

CENTRO UNIVERSITÁRIO FAG
JEFERSON MANENTI ACORCI

**INSTALAÇÃO E AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA DE BOMBEAMENTO D'ÁGUA
COM PLACAS FOTOVOLTAICAS, NA CIDADE DE CASCAVEL-PR**

CASCAVEL

2017

CENTRO UNIVERSITÁRIO FAG
JEFERSON MANENTI ACORCI

**INSTALAÇÃO E AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA DE BOMBEAMENTO D'ÁGUA
COM PLACAS FOTOVOLTAICAS, NA CIDADE DE CASCAVEL-PR**

Trabalho de conclusão de curso apresentado como
requisito parcial de avaliação para obtenção do título de
engenheiro mecânico pelo Centro Universitário FAG.

Professor orientador Gilson Debastiani.

CASCAVEL
2017

CENTRO UNIVERSITÁRIO FAG
JEFERSON MANENTI ACORCI

**INSTALAÇÃO E AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA DE BOMBEAMENTO
D'ÁGUA COM PLACAS FOTOVOLTAICAS, NA CIDADE DE CASCAVEL-PR**

Trabalho apresentado no Curso de Engenharia Mecânica, do Centro Universitário FAG,
como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica,
sob a orientação do Professor Msc. Gilson Debastiani.

BANCA EXAMINADORA



Gilson Debastiani
Centro universitário FAG
Mestre



Roberson Roberto Parizotto
Centro universitário FAG
Mestre

Cascavel – PR, 10 de julho de 2017.

EPÍGRAFE

“Deixem que o futuro diga a verdade e avalie cada um de acordo com o seu trabalho e realizações. O presente pertence a eles, mas o futuro pelo qual eu sempre trabalhei, pertence a mim.”

Nikola Tesla

AGRADECIMENTOS

A Deus, pois sempre tem me presenteado com o caminho certo e por ter colocado tantas pessoas maravilhosas em minha vida.

À minha esposa Jenyffer, pela compreensão, companhia, incentivo e ajuda dispensada durante mais esta etapa vencida, tendo vivenciado de perto todos os momentos de angústia, aflição e alegria.

A meus pais Francisco e Sandra e amigos, que mesmo distantes, sempre ofereceram palavras de incentivo.

Ao meu orientador Prof. Me. Gilson Debastiani, pelo apoio incondicional, paciência, orientação precisa e amizade.

À UNIOESTE pelo empréstimo da motobomba, na figura do Prof. Dr. Jair Antônio Cruz Siqueira, bem como ao Prof. Dr. Carlos Eduardo Camargo Nogueira na contribuição à construção do experimento.

Aos grandes amigos Cleberson de Souza Pereira, Renato Antonio Stormoski e Welington Douglas Koch por se fazerem presentes em todas as etapas da graduação

Ao Centro Universitário Fundação Assis Gurgacz, pela disponibilização das instalações, permitindo assim a montagem do projeto de pesquisa.

RESUMO

A energia solar é uma opção limpa e renovável de produção de energia, podendo ser utilizada para os mais diversos fins, dentre eles, o bombeamento de água. O presente trabalho foi desenvolvido com a finalidade de avaliar o desempenho em campo de um sistema de bombeamento de água acionado por painéis fotovoltaicos policristalinos isolados, instalados no Centro Universitário FAG, com o objetivo de atender uma família rural média. O sistema é composto por três módulos de painéis fotovoltaicos de 140 Wp cada, uma motobomba SHURflo 8000 e instalado no Laboratório de Fontes de Energias Renováveis do Centro. O experimento conta ainda com quatro baterias de 100 Ah cada, para armazenar o excedente da produção de energia elétrica e alimentar a carga requerida nos momentos em que a produção do sistema fotovoltaico for insuficiente; um controlador de carga, para proteger o banco de baterias de possíveis sobrecargas, quando estas estiverem carregadas e a produção for superior ao consumo da motobomba alocada no sistema. Montou-se um divisor de tensão, e um dispositivo eletrônico de isolamento e sensor de corrente (ASC 712 30A), para realizar o registro das grandezas elétricas no datalogger. Foram coletados dados de irradiação solar, volume de água bombeado, tensão e corrente elétrica dos painéis e motobomba. Devido a impossibilidade de instalação e mensuração do sistema a campo, realizou-se a montagem do experimento em nível laboratorial, permitindo assim, com os resultados obtidos, relacioná-los com a realidade a ser confrontada. Com esses dados determinou-se a energia solar disponível, a energia consumida pela motobomba, o rendimento do sistema fotovoltaico e de bombeamento, além da eficiência global, permitindo assim a representação gráfica de todo o sistema em análise. O volume médio diário de água bombeado foi de 1.720 litros e a eficiência do sistema fotovoltaico foi de 7,07%.

Palavras chaves: Energia solar, bombeamento de água, eficiência energética, geração fotovoltaica.

ABSTRACT

Solar energy is a clean and renewable option for energy production, and can be used for a wide range of purposes, including water pumping. The present work was developed with the purpose of evaluating in field performance of a water pumping system driven by isolated polycrystalline photovoltaic panels, installed in the FAG University Center, in order to serve a middle rural family. The system consists of three modules of photovoltaic panels of 140 Wp each, a water pump SHURflo 8000 and installed in the Laboratory of Sources of Renewable Energies of the Center. The experiment also has four batteries of 100 Ah each, to store the surplus of electricity production and feed the required load at a time when the production of the photovoltaic system is insufficient; A load controller, to protect the battery bank from possible overloads when they are charged and the output is higher than the water pump used in the system. A voltage divider and an electronic isolation device and current sensor (ASC 712 30A) were set up to record the electrical quantities in the datalogger. The data collected were solar irradiation, volume of pumped water, voltage and electric current of panels and water pump. Due to the impossibility of installing and measuring in field system, the experiment was set laboratoryal level, allowing, with the results obtained, to relate them to the reality to be confronted. With this data the available solar energy, the energy consumed by the water pump, the yield of the photovoltaic system and of pumping were determined, besides the global efficiency, thus allowing the graphical representation of the whole system under analysis. The average daily volume of pumped water was 1,720 liters and the efficiency of the photovoltaic system was 7.07%.

Keywords: Solar energy, water pumping, energy efficiency, photovoltaic generation.

