



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
CECAU - COLEGIADO DE ENGENHARIA DE
CONTROLE E AUTOMAÇÃO



JARDEL COSTA SILVA CANÇADO

ANÁLISE DE UM SISTEMA DE BOMBEAMENTO
FOTOVOLTAICO

MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

Ouro Preto, 2018

JARDEL COSTA SILVA CANÇADO

ANÁLISE DE UM SISTEMA DE BOMBEAMENTO FOTOVOLTAICO

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro de Controle e Automação.

Orientador: Dr Luiz Fernando Rispoli Alves

Ouro Preto
Escola de Minas - UFOP
Junho/2018

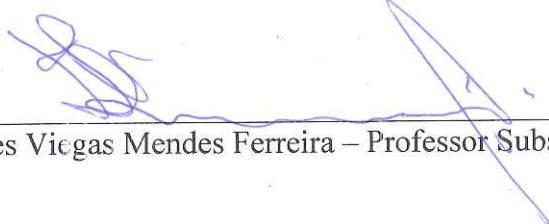
Monografia defendida e aprovada, em 26 de junho de 2018, pela comissão avaliadora constituída pelos professores:



Prof. Dr. Luiz Fernando Rispoli Alves - Orientador



Prof. Dr. Paulo Marcos de Barros Monteiro – Professor Convidado



M.Sc. Diógenes Viegas Mendes Ferreira – Professor Substituto Convidado

Ao meu pai, espero que esteja orgulhoso.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus. Agradeço a minha mãe, pelo apoio incondicional. Aos colegas e professores, pela ajuda e ensinamentos. À minha namorada, Raquel, pelo impulso final.

RESUMO

Com o avanço da tecnologia de geração de energia fotovoltaica, sistemas de bombeamento fotovoltaico se tornam cada dia mais viáveis, e oferecem ótimas soluções para lugares como o semiárido brasileiro, onde o acesso à água é dificultado. Porém, fatores como a complexidade dos sistemas instalados, falta de mão de obra especializada e falta de familiaridade dos usuários com esta tecnologia dificultam a manutenção dos sistemas para que funcionem bem, fazendo com que muitos dos sistemas instalados tenham seu funcionamento interrompido antes do fim de sua vida útil. Este trabalho aborda o teste de um sistema minimalista, de forma a verificar se esta configuração seria o suficiente para suprir uma residência com um sistema de simples manutenção e com peças de fácil reposição. Para tal foi realizado um estudo de caso com diferentes bombas, de forma a verificar se os diferentes modelos e potências se adequam à tarefa de suprimento de água em residências. Verificou-se que duas das três bombas testadas forneceriam o volume de água necessário, e que portanto seriam viáveis para aplicação em residências.

Palavras-chave: Sistemas de Bombeamento Fotovoltaico, Energia Solar, Capacidade de Bombeamento, Configuração Minimalista

ABSTRACT

With the advances of the photovoltaic energy generation technologie, photovoltaic pumping systems become more viable each day, and offer great solutions for places as the brasilian semiarid, where the water access is hard. But some factors, as the complexicity of the installed systems, the lack of especializada worforce, and familiarity of the users with the technology make it difficult the systems maintenance, making them to stop working before the end of it's lifespan. This work approaches the test of a minimalist system, to verify if this configuration would be enough to supply a residence, with a sistem of easy maintenance and easily replaceable parts. For this a case study was realized with different pumps, to verify if the different models and potencies would be adequate to the task of supplying water in residences. It was verified that two of the three tested pumps would supply the required volume of water, and therefor are viables for residential applications.

Keywords: Photovoltaic Pumping Systems, Solar Energy, Pumping Capacity, Minimalist Configuration

SUMÁRIO

	SUMÁRIO	9
	LISTA DE FIGURAS	11
1	INTRODUÇÃO	12
1.0.1	Justificativa	12
1.0.2	Objetivos	13
1.0.2.1	Objetivo Principal	13
1.0.2.2	Objetivos Secundários	13
1.0.3	Estrutura do Trabalho	13
2	REVISÃO TEÓRICA	14
2.1	Sistemas Fotovoltaicos	14
2.1.1	Células Fotovoltaicas	14
2.1.1.1	Estrutura de uma célula fotovoltaica	14
2.1.1.2	Células de Silício Monocristalino	15
2.1.1.3	Células de Silício Policristalino	15
2.1.1.4	Células de Silício Amorfo	16
2.1.2	Módulos Fotovoltaicos	16
2.1.3	Controlador de Carga	17
2.1.3.1	Funções do controlador de carga	17
2.1.3.2	Seguidor de Máxima Potência	18
2.1.4	Inversor	18
2.1.5	Sistemas sem baterias	18
2.2	Sistemas de Bombeamento	19
2.2.1	Bombas	19
2.2.2	Alguns Princípios Importantes	19
2.2.2.1	Altura manométrica total (AMT)	19
2.2.2.2	Rendimento do conjunto motobomba(η)	20
2.2.2.3	Potência Hidráulica	21
3	HISTÓRICO DOS SISTEMAS DE BOMBEAMENTO FOTOVOLTAICOS	22
3.1	História da energia solar fotovoltaica	22
3.2	Antecedentes do bombeamento fotovoltaico	24
3.3	Principais projetos	24

3.4	O bombeamento fotovoltaico no Brasil	25
4	ESTUDO DE CASO	26
4.1	Montagem do sistema	26
4.1.1	Estrutura	26
4.1.2	ligação elétrica das bombas	27
4.1.2.1	bombas utilizadas	27
4.1.3	sistema de aquisição de dados	29
4.1.4	ligações hidráulicas	30
4.2	metodologia de aquisição das medidas	31
5	RESULTADOS	33
5.1	Dados	33
5.2	Considerações a Respeito dos Dados Obtidos	33
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	35
6.1	Análise de Custo do Sistema	35
6.2	Sugestões para Trabalhos Futuros	35
	REFERÊNCIAS	36

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura de uma célula fotovoltaica.	14
Figura 2 – Célula fotovoltaica de silício monocristalino.	15
Figura 3 – Célula fotovoltaica de silício policristalino.	15
Figura 4 – Célula fotovoltaica de silício amorfo.	16
Figura 5 – Painel fotovoltaico de 95W.	17
Figura 6 – Tipos de bombas.	20
Figura 7 – Esquema do sistema completo	27
Figura 8 – Torre de estrutura metálica	28
Figura 9 – Diagrama da ligação dos componentes	28
Figura 10 – Ligação dos componentes Elétricos	29
Figura 11 – Bomba Shurflo 8000-443-136	29
Figura 12 – Bomba de Diafragma 36W	30
Figura 13 – Bomba de Diafragma 60W	30
Figura 14 – Hidrômetro de saída pulsada	31
Figura 15 – Contador de Pulsos	32
Figura 16 – Ligação das bombas	32
Figura 17 – Atlas Solarimétrico representando a média anual de horas de sol diárias no Brasil.	34

