E'} = 2377,8 \div 6$$

 $E_E' = 396,3$ Ah/dia; transformando para Watt-hora:

$$E_{E}' = 396,3 \times 12;$$

$$E_{E}' = 4755,6 \text{ Wh/dia.}$$

Para encontrarmos a nova energia diária de suprimento (E_S') , somaremos a energia da bomba (E_B) com a nova energia excedente $(E_{E'})$:

$$E_S' = E_B + E_E';$$

$$E_{S}' = 3594,8 + 4755,6;$$

$$E_{S}' = 8350,4 \text{ Wh/dia}.$$

Para encontrar o número de painéis necessários para suprir essa quantidade de energia basta dividir a nova energia diária de suprimento (E_S') pela energia de um único painel (E_P) :

$$n'=E_S'\div E_P;$$

$$n' = 8350,4 \div 573,3;$$

n' = 14,56 painéis.

Arredondaremos o resultado para cima e utilizaremos n'=15 painéis. Com um arranjo de 15 painéis fotovoltaicos, teremos uma nova energia diária de suprimento $(E_S^{\ 15})$ que será:

$$E_S^{15} = E_P \times 15;$$

$$E_S^{15} = 573.3 \times 15$$
;

$$E_S^{14} = 8599,5 \text{ Wh/dia.}$$

O novo excedente (E_E¹⁴) gerado pelo arranjo de 14 painéis fotovoltaicos será:

$$E_E^{15} = E_S^{15} - E_B;$$

$$E_E^{15} = 8599.5 - 3594.8;$$

 $E_E^{15} = 5004,7$ Wh/dia; transformando para Ampere-hora:

$$E_E^{15} = 5004,7 \div 12;$$

$$E_E^{15} = 417,05 \text{ Ah/dia.}$$

E o número de dias (d¹⁵) que serão necessários para recarregar a bateria é dado por:

$$d^{15} = C_R \div {E_E}^{15;}$$

$$d^{15} = 2377, 8 \div 417,05;$$

$$d^{15} = 5,70 \text{ dias.}$$

Com um arranjo de 15 painéis fotovoltaicos, serão necessários 5,70 dias para recarregar por completo o banco de baterias.

O inversor que será utilizado, é fabricado pela *Xantrex*, e possui potência nominal de 4000 W. As especificações do mesmo já foram dadas na *Tabela 5*.

Dimensionaremos agora um sistema de proteção contra curto circuito. De acordo com o catálogo da *WEG*, esse motor possui uma corrente de partida 5,7 vezes maior do que a corrente nominal, ou seja, a corrente de partida vale 86,64 A. O tempo de partida do motor é de 5s e de acordo com a curva do fusível NH (*Figura 13*), um fusível de 25 A será suficiente para proteger o motor da bomba. Para proteção contra sobrecarga, será utilizado um disjuntor monopolar de 20 A.

É importante frisar que o aterramento do motor elétrico se faz obrigatório conforme consta na NBR 5410. Este procedimento é utilizado para proteger as pessoas contra choque elétrico quando em contato com as partes metálicas eventualmente energizadas, permitindo uma utilização confiável e correta da instalação.

Os controladores de carga são fabricados pela *MORNINGSTAR* e foram escolhidos de acordo com a corrente de curto circuito do arranjo. O cálculo será apresentado abaixo:

MODELO	TENSÃO DO SISTEMA	CORRENTE SUPORTADA
	(V)	(A)
TriStar-60	12 a 48	60

Tabela 9 - Especificações do controlador de carga.

Número de módulos fotovoltaicos em paralelo: 15

Corrente de curto circuito do módulo fotovoltaico: 8,02 A

$$I_{CC}^{A} = 15 \times 8,02;$$

$$I_{CC}^{A} = 120,3 A.$$

Novamente utilizaremos um fator multiplicativo de segurança de 1,25. Cálculo da corrente mínima necessária ao controlador de carga:

$$I_{\rm M} = 1.25 \text{ x } I_{\rm CC}^{\rm A};$$

$$I_M = 1,25 \times 120,3;$$

$$I_{\rm M} = 150,375 \ {\rm A}.$$

Cálculo do número de controladores em paralelo, onde I_R é a corrente suportada pelo controlador:

$$p=I_M \div I_R;$$

$$p = 150,375 \div 60;$$

$$p = 3$$
.

Serão necessários 3 controladores de 60 A em paralelo para suportar a corrente total estimada.

Considerando a aplicação, 15 painéis fotovoltaicos e um banco de baterias com autonomia de 5 dias, tudo isso somado à quantidade de água excedente na caixa d'água darão a confiabilidade necessária ao sistema e o abastecimento das 30 residências será garantido.