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Potência.....	39
Equação 2 – Altura monométrica	39
Equação 3 – Vazão	39
Equação 4 – Energia disponível	40
Equação 5 – Energia produzida	40
Equação 6 – Irradiação total	40
Equação 7 – Eficiência fotovoltaica	40
Equação 8 – Eficiência da motobomba	41
Equação 9 – Eficiência global	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Consumo aproximado de água em uma pequena propriedade rural.....	26
Tabela 2 – Especificações técnicas dos módulos fotovoltaicos.	30
Tabela 3 – Especificações técnicas da motobomba SHURflo 8000.....	33
Tabela 4 – Especificações técnicas do <i>data logger</i>	37

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Participação das fontes renováveis na matriz elétrica brasileira.....	15
Figura 2 – Matriz elétrica brasileira (ano base 2015).....	16
Figura 3 – Número de conexões em geração distribuídas.....	19
Figura 4 – Mapa de insolação do território brasileiro	20
Figura 5 – Sistemas de bombeamento fotovoltaico.....	21
Figura 6 – Configurações de instalação de um sistema de bombeamento	22
Figura 7 – Dimensão do gerador em função da altura manométrica e da vazão.....	23
Figura 8 – Vista panorâmica dos painéis fotovoltaicos e estação meteorológica	27
Figura 9 – Micro estação meteorológica	28
Figura 10 – Console da estação meteorológica Vantage PRO2.....	29
Figura 11 – Módulos fotovoltaicos.....	30
Figura 12 – Controlador de carga.....	32
Figura 13 – Motobomba SHURflo 8000.....	33
Figura 14 – Hidrômetro	34
Figura 15 – Manômetro	35
Figura 16 – Fielder Logger Novus	36
Figura 17 – Divisor de tensão, amplificador operacional e sensor de corrente.....	38
Figura 18 – Vista geral dos equipamento do experimento	43
Figura 19 – Reservatórios, motobomba e hidrômetro	44
Figura 20 – Altura manométrica e detalhe do manômetro	46
Figura 21 – Quantidade de água bombeada no período de observação.....	47
Figura 22 – Frequência da irradiação solar por hora.	48
Figura 23 – Média horária da energia solar produzida.....	49
Figura 24 – Frequência de ocorrência da irradiação solar.....	49
Figura 25 – Energia dos painéis fotovoltaicos.....	50
Figura 26 – Energia disponível versus energia consumida motobomba	51
Figura 27 – Potência consumida versus litros bombeados por minuto.	52

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 OBJETIVOS	13
1.1.1 Objetivo geral	13
1.1.2 Objetivos específicos	13
1.2 JUSTIFICATIVA	13
1.3 PROBLEMAS DA PESQUISA	14
1.4 DELIMITAÇÕES DA PESQUISA	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 A ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL	15
2.1.1 Características da energia elétrica no Brasil	15
2.2 IMPORTÂNCIA DAS FONTES ALTERNATIVAS NA MATRIZ ENERGÉTICA.....	16
2.3 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA.....	17
2.4 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA NO BRASIL.....	18
2.5 O ESTÁGIO TECNOLÓGICO DO BOMBEAMENTO FOTOVOLTAICO.....	20
2.5.1 Gerador fotovoltaico.....	22
2.5.2 Bombas	23
2.5.3 Motores.....	24
2.6 ENERGIA ELÉTRICA NO MEIO RURAL.....	25
3 MATERIAL E MÉTODOS	27
3.1 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL	27
3.2 EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÕES METEOROLÓGICAS.....	28
3.3 EQUIPAMENTOS INSTALADOS NO SISTEMA FOTOVOLTAICO	29
3.3.1 Módulos fotovoltaicos	29
3.3.2 Baterias	31
3.3.3 Sistema de proteção	31
3.4 SISTEMA DE BOMBEAMENTO D'ÁGUA.....	32
3.4.1 Motobomba.....	32
3.4.2 Hidrômetro	34
3.4.3 Reservatórios	34
3.4.4 Manômetro	35
3.5 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS ELÉTRICOS	36

3.6 EQUIPAMENTOS PARA MEDIÇÃO DE DADOS ELÉTRICOS	37
3.7 COLETA DOS DADOS METEOROLÓGICOS E ELÉTRICOS	38
3.8 PARÂMETROS CALCULADOS	39
3.8.1 Potência	39
3.8.2 Determinação da Altura Manométrica	39
3.8.3 Vazão	39
3.8.4 Energia disponível e energia consumida	40
3.8.5 Eficiências	40
3.9 ANÁLISE DOS DADOS COLETADOS	42
3.10 VISTA GERAL DO EXPERIMENTO	43
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	45
4.1 CONSIDERAÇÕES	45
4.1.1 Altura manométrica	45
4.2 VOLUME BOMBEADO DE ÁGUA	47
4.3 IRRADIÂNCIA SOLAR.....	48
4.4 DISPONIBILIDADE DE ENERGIA.....	50
4.5 ENERGIA DISPONÍVEL E ENERGIA CONSUMIDA PELA MOTOBOMBA	50
4.6 VOLUME BOMBEADO PELA ENERGIA CONSUMIDA	51
4.7 EFICIÊNCIA DO SISTEMA	52
5 CONCLUSÃO.....	54
5.1 TRABALHOS FUTUROS	54
REFERÊNCIAS	56

1 INTRODUÇÃO

A busca pela produção de energia renovável é uma necessidade atual. Grandes esforços têm sido despendidos por empresas, governos e centros de pesquisas no Brasil e também no mundo, com a finalidade de substituir a geração de energia proveniente das fontes fósseis. Neste sentido fontes de geração de energia renovável, como é o caso do sol, passaram a ser olhadas com maior interesse.

De acordo com Villalva (2015), o sol é a principal fonte de energia de nosso planeta e praticamente toda a energia usada pelo ser humano tem sua origem nele. A superfície da Terra recebe anualmente uma quantidade de energia solar, nas formas de luz e calor, suficiente para suprir em milhares de vezes a necessidade mundial, mas somente uma pequena parcela dessa energia é aproveitada.

O conceito de energia limpa é frequentemente associado às fontes renováveis, pois em comparação com os combustíveis fósseis, apresentam reduzidos impactos ambientais e praticamente não originam resíduos ou emissões de poluentes (VILLALVA, 2015).

A energia do sol pode ser utilizada para produzir eletricidade pelo efeito fotovoltaico, que é a conversão direta da luz solar em energia elétrica (SAMPAIO, 2005). A energia elétrica é coletada e processada por dispositivos controladores e conversores, podendo ser armazenada em baterias (sistemas isolados) ou utilizadas diretamente (sistemas conectados) à rede elétrica.

O dimensionamento de sistemas fotovoltaicos de bombeamento de água envolve como parâmetros básicos a demanda a ser atendida, m^3/dia , e a disponibilidade do recurso solar, kWh/m^2 por dia. Para este último parâmetro, de maneira geral, usa-se como referência o valor diário médio mensal para a pior situação. Além desses parâmetros, considera-se também os dias de autonomia para o dimensionamento da capacidade do reservatório de água. Em suma, a tarefa consiste em calcular a potência necessária para atender a demanda de água solicitada nas condições de contorno prefixadas.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Verificar se um sistema isolado de bombeamento de água, alimentado com energia fotovoltaica, atende à demanda de uma família rural média, avaliando sua respectiva eficiência.

1.1.2 Objetivos específicos

- Verificar se o sistema de bombeamento atende à demanda de uma família rural média;
- Realizar a coleta e interpretação dos dados elétricos e meteorológicos;
- Levantar as eficiências dos sistemas envolvidos.

1.2 JUSTIFICATIVA

A água, assim como o oxigênio e a alimentação, constitui a necessidade básica dos seres vivos. O organismo humano pode passar vários dias sem alimentação, mas poderá se extinguir se passar poucos dias ou inclusive horas sem se hidratar (ONUBR, 2016). Assim sendo, o fácil acesso à mesma, provavelmente seja o primeiro item a ser considerado para o estabelecimento de assentamentos humanos em qualquer parte do planeta.