1 INTRODUÇÃO

Apesar de o efeito fotoelétrico ter sido observado em 1839, e o primeiro dispositivo sólido de produção de eletricidade por exposição a luz ter sido desenvolvido em 1877, a tecnologia de geração de energia fotovoltaica é uma tecnologia relativamente nova, com as primeiras aplicações práticas de uma célula solar de silício datando de 1955, como fonte de uma rede de telefonia local em Americus, na Geórgia, Estados Unidos. Nos últimos anos, tem-se visto avanços significativos na tecnologia de geração de energia fotovoltaica, diminuindo substancialmente os custos de produção e aumentando a eficiência energética. Em 2006, 50 anos após a primeira célula fotovoltaica ser produzida, com um rendimento de 0,5%, já se produzia células como a em cascata, que permitiam alcançar 34% de rendimento.(VALLÊRA; BRITO, 2006)

Esses avanços permitiram, desde o final da década de 70 o uso comercial da energia fotovoltaica em sistemas de bombeamento. Os sistemas de bombeamento em si também passaram por uma melhora em seus projetos, eliminando por exemplo, eixos de transmissão entre o motor e a bomba, passando-se à utilização de um sistema motobomba compacto completamente submerso. A melhoria na construção dos motores também contribuiu para um aumento no rendimento total do sistema. Sistemas antigos da década de 80 contavam com uma eficiência total de 2% (considerando-se a eficiência do módulo fotovoltaico e do resto do sistema de bombeamento), enquanto no começo do século já se tinha sistemas com eficiência acima dos 5%.(FEDRIZZI; SAUER, 2002)

1.0.1 Justificativa

A tecnologia de sistemas de bombeamento fotovoltaico já é comprovadamente viável em lugares isolados e de difícil acesso à energia elétrica. No semiárido brasileiro por exemplo, muitas comunidades rurais tem seu acesso à água dificultado pela falta do emprego de tecnologia adequada, como sistemas de bombeamento fotovoltaico(SBF). Porém, vários estudos verificam que nessas comunidades, a falta de mão de obra capacitada para dar suporte aos SBF e a falta de disponibilidade de peças dificultam a manutenção e comprometem o funcionamento a longo prazo dos sistemas. (MORAES et al., 2016)

Em vista disso, esse trabalho analisa a possibilidade de utilização de uma configuração minimalista, de modo a ser o mais simples possível, evitando a utilização de componentes complexos, caros e de difícil manutenção.

1.0.2 Objetivos

1.0.2.1 Objetivo Principal

Estudar a capacidade de produção em litros por hora(l/h) de três bombas alimentadas diretamente por um módulo fotovoltaico, sem a necessidade de inversores ou baterias.

1.0.2.2 Objetivos Secundários

Verificar quantas pessoas as bombas seriam capazes de atender, de acordo com a norma Técnica da Sabesp NTS 181: 2012.

O trabalho inclui ainda uma revisão sobre sistemas fotovoltaicos e sobre sistemas de bombeamento, além de um histórico dos Sistemas de Bombeamento Fotovoltaicos(SBF) e os principais modelos utilizados.

1.0.3 Estrutura do Trabalho

No capítulo 2 é realizada uma revisão bibliográfica sobre o sistema de produção de energia elétrica através do efeito fotovoltaico, seus componentes principais, como módulos fotovoltaicos, controlador de carga, inversores, bem como um estudo sobre bombas com alimentação direta disponíveis no mercado, as mais usuais, de pequena potência capazes de atender aplicações residenciais.

No capítulo 3 é apresentado um histórico dos SBF desde a origem das células fotovoltaicas citando as aplicações para bombeamento, os principais projetos desenvolvidos e alguns números do bombeamento fotovoltaico no Brasil.

No capítulo 4 é realizado um estudo de caso cujo objetivo é verificar a capacidade de produção diária das bombas disponíveis no Laboratório de Automação Predial(LAP), de modo a verificar suas aplicabilidades em micro-elevatórias, cuja função é o abastecimento de reservatórios de habitações unifamiliares.

Finalmente, no capítulo 5, são apresentadas as considerações finais e recomendações para trabalhos futuros.

2 REVISÃO TEÓRICA

2.1 Sistemas Fotovoltaicos

Os sistemas fotovoltaicos são comumente compostos pelos seguintes elementos: Painel Fotovoltaico (Gerador de Energia), Controlador de carga, baterias quando necessário, Inversor CC/CA quando as cargas funcionarem em corrente alternada ou o sistema estiver ligado à rede.

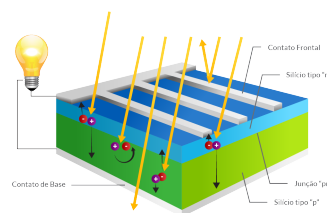
2.1.1 Células Fotovoltaicas

As células fotovoltaicas mais utilizadas no mercado são produzidas a partir de silício modificado por um processo de dopagem, pelo qual são adicionadas impurezas de forma a permitir que haja uma diferença de potencial, criando duas camadas, a camada de tipo p, que possui um excesso de cargas positivas, e a camada de tipo n, com excesso de cargas negativas. Entre as duas camadas, é criada a chamada junção p-n, que, ao ser atingida por fótons, libera elétrons para a camada n, e cria lacunas na região p, que se comportam como cargas positivas. Ligando essa célula a uma carga, é criada uma corrente elétrica.

2.1.1.1 Estrutura de uma célula fotovoltaica

Conforme mostrado na figura 1, as células fotovoltaicas são formadas basicamente por um contato de base, sobre o qual é depositada a camada de tipo p. Sobre a camada de tipo p, é depositada a camada de tipo n, formando entre elas a junção p-n, e sobre ela é colocada um contato frontal, em formato de grade, que deixa a luz passar.

Figura 1 – Estrutura de uma célula fotovoltaica.



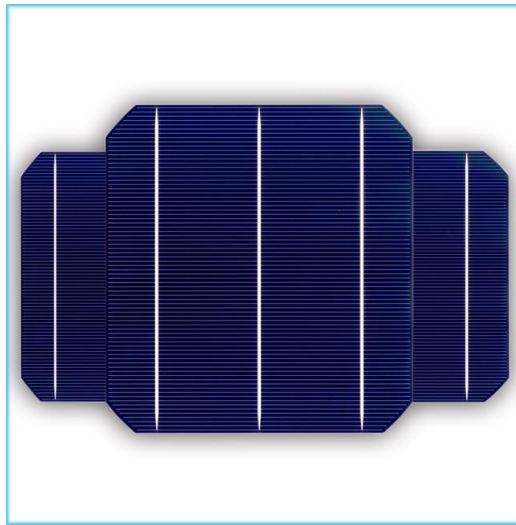
Disponível em <<http://blog.bluesol.com.br/celula-fotovoltaica-guia-completo/>>

Acessado em 07 mai. 2018

2.1.1.2 Células de Silício Monocristalino

As células de silício monocristalino, como as mostradas na Figura 2, apresentam, em laboratório, uma eficiência de 24%, e em aplicações práticas a eficiência é de aproximadamente 15%.(CASTRO, 2002) As células de silício monocristalino são fabricadas, como o nome já diz, a partir de um cristal único, o que potencializa o efeito fotovoltaico, porém seu processo produtivo é caro.

Figura 2 – Célula fotovoltaica de silício monocristalino.