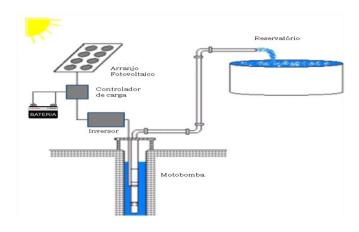


Figura 17 - Desenho esquemático do sistema proposto.

5.2.1.2 INVESTIMENTO INICIAL.

Para completar o estudo do sistema proposto, será apresentada uma tabela com os preços de cada equipamento e o total investido para esse caso.

EQUIPAMENTO	MODELO	QUANTIDADE	TOTAL (R\$)
			, ,
BOMBA	DANCOR CAMW10	1	630,00
		_	32 3,0 3
PAINEL SOLAR	KYOCERA 130T	15	18225,00
	111 0 02101 1001	10	10225,00
BATERIA	SUNLAB 115 Ah	19	7980,00
DATEMA	SUNLAD 113 All	1)	7780,00
INIVEDGOD	MANUDEN 5000 III	1	2200.00
INVERSOR	XANTREX 5000-UL	1	3200,00
CONTROLADOR	TRISTAR-60	3	900,00
			30935,00

Tabela 10 - Estimativa do custo inicial do projeto.

5.2.2 BOMBEAMENTO DE ÁGUA PARA USO RESIDENCIAL SEM ARMAZENAMENTO DE ENERGIA.

O sistema será composto por um arranjo fotovoltaico, um inversor e uma motobomba. Será adotada uma estratégia diferente em relação aos casos anteriores. Não haverá armazenamento de energia em baterias. Dessa vez, procurou-se armazenar a água bombeada. Superdimensionando o reservatório, asseguraremos que não faltará água para essa residência. Diferente do caso anterior onde se abastece um pequeno povoado, nesse caso, o dimensionamento do sistema fotovoltaico será para consumo individual. A captação de água será feita através de um poço e a água será bombeada até uma caixa d'água que ficará no telhado da casa. A altura manométrica a se considerar será de 14 mca.



Figura 18 - Sistema fotovoltaico, sem armazenamento de energia, para bombeamento de água.

Novamente será preciso estimar alguns valores. Como dito anteriormente, temos uma média de 3,4 habitantes por residência e cada um deles consome 150 L de água por dia. Logo, teremos um consumo diário de 510 L de água na residência. É comum utilizarmos caixas d'água de 1000 L nas residências, porém para essa aplicação precisaremos assegurar que não faltará água em períodos de pouca radiação solar. Para isso, consideraremos um reservatório com capacidade total de 3000 L que será suficiente para abastecer a casa por 5,88 dias.

O dimensionamento da bomba será feito tomando como referência a caixa d'água completamente vazia. Portanto, será necessário bombear 3000 L de água. Para tal, foi escolhida um bomba centrífuga monofásica *DANCOR*, modelo CP-4C de 1/4cv. Para a altura

manométrica considerada, a vazão da bomba é de 2,1 m³/h e serão necessárias 1,43 horas para encher completamente a caixa d'água.

MODELO	POTÊNCIA	TENSÃO	CORRENTE
	(cv)	(V)	(A)
CP-4C	1/4	127	3,1

Tabela 11 - Especificações da bomba selecionada.

A potência elétrica da bomba é dada pelo produto da corrente pela tensão.

 $P_B = V \times I;$

 $P_B = 127 \times 3,1;$

 $P_B = 393,7 \text{ VA}.$

Os painéis solares escolhidos são fabricados pela *KYOCERA* e correspondem ao modelo KC 85T.

MODELO	MÁXIMA	TENSÃO DE	CORRENTE DE
	POTÊNCIA	MÁXIMA	MÁXIMA
		POTÊNCIA	POTÊNCIA
	(W)	(V)	(A)
KC 85T	87	17,4	5,02

Tabela 12 - Especificação do painel fotovoltaico selecionado.

Observação: As especificações elétricas estão sob condições de teste de irradiação de 1 kW/m², espectro de 1,5 de massa de ar e temperatura de célula de 25°C.

Para o dimensionamento do arranjo fotovoltaico, é preciso calcular a energia da bomba $(E_{\rm B})$ durante o período de 1,43 horas:

$$E_B = P_B x t$$
;

$$E_B = 393,7 \times 1,43;$$

$$E_B = 562,991 \text{ Wh/dia.}$$

Para calcular a energia gerada por um painel fotovoltaico (E_P), multiplicaremos a potência do painel fotovoltaico (P_P) pelo tempo de horas a *Sol Pleno*. Do *capítulo 5.1*, temos que a número de horas a *Sol Pleno* vale 4,41 h/dia, então:

$$E_P = P_P \times SP$$
;

$$E_P = 87 \times 4,41;$$

$$E_P = 383,67 \text{ Wh/dia.}$$

O número mínimo de painéis que formarão o arranjo fotovoltaico é dado pelo resultado aproximado da divisão da energia da bomba (E_B) pela energia gerada por um único painel (E_P) .

$$n = E_B \div E_P$$
;

$$n = 562,991 \div 383,67$$

n = 1,47 painéis; novamente arredondaremos para cima e usaremos n=2 painéis.