Dotar comunidades isoladas e propriedades rurais com sistemas de bombeamento de água de poços através de energia fotovoltaica, pode ser uma solução competitiva e viável, pois supriria adequadamente a necessidade diária de consumo de água destas.

1.3 PROBLEMAS DA PESQUISA

A geração de energia através da tecnologia fotovoltaica tem como um dos principais problemas para a sua disseminação, principalmente em países em desenvolvimento, no caso o Brasil, seu elevado custo de investimento inicial.

Para que haja esta disseminação, não basta que o produto seja tecnologicamente confiável, é de vital importância que este seja dimensionado corretamente, não somente em termos de funcionamento do sistema, como também em termos econômicos. E lógico, com um bom dimensionamento do sistema, ele será capaz de proporcionar o melhor desempenho com baixos custo operacional.

Conforme Pinho e Galdino (2014, p. 319), o consumo de água médio diário por pessoa para uma propriedade rural de pequeno porte está entre 40 e 70 litros para cada indivíduo e conforme censo demográfico de 2002, uma família rural média tem 4 habitantes, apresentando um consumo mínimo diário de 280 litros de água somente para consumo humano.

1.4 DELIMITAÇÕES DA PESQUISA

A delimitação do tema ficou atrelada à montagem do experimento em nível laboratorial, bem como a adaptação do Laboratório de Fontes de Energias Renováveis do Centro Universitário para realizar a coleta dos dados meteorológicos, elétricos e de vazão de água.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL

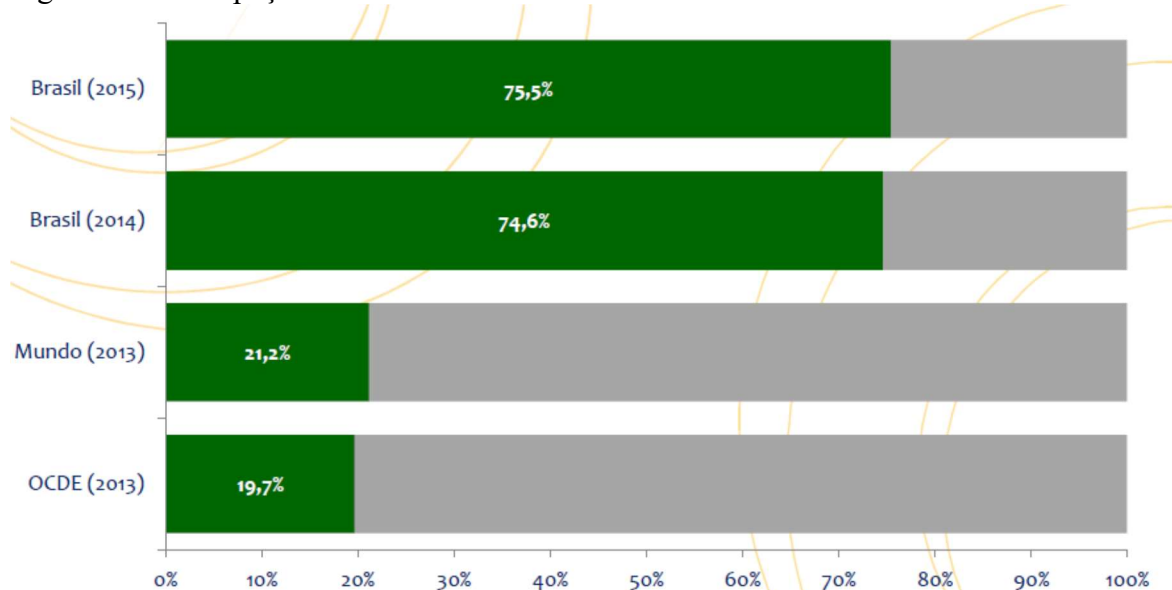
2.1.1 Características da energia elétrica no Brasil

A Matriz Elétrica Brasileira é essencialmente constituída por fontes renováveis de energia.

Em 2015, a participação de renováveis na Matriz Energética Brasileira manteve-se entre as mais elevadas do mundo, com pequeno crescimento devido particularmente à queda da oferta interna de petróleo e derivados (7,2%). (BEN, 2016)

A participação das fontes renováveis atingiu o percentual de 74,6% de toda energia elétrica produzida no ano de 2014, porém, com um pequeno crescimento, 1,1%, devido particularmente à queda da oferta interna de petróleo e derivados no ano de 2015. A Figura 1 representa que, mesmo com esse pequeno aumento de 1,1% da participação das energias renováveis, a matriz elétrica brasileira continua com índices muito superiores aos índices apresentados pelos demais países do mundo (21,2 % no ano de 2013) (BEN, 2016).

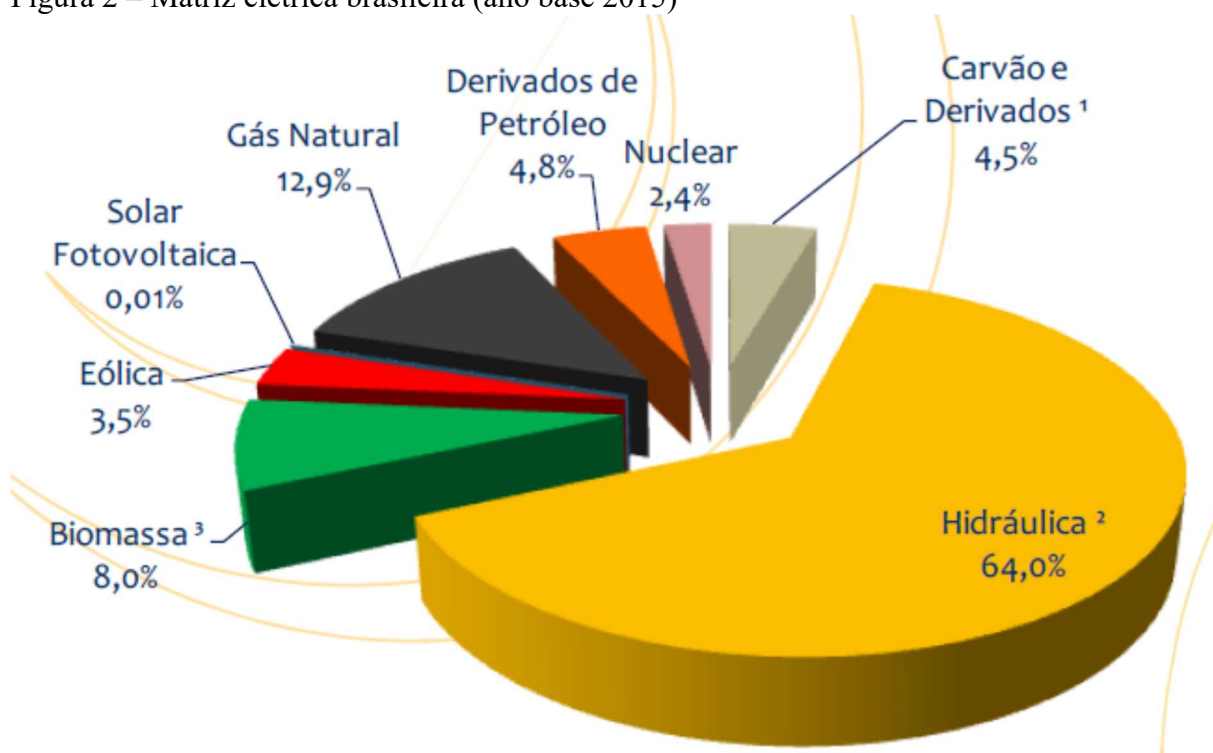
Figura 1 – Participação das fontes renováveis na matriz elétrica brasileira



Fonte: BEN (2016).