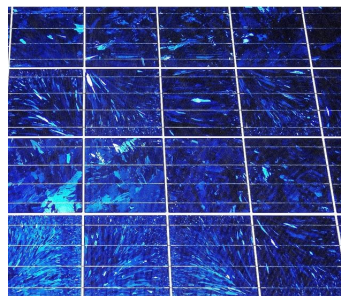


Disponível em: <<http://pt.solarsupplier-china.com/solar-cell/mono-solar-cell.html>>
Acesso em 07 mai.2018

2.1.1.3 Células de Silício Policristalino

Composto de vários cristais finíssimos, o silício policristalino dificulta a passagem dos elétrons, resultando em uma célula não tão eficiente quanto as monocristalinas. Células de silício policristalino, como as mostradas na Figura 3, apresentam rendimentos laboratorial e em utilização prática por volta de 18% e 12% respectivamente. Porém, seu processo de fabricação é mais barato em comparação ao de silício monocristalino.(CASTRO, 2002)

Figura 3 – Célula fotovoltaica de silício policristalino.



Disponível em: <<http://www.luxnova.com.br/principais-tipos-celulas-fotovoltaicas/>>
Acesso em 07 mai.2018

2.1.1.4 Células de Silício Amorfo

O silício amorfo, por não apresentar estrutura cristalina, não seria utilizável para células fotovoltaicas por potencializar a recombinação dos elétrons, mas células como a da Figura 4 podem ser produzidas, quando o silício é tratado por um processo de hidrogenização, que compensa os defeitos estruturais. Seu processo de produção é ainda mais barato que a produção de silício policristalino, e permite a produção de películas finas que podem ser até maleáveis, mas seu rendimento é menor, de aproximadamente 6% em aplicações práticas, pois seu material se degrada mais facilmente. É utilizado por exemplo em calculadoras e relógios. (CASTRO, 2002)

Figura 4 – Célula fotovoltaica de silício amorfo.



Disponível em:

<http://www.tiendafotovoltaica.es/epages/61359426.sf/es_ES/?ObjectPath=/Shops/61359426/Products/%22M%C3%B3dulo%20solar%20SIAM%2012V/4W%22> Acesso em 07 mai.2018

Por serem as mais utilizadas atualmente nos sistemas de bombeamento fotovoltaico, trataremos aqui apenas das células fotovoltaicas a base de silício.

2.1.2 Módulos Fotovoltaicos

As células fotovoltaicas produzem tipicamente potências da ordem de 1,5W, correspondente a uma tensão de 0,5V e uma corrente de 3A. Para obter potências maiores, essas

células são combinadas em série e/ou paralelo, formando módulos fotovoltaicos como o da Figura 5.(CASTRO, 2002)

Figura 5 – Painel fotovoltaico de 95W.



Disponível em: <<https://www.minhacasasolar.com.br/produto/painel-solar-de-95w-yingli-solar-yl95p-17b-4-5-78976?atributo=178:UNICA&atributo=25:U&atributo=26:UNICA>> Acesso em 07 mai.2018

2.1.3 Controlador de Carga

O controlador de carga é de presença obrigatória em sistemas com baterias, pois controla a carga e descarga da bateria, prolongando sua vida útil e diminuindo a necessidade de manutenção. Alguns controladores possuem ainda a função de seguidor de máxima potência do módulo fotovoltaico, que permite aumentar a eficiência do sistema.(VILLALVA; GAZOLI, 2012)

2.1.3.1 Funções do controlador de carga

As funções básicas do controlador de carga são:

- Proteção de Sobrecarga;
- Proteção de descarga excessiva;

- Gerenciamento da carga da bateria;
- Estágio de descarregamento pesado;
- Estágio de absorção;
- Estágio de flutuação;

2.1.3.2 Seguidor de Máxima Potência

A potência máxima varia com a temperatura e radiação, e com a tensão nos terminais do módulo, sendo desejável o funcionamento à máxima potência. Para manter o módulo fotovoltaico no ponto de operação à máxima potência, os conversores fotovoltaicos são equipados com um sistema eletrônico designado seguidor de potência máxima (MPPT). O MPPT consiste num conversor chopper que, de acordo com as condições ambientais de temperatura e radiação, ajusta a tensão de saída do módulo de modo a que o funcionamento se processe no ponto correspondente à potência máxima. Segundo a literatura, o valor de 95% seria o rendimento típico dos sistemas seguidores de potência máxima. (CASTRO, 2002)

2.1.4 Inversor

O inversor é um equipamento que converte a eletricidade de corrente e tensão alternadas proveniente do módulo fotovoltaico ou das baterias em tensão e corrente contínuas, e é necessário quando o sistema alimenta cargas CA ou quando o sistema é ligado à rede elétrica. Os inversores podem ser de onda quadrada, senoidal modificada, ou PWM (Pulse Width Modulation) de onda senoidal pura. (VILLALVA; GAZOLI, 2012)

2.1.5 Sistemas sem baterias

Aplicações como o bombeamento fotovoltaico com motores CC, podem ser alimentados diretamente pelo módulo fotovoltaico, uma vez que o reservatório de água faz a função de armazenamento, não necessitando de baterias se o reservatório for bem dimensionado, suprimindo a necessidade durante o tempo sem insolação. Esses tipos de sistemas costumam contar com uma caixa de controle, que evita sobrecargas, e algumas vezes contam com a função de seguidor de máxima potência, de modo a otimizar a eficiência mesmo sem a presença de baterias. (VILLALVA; GAZOLI, 2012)

2.2 Sistemas de Bombeamento

2.2.1 Bombas

A bomba é o dispositivo de transferência de energia de fluido mais antigo conhecido. Sendo que modelos antigos, como o parafuso de Arquimedes(250 a.C) e a bomba de êmbolo(270 a.C) ainda são fabricados e utilizados nos dias de hoje com pouquíssimas mudanças nos seus princípios básicos. Bombas são dispositivos que convertem trabalho mecânico em energia de fluido(pressão, energias cinética e/ou potencial). Esse trabalho pode ser oriundo de qualquer fonte, mas atualmente, a mais utilizada é o motor elétrico.(GOMES, 2009)

Existem, hoje, inúmeros tipos de bombas hidráulicas que se dividem, basicamente, em dois grandes grupos: bombas dinâmicas (ou turbobombas) e bombas volumétricas (ou de deslocamento positivo). A classificação dos principais tipos de bombas, de acordo com a forma com que é fornecida energia do fluido que é transportado, é apresentada na Figura 6 a seguir.