Com um arranjo de 2 painéis ligados em paralelo, consegue-se a energia diária de suprimento (E_S) de:

$$E_S = E_P \times n$$

$$E_S = 383,67 \times 2$$

 $E_S = 767,34 \text{ Wh/dia.}$

Nessa situação teremos um excedente de energia gerado (E_E) que não será utilizado, já que o sistema não conta com componentes para armazenamento de energia. O valor do excedente gerado \acute{e} :

$$E_E = E_S - E_B$$
;

 $E_E = 767,34 - 562,991;$

 $E_E = 204,349 \text{ Wh/dia.}$

Temos o sistema básico pronto e dimensionado. Porém, este sistema não funcionará utilizando um inversor comum como os escolhidos para os exemplos anteriores. A ausência de um equipamento que estabilize a tensão, tal como a bateria ou um seguidor do ponto de máxima potência, na saída do arranjo fotovoltaico inviabiliza o sistema, visto que a tensão de suprimento do sistema não é estabilizada e varia conforme a energia captada pelas células fotovoltaicas. Como solução para esse problema, será dimensionado um sistema de bombeamento utilizando uma motobomba alimentada em corrente contínua. A bomba *Shurflo Aqua King Premium 4.0*, de acordo com o manual fornecido pelo fabricante, foi projetada para ser utilizada em conexão direta ao arranjo fotovoltaico dispensando a utilização de qualquer componente entre o painel e os terminais de bomba.

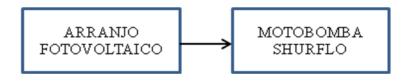


Figura 19 - Sistema fotovoltaico proposto.

MODELO	TENSÃO CC	CORRENTE
	(V)	(A)
Shurflo Aqua King Premium 4.0	12	10

Tabela 13 - Características elétricas da motobomba alimentada em corrente contínua.

Para a situação do problema formulado, a vazão da bomba é de 0,8 m³/h e o seu ciclo de trabalho é de 3,75 horas. A potência elétrica da bomba é dada por:

 $P_B = V \times I;$

 $P_B = 12 \times 10;$

 $P_B = 120 \text{ V}.$

Para o dimensionamento do arranjo fotovoltaico, é preciso calcular a energia da bomba (E_B) durante o período de 3,31 horas:

 $E_B = P_B x t;$

 $E_B = 120 \times 3,75;$

 $E_B = 450 \text{ Wh/dia.}$

A energia do painel foi calculada anteriormente e vale $E_P=383,67$ Wh/dia. Sendo assim, o número mínimo de painéis que formarão o arranjo fotovoltaico é dado pelo resultado aproximado da divisão da energia da bomba (E_B) pela energia gerada por um único painel (E_P).

 $n=E_B\div E_P;$

 $n = 450 \div 383,67$

n = 1,18 painéis; novamente arredondaremos para cima e usaremos n=2 painéis.

Com um arranjo de 2 painéis ligados em paralelo, consegue-se a energia diária de suprimento (E_S) de:

$$E_S = E_P \times n$$

$$E_S = 383,67 \times 2$$

$$E_S = 767,34 \text{ Wh/dia}.$$

Nessa situação teremos um excedente de energia gerado (E_E) que não será utilizado, já que o sistema não conta com componentes para armazenamento de energia. O valor do excedente gerado \acute{e} :

$$E_E = E_S - E_B$$
;

$$E_E = 767,34 - 450;$$

$$E_E = 317,34 \text{ Wh/dia.}$$

A estratégia de se utilizar painéis com potências inferiores não foi bem sucedida, uma vez que são necessários arranjos com dois ou mais painéis fotovoltaico e assim, a energia excedente gerada é muito grande. Para evitar que se superdimensione o sistema e que se produza muita energia excedente, será utilizado o mesmo painel de 130 W dos casos anteriores. Sendo assim, a energia do painel fotovoltaico é $E_P = 573,3$ Wh/dia. Então, o número mínimo de painéis que formarão o arranjo fotovoltaico é dado pelo resultado aproximado da divisão da energia da bomba (E_B) pela energia gerada por um único painel (E_P) .

$$n = E_B \div E_P$$
;

 $n = 450 \div 573,3$

n = 0.785 painel; arredondaremos para cima e usaremos n=1 painel.