A energia elétrica de origem hidráulica possui maior representatividade no estado brasileiro, com participação de 64,0% em 2015. Por outro lado, a geração de eletricidade por fontes fotovoltaicas, mesmo com todo potencial disponível no território nacional, aparece no cenário atual apenas com a fatia de 0,01% (BEN, 2016). A Figura 2 analisa a composição da matriz elétrica brasileira no ano de 2015.

Figura 2 – Matriz elétrica brasileira (ano base 2015)



Fonte: BEN (2016).

2.2 IMPORTÂNCIA DAS FONTES ALTERNATIVAS NA MATRIZ ENERGÉTICA

O Brasil possui uma matriz energética com grande participação de fontes renováveis, o que contribui para que as emissões do setor energético sejam relativamente baixas quando comparadas às dos países desenvolvidos. Todavia, o crescimento previsto deste setor pode aumentar significativamente as emissões de carbono que, conforme BEN (2016), na geração elétrica brasileira em 2015 foi de 139,6 kg CO₂/MWh.

Com o uso racional da energia elétrica, a preocupação com as questões ambientais e o crescente aumento da demanda por energia elétrica tem norteado a procura por uma maior eficiência da atual matriz energética brasileira.

A expansão do consumo energético tem originado, nas últimas décadas, um impacto negativo sobre o ambiente, contribuindo para a implementação de novas estratégias energéticas e ambientais (GOMES, 2011).

Ainda em seus primeiros passos, mas com imenso potencial, a geração de energia elétrica que aproveita a irradiação solar (fotovoltaica), a força dos ventos (eólica) e a biomassa (térmica) têm no Brasil o cenário ideal para desenvolver-se (MARINHO, 2012).

Neste contexto, intensificam-se a busca por fontes alternativas de energia que, integradas à rede ou operando em sistemas isolados, possibilitem o desenvolvimento de todas as regiões de nosso país, provocando o menor impacto ambiental possível.

2.3 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

Segundo Pinho e Galdino (2014), a tecnologia fotovoltaica se baseia na transformação direta da radiação solar em eletricidade, usando, para tanto, características específicas de alguns semicondutores. Apesar do efeito fotovoltaico ter sido observado pela primeira vez em 1839, por Becquerel, a tecnologia é relativamente recente, iniciando-se com a revolução dos semicondutores, por volta de 1950.

Hoje já se pode dizer que a tecnologia apresenta um alto grau de desenvolvimento, e isto se reflete na elevada confiabilidade, eficiência e vida útil dos equipamentos. Primeiramente incentivada pelas indústrias de telecomunicações e aeroespacial seguida de, um grande impulso devido às crises do petróleo de 1973 e 1979 (LOPES JR, 2005).

Um sistema de geração fotovoltaica tem como elemento básico o módulo, cada célula solar produz uma diferença de potencial (ddp) que pode variar de 0,5 a 0,6 Vcc, com potência entre 1,0 e 1,5 W. Através de arranjos, com ligações série-paralelo são confeccionados os módulos fotovoltaicos, cuja potência pode chegar até 250 W, com tensão de 12 a 36 Vcc. Com novas associações série-paralelo entre os painéis, é possível dimensionar, qualquer potência e voltagem que atendam a demandas específicas, (JEWETT JR, J; SERWAY, 2012).

Villalva (2015) destaca que alguns conceitos são importantes e ajudam a ter mais clareza no dimensionamento de um sistema fotovoltaico:

a) Irradiância solar: é a medida de densidade de potência, expressa em W.m^{-2} . Usualmente, a radiação incidente é medida em um plano horizontal.

b) Irradiação solar: é a unidade de densidade de energia, expressa em $\text{KWh/m}^2/\text{dia}$ ou $\text{KWh/m}^2/\text{ano}$. Representa a medida da quantidade de energia solar fornecida ao longo de determinado período.

c) Fator de capacidade: é a razão entre a energia média produzida num intervalo de tempo e a capacidade nominal do sistema, multiplicada pelo número de horas do período considerado.

d) Constante solar: a medida da radiação solar recebida na parte superior da atmosfera terrestre. Seu valor numérico é de 1.353 Wm^{-2} .

Para Kelman (2012), a irradiação média diária ao nível do mar é de 6 kWhm^{-2} , o que corresponde a uma irradiância diária média de aproximadamente 250 Wm^{-2} ($6000 \text{ W/m}^2/24\text{h}$). Ou seja, apenas 20% da irradiância que atinge o topo da atmosfera poder ser efetivamente aproveitada na geração de energia.

Como o aproveitamento da irradiância total é baixo, uma das restrições técnicas, é o uso de grandes áreas para a implementação de projetos para a captação de energia, para que o mesmo se torne economicamente viável (ANEEL, 2005).

Porém, a geração fotovoltaica não ocasiona ruído ou emissões de gases em seu funcionamento, bem como necessita de pouca manutenção, e vida útil é na casa de 25 anos (SANTOS, 2013).

O consumo da energia elétrica produzida pelos sistemas fotovoltaicos, podem ser de duas formas: em sistemas isolados (ou autônomos) ou conectados à rede elétrica. A principal diferença entre os dois sistemas é a existência ou não de acumuladores de energia que, aos sistemas isolados são conectados num banco de acumuladores químicos (baterias), onde a energia elétrica produzida é armazenada para o posterior consumo, à noite ou em horários onde não haja produção (VILLALVA, 2015).

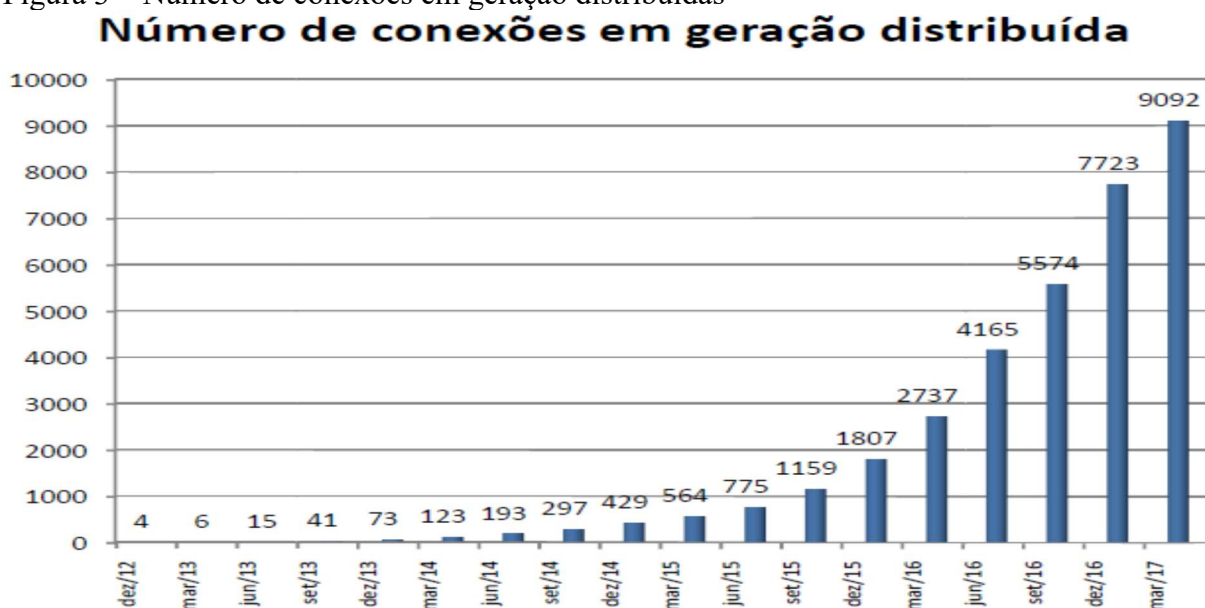
2.4 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA NO BRASIL