Apesar da grande variedade de modelos de bombas, as mais utilizadas e difundidas são as centrífugas, compostas basicamente por uma carcaça, responsável por conter e direcionar o fluido para a descarga da bomba e converter a energia cinética em energia de pressão, um rotor, responsável por transformar a energia mecânica aplicada nele em energia cinética no fluido, e um selo mecânico, que é responsável por evitar vazamentos na parte hidráulica do sistema. Ao girar, o rotor leva a água do seu centro em direção à carcaça da bomba, gerando uma zona de baixa pressão no seu centro, fazendo com que a pressão atmosférica empurre a água para dentro da bomba. A água direcionada para a carcaça é redirecionada por essa em direção à descarga da bomba.(MESQUITA, 2015)

2.2.2 Alguns Princípios Importantes

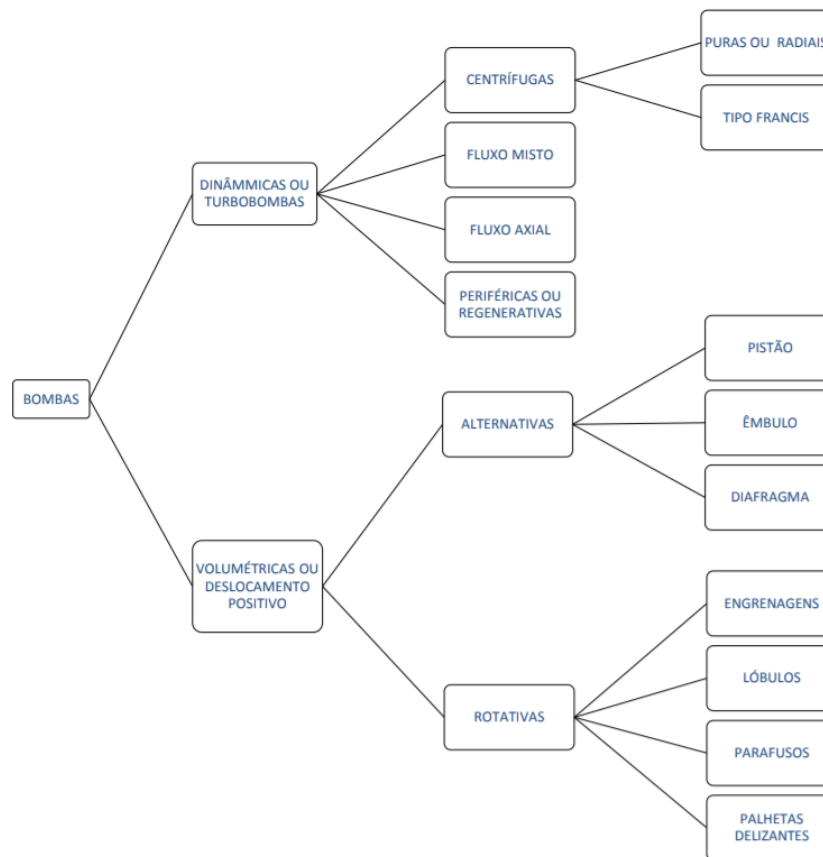
2.2.2.1 Altura manométrica total (AMT)

A Altura Monométrica Total é a energia que o sistema solicita para transportar o fluido do reservatório de sucção(reservatório inferior) até a descarga(reservatório superior) com uma determinada vazão. Pode ser calculada da seguinte forma:

$$H = \frac{P_2 - P_1}{\rho * g} + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2g} + Z_2 - Z_1$$

Onde:

Figura 6 – Tipos de bombas.



Disponível em:

<<http://www.monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10014606.pdf>> Acesso em 07 mai. 2018

 $H = \text{AMT}(\text{m})$
 $\frac{P_2}{\rho * g}$ = Pressão de descarga ou recalque(m)

 $\frac{P_1}{\rho * g}$ = Pressão de sucção(m)

 V_2 = Velocidade de escoamento do fluido na descarga ou recalque(m/s)

 V_1 = Velocidade de escoamento do fluido na sucção(m/s)

 Z_2 = Altura do ponto de medição na descarga ou recalque(m)

 Z_1 = Altura do ponto de medição na sucção(m)

2.2.2.2 Rendimento do conjunto motobomba(η)

O rendimento do conjunto motobomba é calculado de forma indireta:

$$\eta = \frac{W_h}{W_{el}}$$

Onde:

η =Rendimento

W_h =Potência Hidráulica(kW)

W_{el} =Potência Elétrica Absorvida pelo conjunto Motobomba(kW)

2.2.2.3 Potência Hidráulica

$$W_h = \rho * g * Q * H * 10^{-3}$$

Onde: W_h =Potência Hidráulica(kW)

ρ =Massa Específica(kg/m^3)

g =Aceleração da gravidade(m/s^2)

Q =Vazão(m^3/s)

H =Altura Manométrica Total(m)

(MESQUITA, 2015)

3 HISTÓRICO DOS SISTEMAS DE BOMBAMENTO FOTOVOLTAICOS

3.1 História da energia solar fotovoltaica

O efeito fotovoltaico foi primeiramente observado em 1839 por Edmond Becquerel ao observar que placas de platina ou prata, mergulhadas em um eletrólito geravam uma pequena diferença de potencial ao serem expostas à luz. Em 1877, W. G. Adams e R. E. Day desenvolveram o primeiro dispositivo sólido que gerava eletricidade a partir da luz, um filme de selênio depositado num substrato de ferro, com um filme de ouro semitransparente para servir de contato frontal. Apesar da eficiência de cerca de 0,5%, foi comercializado por Werner Siemens (fundador da Siemens) como fotômetro para máquinas fotográficas. Porém, a história da energia fotovoltaica fica parada até o início do século XX, com a explicação por Einstein do efeito fotoelétrico, o surgimento da mecânica quântica, a teoria de bandas e a física dos semicondutores. Com essas descobertas, foi possível atingir níveis de rendimento que tornaram viável a produção de energia solar elétrica

A primeira célula fotovoltaica moderna começou a ser desenvolvida em 1953 por Calvin Fuller, que desenvolveu o processo de dopagem, introduzindo impurezas em cristais de silício para controlar suas propriedades elétricas. Fuller produziu uma barra de silício do tipo p, ou seja, com cargas móveis positivas, ao dopá-lo com uma pequena concentração de gálio para torná-lo condutor. Ao mergulhar essa célula em um banho quente de lítio, produziu na superfície da barra uma região com excesso de elétrons livres, um silício do tipo n. Na junção p-n, a região de contato entre o silício tipo p e o silício tipo n, surge um campo elétrico permanente. Estava criada a primeira célula solar de silício, que em ensaios demonstrou uma eficiência de conversão energética de cerca de 4%, muito maior que as células de selênio que haviam até então. Após aperfeiçoamentos, substituindo o gálio por arsênio, as células chegaram aos 6% de eficiência. Gerando uma patente em 1954.

Porém, logo ficou claro que o custo da produção das células fotovoltaicas era muito elevado, restringindo sua aplicação apenas a situações específicas, como na corrida espacial que começava na época.

Consideradas apenas uma curiosidade na época, foi com relutância que a NASA aceitou incorporar as células fotovoltaicas como um back-up de uma pilha convencional no Vanguard I, em 1958. As pilhas químicas do satélite falharam, mas o painel de apenas 100cm^2 manteve o satélite operacional por impressionantes 8 anos, o que elevou as células fotovoltaicas ao status de fonte de energia primária dos satélites norte-americanos. Os soviéticos não demoraram a seguir o mesmo caminho, e dois anos depois o Sputnik-3 foi lançado equipado com painéis fotovoltaicos. Hoje todos os veículos espaciais são equipados com painéis fotovoltaicos, desde a estação espacial internacional, até os rovers que andam em Marte desde 2004 e continuam ativos.