Com um arranjo de 1 painel, consegue-se a energia diária de suprimento (E_S) de:

 $E_S = E_P \; x \; n$

 $E_S = 573,3 \times 1$

 $E_S = 573,3 \text{ Wh/dia.}$

Nessa situação teremos um excedente de energia gerado (E_E) que não será utilizado, já que o sistema não conta com componentes para armazenamento de energia. O valor do excedente gerado \acute{e} :

 $E_E = E_S - E_B$;

 $E_E = 573,3 - 450;$

 $E_E = 123,3 \text{ Wh/dia}.$

O excedente será perdido já que não há armazenamento de energia por meio de banco de baterias. Essa é a solução mais viável para o problema, já que representa o menor custo inicial e também a menor energia excedente gerada. Sendo assim, a *Figura 20* representa o sistema fotovoltaico apresentado como solução para o problema encontrado.

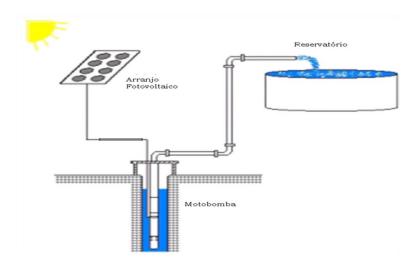


Figura 20 - Desenho esquemático do sistema proposto.

Considerando a aplicação, o sistema projetado como solução para o problema encontrado é capaz de garantir o abastecimento de água na residência.

5.2.2.1 INVESTIMENTO INICIAL.

Para completar o estudo do sistema proposto, será apresentada uma tabela com os preços de cada equipamento e o total investido para esse caso.

1	574,00
207	1015.00
301 1	1215,00
	1789,00
	1 30T 1

Tabela 14 - Estimativa do custo inicial do projeto.

6. CONCLUSÃO.

Os sistemas fotovoltaicos de bombeamento surgem como uma excelente alternativa para o problema do abastecimento de água. Apesar da eficiência e da confiabilidade, é importante que haja uma reeducação das pessoas para que o consumo de água seja feito de forma racional, evitando desperdício.

Como foi visto, os sistemas fotovoltaicos de bombeamento de água podem ter outras aplicações, mas estes se mostram muito vantajosos para o abastecimento residencial, especialmente se for considerada apenas uma habitação. Para este caso é importante frisar que a utilização de bombas projetadas para uso em sistemas fotovoltaicos é muito mais indicada, tanto do ponto de vista econômico quanto do ponto de vista operacional, do que a utilização de um inversor e uma bomba alimentada por motor de indução monofásico.

Quanto aos sistemas fotovoltaicos para irrigação, o seu uso de forma massificada se dará ao passo que surgirem incentivos que compensem o investimento inicial que ainda é muito alto.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] Grupo de Trabalho de Energia Solar Manual de Engenharia Para Sistemas Fotovoltaicos- CEPEL 2008.
- [2] D.M. Chapin, C.S. Fuller, G.L. Pearson, A New Silicon p-n Junction Photocell for
 Converting Solar Radiation into Electrical Power, Journal of Applied Physics 25 (1954) 676;
 D.M. Chapin, C.S. Fuller, G.L. Pearson, Solar Energy Converting Apparatus.
- [3] Apostila de Bombas [acesso em Outubro de 2010]. Disponível em: http://www.ecivilnet.com/apostilas/
- [4] PRINCON Energia Fotovoltaica "Manual sobre tecnologias, projecto e instalação" -Portugal 2004 – Programa ALTERNER
- [5] Atlas da Energia Elétrica, 2ª Edição ANEEL.
- [6] Projeto Água Solar Traíras (Micro-irrigação) [acesso em Outubro de 2010]. Disponível em: http://www.ecoengenho.org.br/lista_projeto.php?id=17/.
- [7] Irrigação [acesso em Outubro de 2010]. Disponível em: http://www.aboaterra.com.br/dicas/ver.asp?id=13&Secao=1/.
- [8] Módulos Solares [acesso em Outubro de 2010]. Disponível em: http://www.kyocerasolar.com.br/site/produtos_modulos.php?cat=12/.
- [9] Baterias de Descarga Profunda [acesso em Outubro de 2010]. Disponível em: http://www.sunlab.net.br/baterias.htm#Descarga_Profunda/.
- [10] Inversor $12V_{cc}/115V_{ca}$ [acesso em Outubro de 2010]. Disponível em: http://www.mbtenergia.com.br/pdf/XP-UL.pdf/.
- [11] Manual de Motores Elétricos de Corrente Alternada WEG.

- [12] NBR 5410 Instalações Elétricas de Baixa Tensão ABNT 1997
- [13] Controladores [acesso em Outubro de 2010]. Disponível em: http://www.kyocerasolar.com.br/site/produtos_categoria.php?cat=13#/.
- [14] Número médio de moradores por domicílio particular permanente [acesso em Outubro de 2010]. Disponível em:

 $www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2000/indicadores_sociais/tabela05.pdf/.$