Como todos sabem o Brasil é um país tropical, e dispõe de elevados níveis de irradiação solar, porém a participação desta fonte de energia é ainda pouco explorada no território nacional.

Com o aumento da eficiência dos painéis e sua diminuição do custo de produção, implementação e/ou importação dos módulos fotovoltaicos, tem se tornado mais clara a oportunidade de exploração desta fonte de energia limpa.

O número de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica vem aumentando no Brasil e sua utilização deverá ter um salto extraordinário nos próximos anos, principalmente com a aprovação resolução 482/2012 pela ANEEL (VILLALVA; GAZOLI, 2012). A evolução das conexões de usuários ao sistema de Geração Distribuída, com o advento da resolução ANEEL 482/2012 e alterações da 687/2015, são representadas na Figura 3.

Figura 3 – Número de conexões em geração distribuídas



Fonte: Adaptado pelo autor de ANEEL (2017).

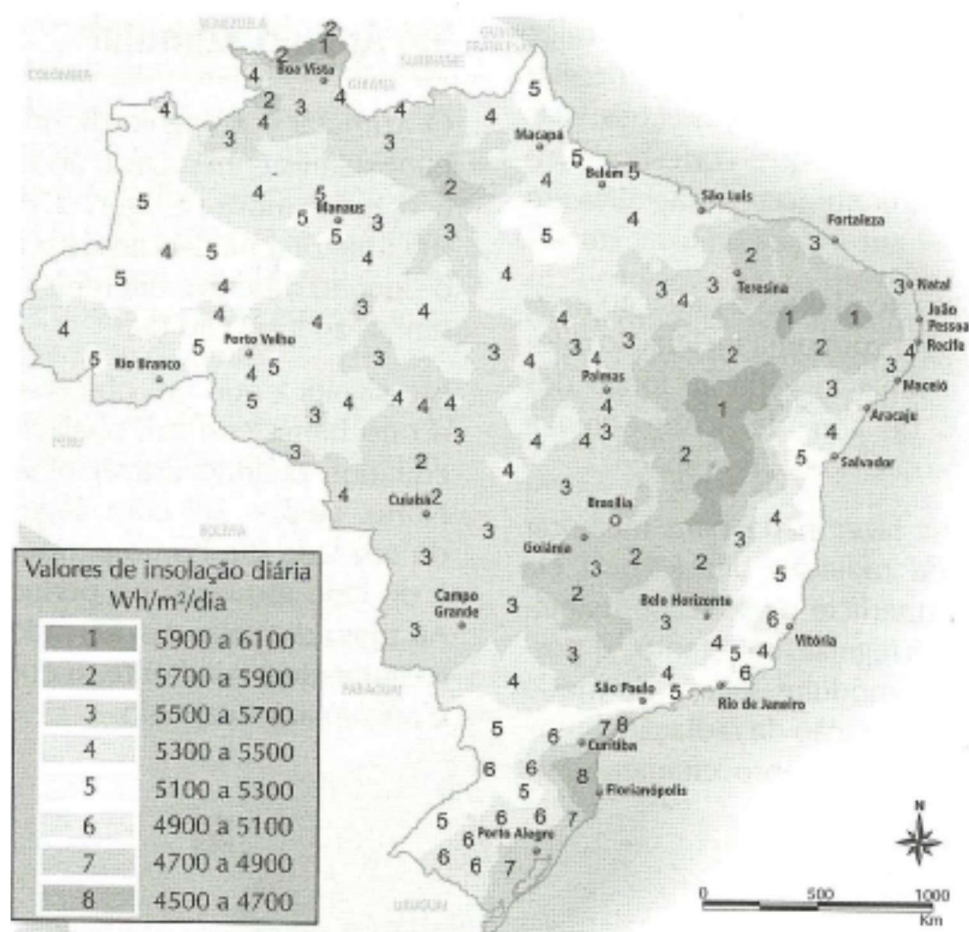
Existe uma tendência de queda acentuada nos custos dos módulos fotovoltaicos comercializados, de acordo com várias literaturas, a evolução dos custos para o período de 2001 a 2015, indica uma queda média de 1,70 R\$/Wp.ano (VILLALVA, 2015).

A determinação do potencial solar de uma localidade pode ser feita de diversas maneiras: por meio de dados de um Atlas Solarimétrico, através de cálculos que interpolam dados de estações meteorológicas próximas ao local, ou pela medição da radiação solar no próprio local (HAUSCHILD, 2006).

A medição da radiação solar em um determinado local pode ser feita com a utilização de equipamentos específicos. O pireliômetro é utilizado para determinar a medida da radiação solar direta e o piranômetro para medir a radiação solar global (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

Para o uso prático, na análise e no dimensionamento de instalações fotovoltaicas, podemos recorrer a mapas de insolação que é uma ferramenta que fornece imediatamente as informações desejadas sobre a radiação solar de uma determinada localidade (VILLALVA; GAZOLI, 2012). A Figura 4 apresenta o mapa de insolação do território brasileiro.

Figura 4 – Mapa de insolação do território brasileiro



Fonte: VILLALVA e GAZOLI (2012).