O investimento nos anos 60 em células fotovoltaicas para utilização em projetos espaciais levou à produção de células mais eficazes, atingindo eficiências de 13,5%, mas não a células mais baratas. Porém foi nessa década que as primeiras aplicações terrestres ocorreram, com a utilização dessas células em sistemas de telecomunicações remotos e boias de navegação.

Esse cenário mudou no início da década de 70. Com a crise do petróleo em 73, houve um súbito investimento para redução de custos de produção das células fotovoltaicas. Foi nesse cenário que se começou a utilizar o silício policristalino, de produção mais barata que o monocristalino, a produção de silício diretamente em fita, diminuindo custos de produção, e a utilização de novos métodos de deposição de contatos. Essas inovações diminuíram o custo das placas para menos de um sexto em menos de uma década. Mas os investimentos em células mais eficientes não pararam, e células de silício monocristalino com mais de 20% de eficiência já surgiam.

Nos anos 80 e 90 surge a preocupação da ameaça das alterações climáticas. Em 82 na Califórnia, é instalada a primeira central solar de grande envergadura, e no início da década de 90, países como Alemanha e Japão lançam campanhas de telhados solares. Em 98, é atingida a eficiência recorde de 24,7% com células de silício monocristalino, e em 2005 são anunciadas células com silício policristalino com eficiência superior a 20%. Células mais complexas, como as com configuração em cascata, que sobrepõe células otimizadas para comprimentos de ondas diferentes já atingem 34% de eficiência.

Se com a corrida espacial se buscava maior eficiência, e com a crise petrolífera se buscava menor custo, em 2006 já se observa uma busca por um amplo mercado para a energia fotovoltaica, incentivando uma produção em larga escala para que a energia solar ganhe um espaço significativo no mercado energético mundial. (VALLÊRA; BRITO, 2006)

3.2 Antecedentes do bombeamento fotovoltaico

Associado a programas de melhorias de condições de vida em países de terceiro mundo, o avanço na tecnologia fotovoltaica levou ao desenvolvimento da tecnologia de bombeamento fotovoltaico a partir da década de 70, com os primeiros sistemas a serem implantados sendo produzidos por firmas francesas. Constituíam-se de motores de imã permanente, acoplados a bombas submersas através de um eixo vertical, com o motor situado na superfície do poço. A tecnologia evoluiu durante os anos 80, possibilitando a origem de equipamentos com construção simples e confiável, chegando a ordem de 10 mil sistemas instalados pelo mundo até o início da década de 90, dos quais por volta de um terço se encontravam em países em desenvolvimento. O avanço da aplicação de sistemas de bombeamento fotovoltaico aumentou à medida que o preço dos geradores fotovoltaicos diminuiu, o que refletiu na redução do custo dos sistemas de bombeamento com essa tecnologia. Adicionado ao aumento da eficiência dos mesmos, os sistemas de bombeamento fotovoltaicos se tornaram uma opção competitiva com as outras disponíveis.(FRAIDENRAICH; VILELA, 1999)

3.3 Principais projetos

Em 1978 temos o primeiro registro de um sistema de utilização a campo, desenvolvido e instalado por Dominique Campana, na ilha de Córsega. O sistema contava com módulos da empresa Philips e bombas em corrente contínua desenvolvidos em conjunto com a empresa Guinard, e abastecia uma fazenda de criação de ovelhas. Porém, o primeiro empreendimento em larga escala se deu no continente africano, e foi viabilizado pela entidade Mali Aqua Viva, encabeçada pelo Padre Bernard Vespieren. Os primeiros sistemas foram instalados no final da década de 70, e entre 1977 e 1990 os mais de 200 sistemas instalados alavancaram projetos em países vizinhos. O Programa das nações unidas, com apoio do Banco Mundial, levou a cabo entre 1979 e 1981, um projeto de teste e avaliação de pequenos SBF a campo, na irrigação de pequenas áreas. O trabalho mostrou o grande potencial para aplicações rurais, mas apontou a necessidade de melhora na confiabilidade, e redução dos preços dos equipamentos. No início da década de 90, a agência alemã, Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ), em cooperação com as autoridades responsáveis pelo abastecimento de água dos países receptores (Argentina, Brasil, Indonésia, Jordânia, Filipinas, Tunísia e Zimbábwe), instalou 90 SBF, totalizando cerca de 180 kWp, para demonstrar os custos reais de implementação e a maturidade da tecnologia. A confiabilidade mostrou uma melhora visível com o Programa Regional Solar (PRS) para abastecimento de água a populações rurais em países da África Sahe-liana, com 1.040 sistemas de bombeamento instalados. O projeto buscava uma melhora para população no acesso à água, em quantidade e qualidade. O projeto se preocupou muito com a qualidade técnica dos equipamentos, de forma a melhorar o seu rendimento,

e também uma melhora estética, visando aumentar a aceitação dos usuários. Esse modelo de projeto incluía equipamentos que viabilizavam testes de funcionamento, bem como coleta de dados através de hidrômetros, receptor para manômetro, e orifício na tampa do poço permitindo o uso de sensores de nível. Falhas ocorridas nos testes iniciais indicavam que, apesar da adequação técnica dos módulos e motobombas, havia uma falta no padrão de qualidade dos equipamentos periféricos. Numa cooperação entre Brasil e Alemanha, o projeto Eldorado realizado em Pernambuco contava com padrão de qualidade PRS, e permitia a execução de testes em campo, mas constatou-se que apenas alguns testes foram realizados.(FEDRIZZI; SAUER, 2002)

3.4 O bombeamento fotovoltaico no Brasil

Estima-se que até 2002 mais de 3290 sistemas fotovoltaicos foram instalados no Brasil, sendo que os primeiros só foram viabilizados por cooperação internacional. Desses, 2485 sistemas pertenciam ao Programa de Desenvolvimento Energético dos Estados e Municípios, PRODEEM. (FEDRIZZI; SAUER, 2002)

Tabela 1 – Sistemas de bombeamento fotovoltaico contemplados em projetos no Brasil entre 1981 e 2002.

Programa/Estado	Unidade	Potência kWp
de 1981 a 1984	150	93
MME-PRODEEM Fase I	54	78
MME-PRODEEM Fase II	179	211
MME-PRODEEM Fase III	176	135
MME-PRODEEM Fase IV	1.240	696
MME-PRODEEM Emerg.	800	235
MCT-PTU/Mamirauá	29	4,5
MS-FUNASA	39	31,1
Cooperação Internacional	54	38,4
Gov. Bahia	62	34,8
Gov. Minas Gerais	168	125,5
Pref. Rio do Soto e Belém	6	5,4
Uso privado	298	28,3
Total	3.255	1.716

(a) Fonte: Adaptado de (FEDRIZZI; SAUER, 2002)

Até 2015 estima-se que mais de 200 outros SBF foram instalados só na região semiárida.

4 ESTUDO DE CASO

Neste trabalho serão analisadas as capacidades de produção em litros/hora de sol de três bombas, sendo uma bomba Shurflo do modelo 8000-443-136 e duas de diafragma com potências de 36W e 60W. Para isso será utilizada uma torre de teste desenvolvida no Laboratório de Automação Predial(LAP) da UFOP, onde este trabalho é realizado.

4.1 Montagem do sistema

O sistema de testes de bombas foi idealizado, projetado e montado no LAP, e consiste de:

- Torre de estrutura metálica
- Hidrômetro com saída pulsada de 3/4"
- Hidrômetro convencional
- Sensor de fluxo de água compatível com arduino
- contador de pulsos
- Reservatórios de água
- Boia de proteção contra funcionamento a vazio
- Painel fotovoltaico para alimentação das bombas
- tubulação e conexões

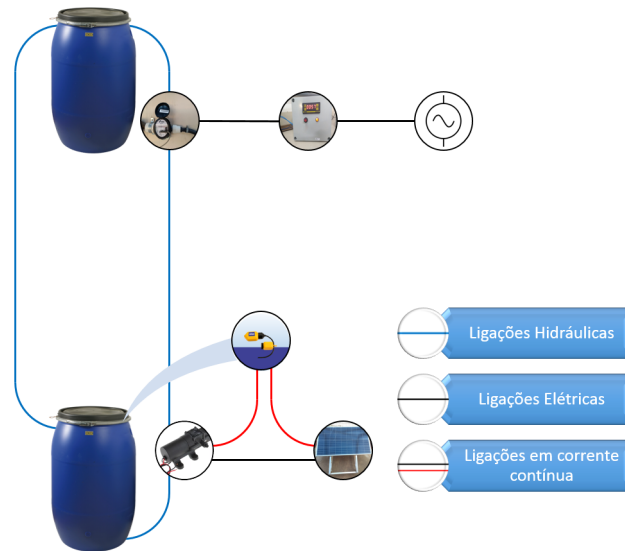
No esquema da Figura 7 é representado o sistema como um todo.

4.1.1 Estrutura

A estrutura é basicamente composta de uma torre de estrutura metálica com plataformas onde se localizam os reservatórios de água e a bomba. A torre possui bases triangulares de 1,2m de lado, separadas de 1,75m de altura entre si, estando a base inferior a 35cm do chão.

Figura 7 – Esquema do sistema completo

Sistema Completo



4.1.2 ligação elétrica das bombas

A bomba a ser testada é ligada a um painel fotovoltaico e a uma boia de proteção contra funcionamento a vazio, de acordo com o diagrama da Figura 9.

Onde temos o Painel fotovoltaico como fonte, a boia atuando como chave de proteção, e a bomba como carga.

4.1.2.1 bombas utilizadas

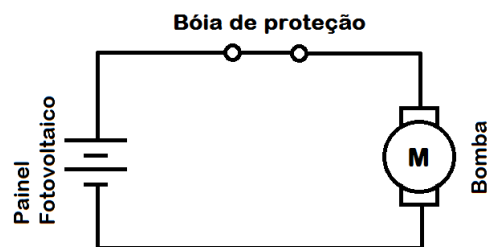
as bombas utilizadas foram:

- Bomba Shurflo 8000-443-136
 - Voltagem: 12VDC
 - Amperagem: 7.0A max
 - Max Flow: 6.5LPM
- Bomba de Diafragma 36W
 - Voltagem: 12VDC
 - Amperagem: 3.0A
 - Max Flow: 4LPM

Figura 8 – Torre de estrutura metálica



Figura 9 – Diagrama da ligação dos componentes



- Bomba de Diafragma 60W

Voltagem: 12VDC

Amperagem: 5.0A

Max Flow: 4.5LPM

Figura 10 – Ligação dos componentes Elétricos

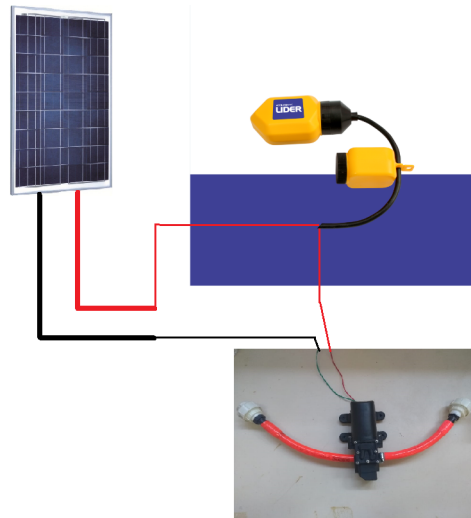
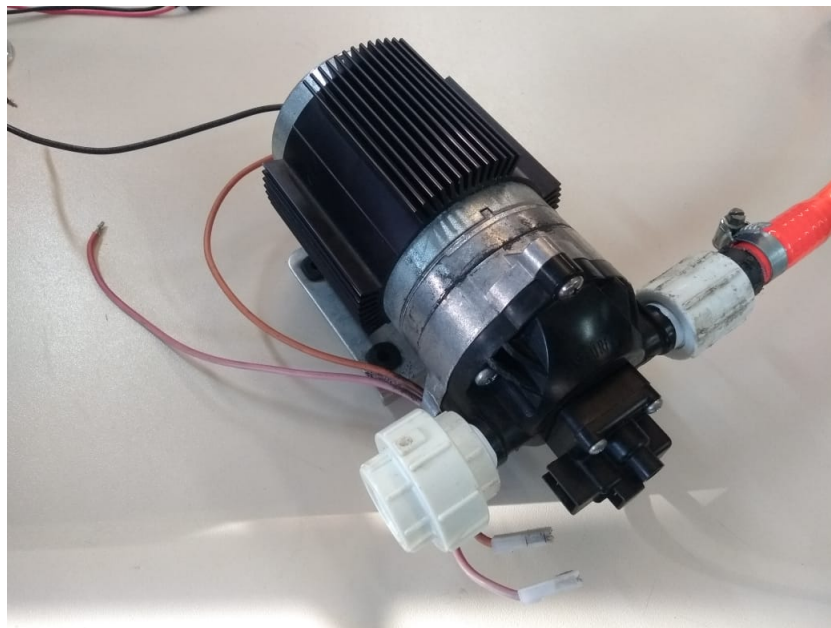


Figura 11 – Bomba Shurflo 8000-443-136



Nas conexões hidráulicas das bombas foram instaladas uniões usadas para facilitar a troca das bombas sem a necessidade de esvaziar os reservatórios.

4.1.3 sistema de aquisição de dados

A aquisição de dados está sendo feita através de um hidrometro com saída pulsada ligado a um contador de pulsos, que permite contabilizar o volume em litros bombeado pela bomba.