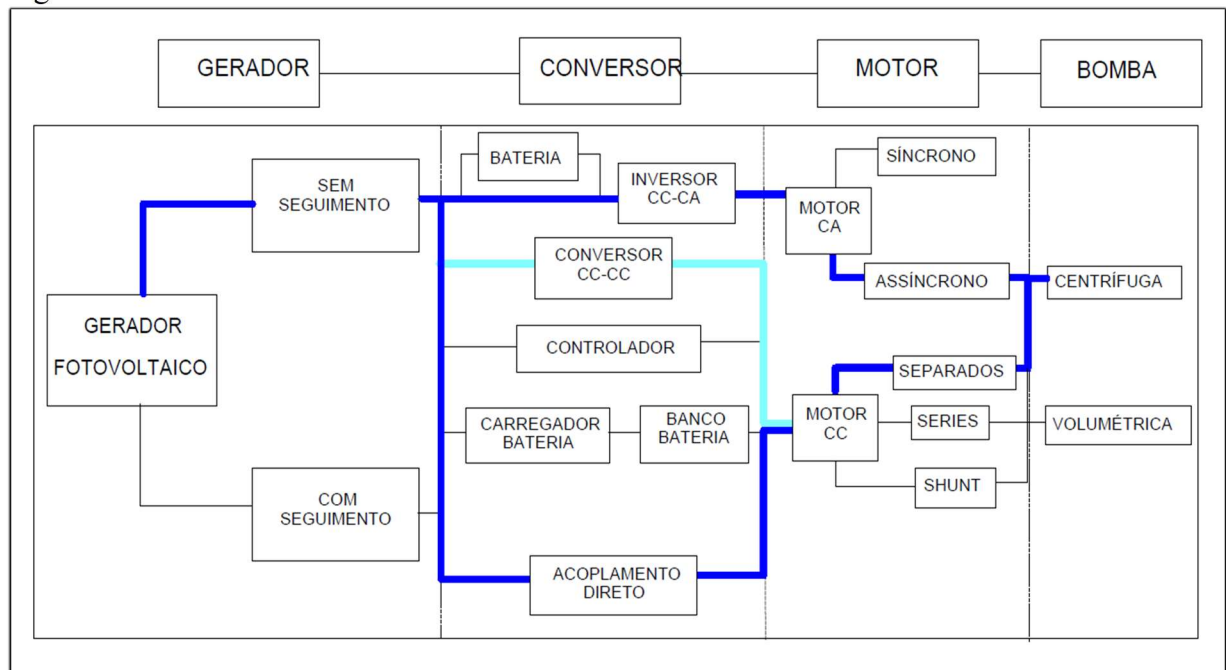
2.5 O ESTÁGIO TECNOLÓGICO DO BOMBEAMENTO FOTOVOLTAICO

Apesar da tecnologia fotovoltaica ainda ser de custo elevado, ela se aplica bem a sistemas remotos autônomos e é aí que se encontra campo para os sistemas de bombeamento de água para consumo humano e de animais ou de irrigação de plantações.

Todo o tempo a indústria de equipamentos vem buscando otimizar seus produtos, visando aumentar a eficiência dos conjuntos. Fedrizzi (1997) chama a atenção à tendência de substituição dos poços de cacimba com bombas submersas e motores em superfície, por poços tubulares de pequeno diâmetro com motores e bombas submersas, de fabricação especial buscando a maior performance pela adequação às características da energia fotovoltaica.

O esquemático mostrado na Figura 5 dá uma boa ideia das alternativas para um sistema de bombeamento de água fotovoltaico, ressaltando, em cores, as rotas mais usuais.

Figura 5 – Sistemas de bombeamento fotovoltaico



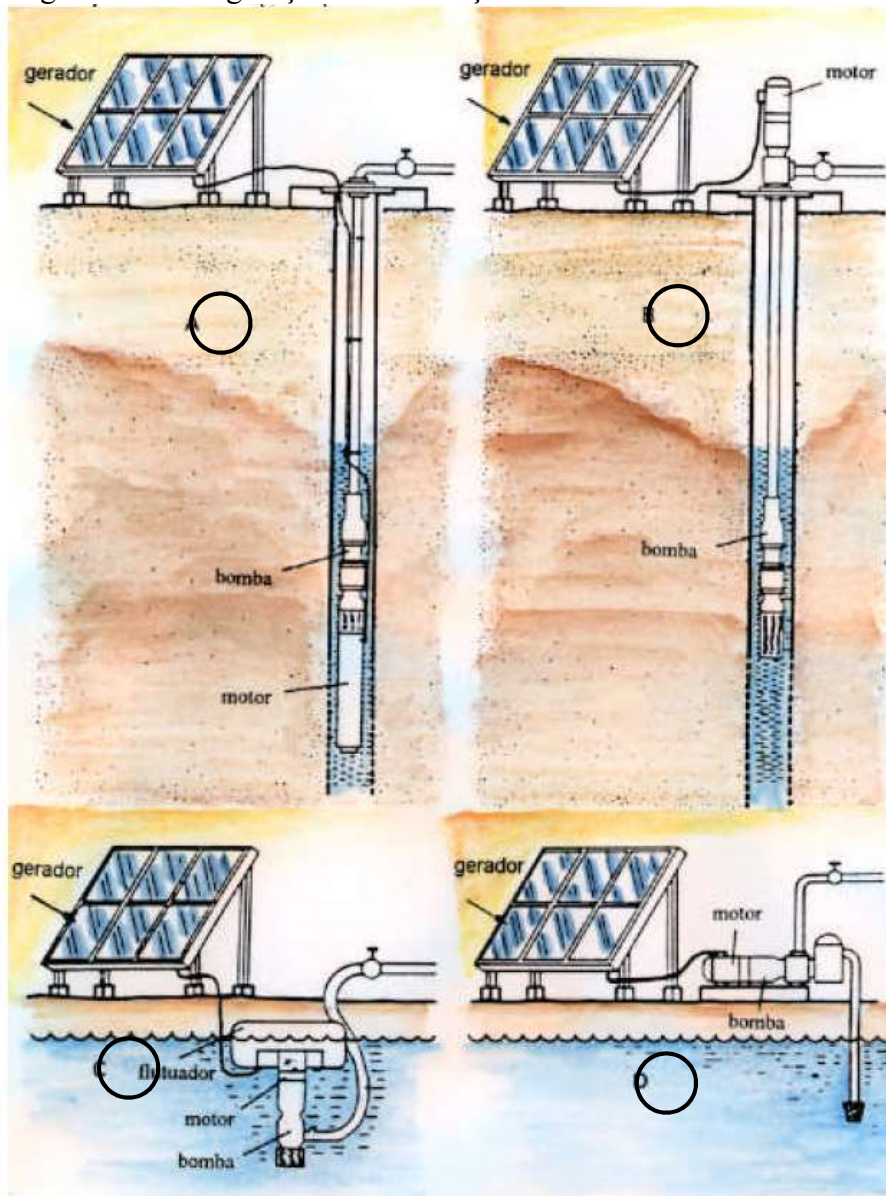
Fonte: Extraído de apostila do curso “Energia Solar” da FUPAI (2012).

De maneira sucinta, o sistema de bombeamento fotovoltaico consiste do painel fotovoltaico para geração de energia, dispositivos eletrônicos para controle e regulação do sistema, acumuladores, conjunto motobomba e os equipamentos auxiliares, que são fiações e tubulações.

Dentre as configurações possíveis, a Figura 6 mostra as mais usadas a seguir:

- O conjunto motobomba submerso (A);
- O motor na superfície e bomba submersa (B);
- O conjunto motobomba flutuante (C); e
- O conjunto motobomba na superfície (D).

Figura 6 – Configurações de instalação de um sistema de bombeamento



Fonte: Extraído de apostila do curso “Energia Solar” da FUPAI (2012).

2.5.1 Gerador fotovoltaico

Conforme Villalva (2015) o arranjo fotovoltaico é uma fonte variável de tensão, portanto a tensão de funcionamento dependerá da carga. No caso de bombeamentos isto se torna determinante na escolha do tipo de acionamento.

Apesar da característica de independência quanto ao suprimento de combustíveis, a energia radiante a ser transformada em energia elétrica depende de uma série de condições.