Figura 12 – Bomba de Diafragma 36W

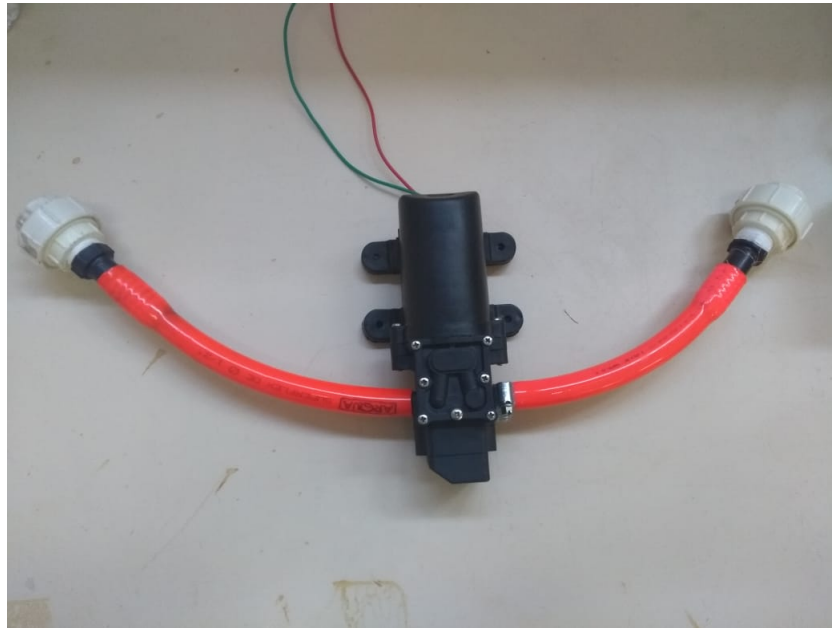


Figura 13 – Bomba de Diafragma 60W

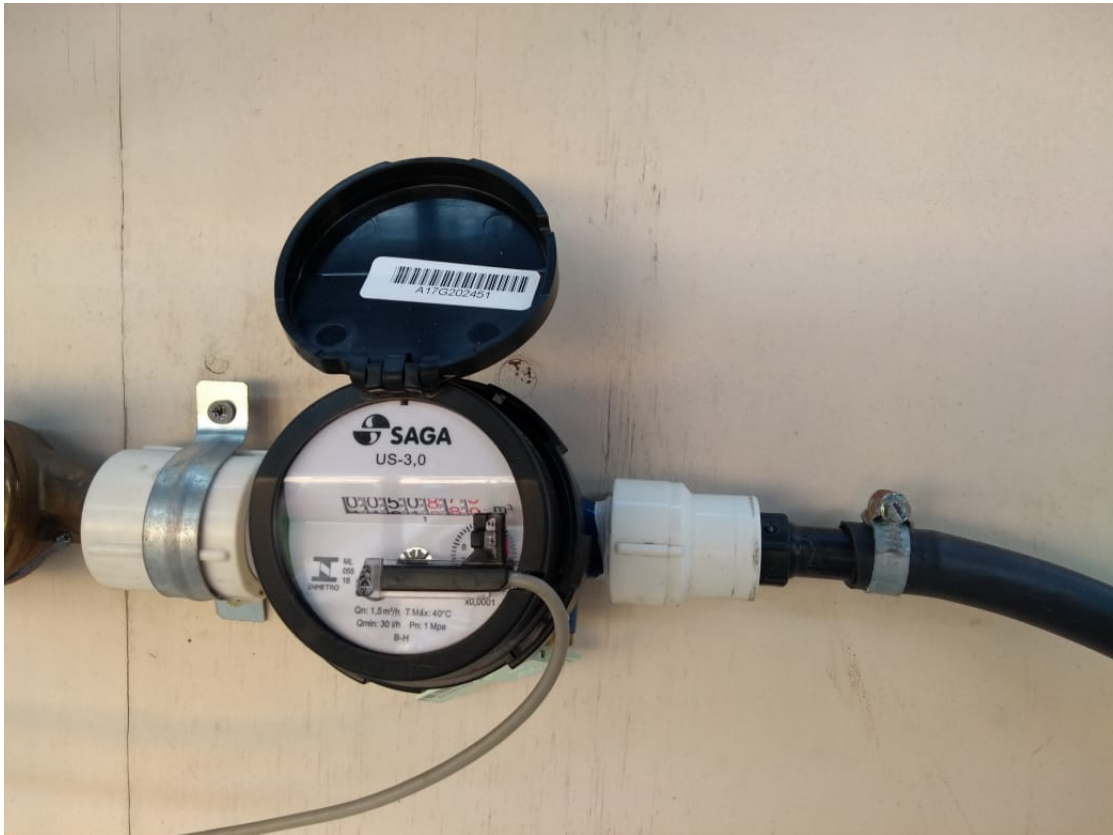


4.1.4 ligações hidráulicas

O sistema hidráulico consiste de dois reservatórios de 100l. O inferior com saída para a bomba, entrada de alimentação, entrada do retorno do tanque superior, e saída para escape de água. O superior conta com alimentação proveniente da bomba, saída para alimentar o sistema de irrigação por gotejamento presente no mesmo laboratório, saída superior de retorno para o reservatório inferior. As tubulações são de 3/4". na tubulação anterior e posterior às bombas, foram instalados registros, que permitem a troca das bombas sem desperdício de água.

Inicialmente os hidrômetros foram instalados no retorno do reservatório superior, porém o fato deste estar alimentando outros sistemas levou à instalação logo após a bomba, visando maior confiabilidade nas medidas.

Figura 14 – Hidrômetro de saída pulsada



4.2 metodologia de aquisição das medidas

As medidas foram feitas durante a manhã e a tarde, em dias ensolarados, de forma a obter a média de litros por hora de sol que as bombas produzem ao serem alimentadas por um único painel fotovoltaico, sem intermédio de controladores ou acumuladores de carga.

Figura 15 – Contador de Pulsos



Figura 16 – Ligação das bombas



5 RESULTADOS

O estudo de caso foi realizado durante o período de duas semanas do período de inverno, considerado um período crítico para fins de instalação, por ser uma época de menor radiação no ano. Foram coletados dados em horas de sol, de modo a verificar a capacidade das bombas em pleno funcionamento.

5.1 Dados

Com os dados obtidos, construiu-se a tabela 2, que apresenta, por bomba, os volume bombeado, o tempo de funcionamento para bombear esse volume, e a média de litros bombeados por hora.