Com isto o comportamento de uma motobomba fotovoltaica será determinado não só pela irradiação total diária incidente, mas também, por sua distribuição ao longo do dia e pela temperatura ambiente. Isto causa limitações energéticas ao sistema, que podem ser contornadas com um rigoroso planejamento do uso da água. Além disto, a preservação dos mananciais de água deve ser tratada com intenso cuidado, visto que o desrespeito ao ritmo de reposição natural acarreta uma série de problemas tanto para o ambiente como para o funcionamento das instalações e equipamentos (ÁLVARO, 2005).

Sendo o gerador de energia fotovoltaica o item de maior custo dentro de um sistema de bombeamento solar, o cuidado no dimensionamento do sistema é de importância fundamental para não inviabilizar financeiramente o projeto, ver Figura 7.

Figura 7 – Dimensão do gerador em função da altura manométrica e da vazão

Altura Manométrica (m)	Número de Módulos Fotovoltaicos - 100W										
	Vazão diária média (m ³ /dia)										
	1	1,5	3	4	5	7,5	10	15	20	25	30
2	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
5	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	3
8	1	1	2	2	2	2	2	3	3	3	4
10	1	1	2	2	2	2	2	3	3	3	5
15	1	1	2	2	2	2	3	4	5	6	7
20	1	1	2	2	2	2	3	5	6	8	-
25	1	2	2	2	2	3	4	6	8	-	-
30	1	2	2	2	2	3	4	8	-	-	-
40	2	2	2	3	3	4	5	-	-	-	-
50	2	2	3	3	4	5	6	-	-	-	-
60	2	2	3	4	4	5	-	-	-	-	-
70	2	2	3	4	5	7	-	-	-	-	-
80	2	3	4	4	6	-	-	-	-	-	-
90	2	3	4	6	7	-	-	-	-	-	-
100	2	3	4	7	8	-	-	-	-	-	-
110	2	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
120	2	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: adaptada pelo autor do Catálogo Solenerg – Sistema de Bombeamento Solar (2016).

2.5.2 Bombas

Bombas hidráulicas são máquinas geratrizes cuja finalidade é realizar o deslocamento de um líquido por escoamento. Sendo uma máquina geratriz, ela transforma o trabalho mecânico que recebe para seu funcionamento em energia, que é comunicada ao líquido sob as formas de energia, de pressão e cinética. (FIALHO, 2003)

Tanto as bombas centrífugas como as bombas volumétricas podem ser usadas em sistemas de bombeamento fotovoltaicos. Segundo Fialho (2003), as bombas centrífugas são

adequadas para grandes vazões e pequenas alturas manométricas. São projetadas para alturas manométricas fixas e a vazão aumenta com a rotação da bomba. Por característica são equipamentos que se adequam muito bem à saída do arranjo fotovoltaico. Estas bombas podem ser submersíveis ou de superfície. Em geral, se tratando de bombas de superfície é recomendada uma altura de sucção máxima de 6 metros.

De acordo com Fialho (2003), as bombas centrífugas, possuem um dispositivo rotatório dotado de pás chamado rotor, o qual exerce força sobre o líquido a ser bombeado. Ao contrário do que acontece nas bombas volumétricas, essa força não possui a mesma direção e sentido do movimento do líquido em contato com as pás.

A força centrífuga resultante do movimento circular do rotor cria uma zona de maior pressão na periferia deste e, como consequência, ocorre uma zona de baixa pressão na sua parte central (na entrada), produzindo o deslocamento do líquido em direção à saída dos canais do rotor.

O tipo de mecanismo das bombas centrífugas requer potência de partida do motor próximo do funcionamento normal da bomba. Esta característica é de fundamental importância para sistemas de bombeamento fotovoltaicos, uma vez que não exige uma potência instalada muito acima do necessário para o funcionamento normal do sistema ou até mesmo a necessidade de acumulador específico para o arranque do sistema (FIALHO, 2003)

2.5.3 Motores

Tanto a bomba centrífuga como a volumétrica podem ser acionadas por motor de corrente contínua ou de corrente alternada. A escolha dependerá da vazão, da altura manométrica, da eficiência, do custo, da instalação, se submerso ou não, da confiabilidade, da facilidade de manutenção e da disponibilidade do equipamento no mercado. Fialho (2003).

Os motores em corrente contínua com escovas, são bastante adequados para o uso fotovoltaico em função da sua compatibilidade com a conversão de energia fotovoltaica, sendo também mais eficientes do que os motores em corrente alternada. No entanto, seu custo inicial é mais elevado e, conforme WEG (2016), necessitam de troca de escovas e manutenção periódica a cada 3000 horas. E por este motivo são utilizados em aplicações onde a fonte de água é rasa ou superficial.

No mercado já se encontram motores de corrente contínua sem escovas, que utilizam dispositivos eletrônicos para chaveamento do fluxo de corrente (WEG, 2016). Como vantagens,

estes motores trabalham com desgaste menor e, conseqüentemente, menor necessidade de manutenção, porém seu custo é ainda superior ao de escova.

2.6 ENERGIA ELÉTRICA NO MEIO RURAL

O serviço de eletrificação rural é basicamente caracterizado pela grande dispersão geográfica da população, baixo consumo, alto investimento pelo consumidor, elevado custo operacional, resultando num baixo retorno ou até mesmo em prejuízo financeiro à concessionária de energia elétrica (FREDRIZZI, 1997).

Cruz *et al.* (2004), afirmam que a inexistência de energia elétrica impossibilita o acesso da população a diversos serviços sociais básicos, tais como água, saneamento, educação e comunicação. Constatase ainda que na vida rural brasileira, há grande pressão do núcleo familiar para que se busque aquilo que “toda casa tem”, o que muitas vezes é o chuveiro elétrico, a geladeira, o rádio e a televisão, o que levam a família a decidir pela migração à núcleos urbanos, buscando o que julgam ser a cidadania e a contemporaneidade.

No caso específico da eletrificação e do abastecimento de água para a zona rural, há que se considerar que suas disponibilidades para o bombeamento de água para o consumo humano, de animais domésticos e para a irrigação, permitindo o suprimento de água potável às populações, a manutenção de rebanhos, aumento da produtividade agrícola, bem como a regularidade sazonal da produção, além de possibilitar a drenagem de áreas alagadas (MOREIRA, 2009).

Partindo dessa perspectiva, percebe-se, que há uma íntima relação entre os indicadores de eletrificação e o grau de modernização do espaço rural, impactando positivamente na qualidade de vida da população rural.

A utilização da energia elétrica no abastecimento de água, a elevação de consumo per capita de energia elétrica, o crescimento na aquisição de equipamentos eletrodomésticos indicam maior poder aquisitivo e melhores condições de vida da população rural. (SCHIMITZ; LOPES, 2009).

É importante considerar que a água pode funcionar como uma grande força de fixação do homem no campo. Dispor de água potável para uso doméstico, de seus animais e de sua plantação é um forte reforço de cidadania. Conforme Moreira (2009), o consumo aproximado de água em uma pequena propriedade rural pode ser dimensionado com os dados da Tabela 1.

Tabela 1 – Consumo aproximado de água em uma pequena propriedade rural

Especificação	Litros por dia
Sede da propriedade – por pessoa	70 a 100
Aves – por cabeça	0,2 a 0,3
Suínos + higiene – por cabeça	12 a 15
Bovinos – por cabeça	30 a 35
Equinos – por cabeça	35 a 50
Horta e jardim – por m ²	3 a 5

Fonte: Moreira (2009).