Tabela 2 – Dados coletados sobre a vazão das bombas

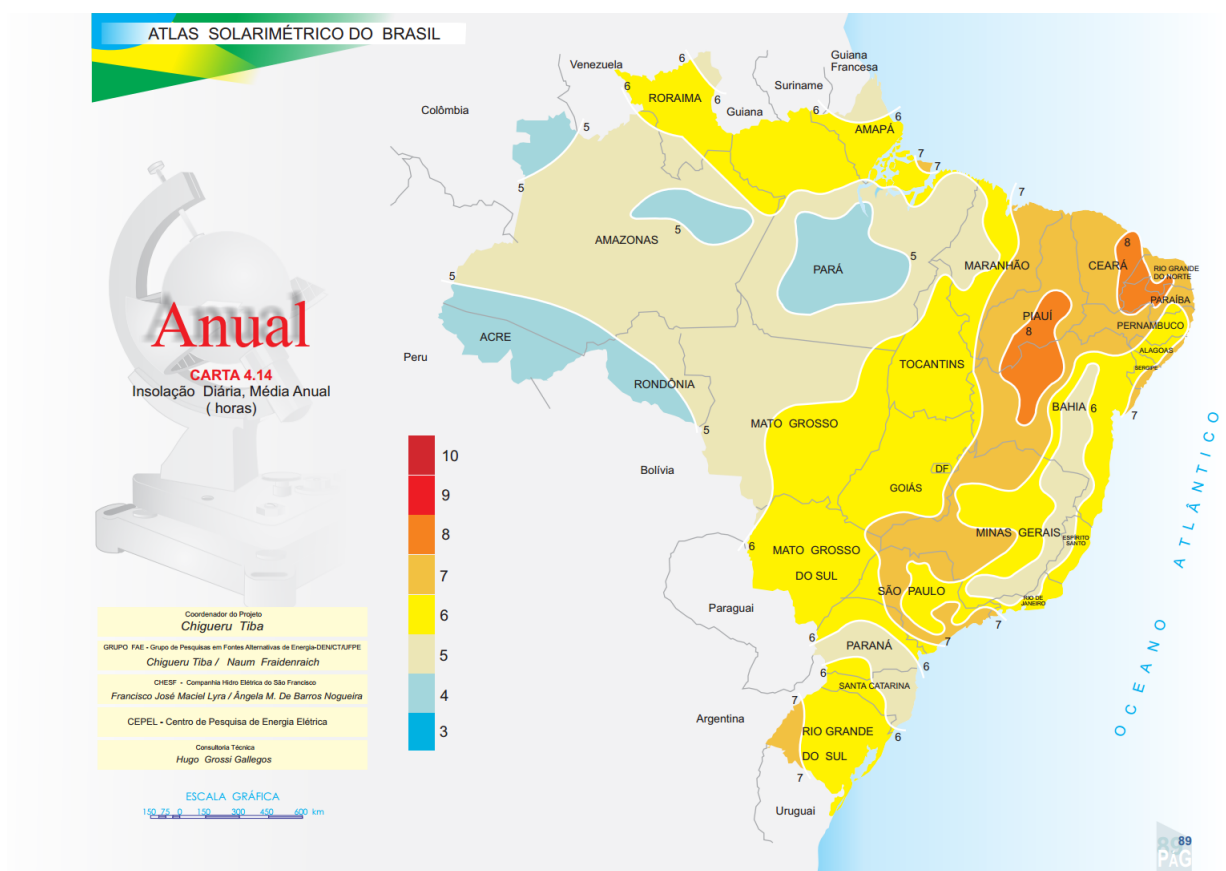
Vazão de água das bombas testadas			
Modelo	Volume(l)	Tempo(h)	Média em l/h
Diafragma 60W	1088	7,5	145,0666667
Diafragma 36W(a)	n/a	n/a	n/a
Shurflo	1690	4,5	375,5555555

(a) A bomba não foi capaz de vencer a altura manométrica do sistema

5.2 Considerações a Respeito dos Dados Obtidos

Tomando como referência a norma da Sabesp de que a média em litros por pessoa/dia é de 150l para residências, e considerando 5h de sol por dia, de acordo com a média anual presente no Atlas solarimétrico do Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito(CRESESB) presente na Figura 17, os dados obtidos durante a realização deste trabalho levam à observação de que as bombas Shurflo 8000-443-136 e de diafragma 60W conseguiriam abastecer uma casa com 10 e 4 pessoas respectivamente. A bomba de diafragma 36W não foi capaz de vencer a altura manométrica proposta, não sendo possível colher dados, e portanto não seria adequada para a aplicação residencial.

Figura 17 – Atlas Solarimétrico representando a média anual de horas de sol diárias no Brasil.



Disponível em

<<http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=publicacoes&task=livro&cid=2>>

Acesso em 14 jun. 2018

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 Análise de Custo do Sistema

Na presente data, um painel fotovoltaico equivalente ao que foi utilizado pode ser adquirido pelo valor de R\$400,00 mais frete, enquanto uma bomba equivalente à de diafragma de 60W pode ser adquirida por R\$180,00 com frete incluso para o Brasil todo. Adicionando o Regulador de nível, que tem um custo por volta de R\$50,00, o custo total em equipamentos deste sistema fica em torno de R\$630,00. Este custo pode ser considerado perfeitamente viável para suprir o abastecimento de uma edificação residencial unifamiliar, habitação social ou não, o que indica uma boa opção para locais remotos ou naqueles em que ocorrem recorrentes faltas de energia.

6.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

Como indicações para trabalhos futuros estão aperfeiçoamentos do sistema utilizado e assuntos não abordados neste trabalho, tais como:

- Aprimorar o sistema de aquisição de dados, de forma a poder considerar mais variáveis;
- Analisar a produção das bombas em função da irradiação solar;
- Criar um banco de dados para melhor análise do comportamento das bombas;
- Analisar a vida útil das bombas nesta configuração minimalista;
- Elevar o painel fotovoltaico de modo a evitar sombreamento pelos prédios;

REFERÊNCIAS

- CASTRO, R. M. G. Introdução à energia fotovoltaica. Lisboa, p. 48, 2002. Disponível em: <http://www.troquedeenergia.com/Produtos/LogosDocumentos/Introducao_a_Energia_Fotovoltaica.pdf>. Acesso em: 07 mai. 2018.
- FEDRIZZI, M. C.; SAUER, I. L. Bombeamento solar fotovoltaico, histórico, características e projetos. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 4., 2002, Campinas. **Proceedings Online...** Belo Horizonte, 2002. Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC000000022002000100034&lng=en&nrm=abn>. Acesso em: 19 fev. 2018.
- FRAIDENRAICH, N.; VILELA, O. Avanços em sistemas de abastecimento de Água com bombeamento fotovoltaico para comunidades rurais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Rio de Janeiro, v. 4, n. 3, 1999. Disponível em: <http://www.abrh.org.br/SGCv3/index.php?PUB=1&ID=48&SUMARIO=670&ST=avancos_em_sistemas_de_abastecimento_de_agua_com_bombeamento_fotovoltaico_para_comunidades_rurais>. Acesso em: 06 jan. 2018.
- GOMES, H. P. (Org.). **Sistemas de Bombeamento: Eficiência energética**. 1. ed. João Pessoa: Editora Universitária UFPB, 2009. 460 p.
- MAKINO, D. L. Tese (Mestrado) - Unicamp, **Eficiência energética em sistemas de abastecimento de água usando bombas de rotação variável**. Limeira, SP: [s.n.], 2012. Disponível em: <<http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/267783>>. Acesso em: 04 mai. 2018.
- MESQUITA, G. F. de. **Estudo comparativo de consumo energético de uma motobomba centrífuga com o controle da vazão na forma tradicional e com a utilização do inversor de frequência**. Monografia (Projeto de Graduação) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015. Disponível em: <<http://www.monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10014606.pdf>>. Acesso em: 04 mai. 2018.
- MORAES, A. et al. O papel das instituições na difusão de sistemas fotovoltaicos de bombeamento no semiárido brasileiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 6., 2016, Belo Horizonte. **Anais eletrônicos...** Belo Horizonte: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2016. Disponível em: <<http://www.abens.org.br/CBENS2016/anais/anais/index.htm>>. Acesso em: 6 fev. 2018.
- VALLÊRA, A. M.; BRITO, M. C. Meio século de história fotovoltaica. **Gazeta da física**, Lisboa, v. 29, n. 1, p. 10–15, 2006. Disponível em: <<http://solar.fc.ul.pt/gazeta2006.pdf>>. Acesso em: 19 fev. 2018.
- VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R. **Energia solar fotovoltaica: Conceitos e aplicações**. 1. ed. São Paulo: Editora Érica, 2012. 224 p.