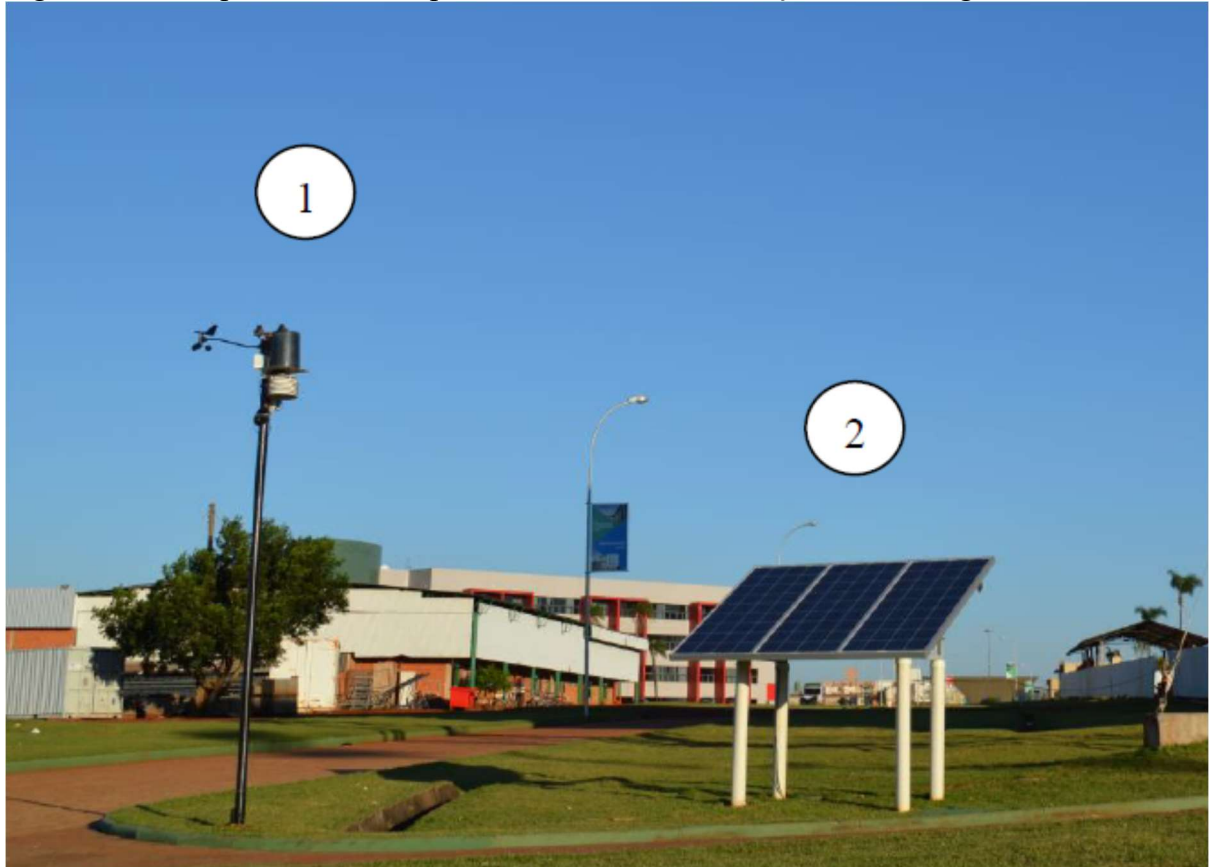
De posse desses dados, é possível realizar o levantamento de consumo de água para uma propriedade rural média, podendo ser dimensionado o sistema de bombeamento a atender essas necessidades.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL

O trabalho foi desenvolvido no Bloco das Engenharias do Centro Universitário Fundação Assis Gurgacz, Figura 8, localizada no município de Cascavel, Paraná, com localização geográfica definida pelas coordenadas $24^{\circ} 57'$ Latitude Sul (S) e $53^{\circ} 27'$ Longitude Oeste (W) e altitude média de 781 metros acima do nível do mar. São identificados a (1) estação meteorológica e (2) os painéis fotovoltaicos

Figura 8 – Vista panorâmica dos painéis fotovoltaicos e estação meteorológica

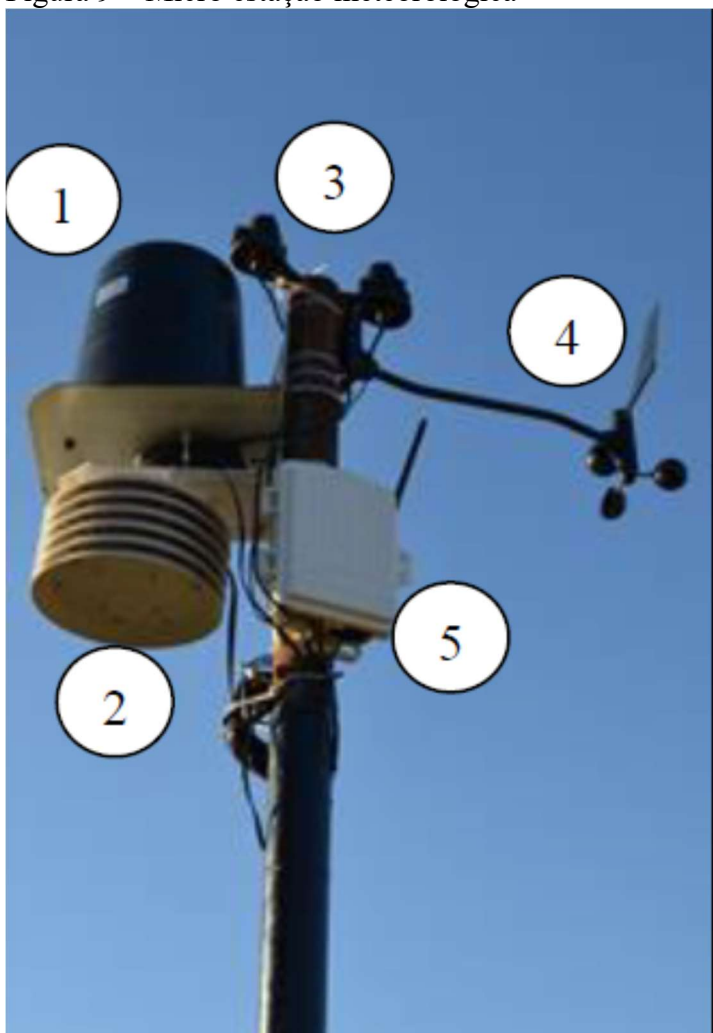


Fonte: Adaptada de Debastiani (2013).

3.2 EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÕES METEOROLÓGICAS

Para a medição das variáveis meteorológicas e de aquisição de dados do experimento foi utilizada a estação micro meteorológica da marca Davis Instruments, composta pelo Conjunto de Sensores Integrados (ISS) modelo Vantage PRO2 6162 (Figura 9), instalada em uma torre confeccionada em alumínio tubular, com altura total de 3 metros.

Figura 9 – Micro estação meteorológica

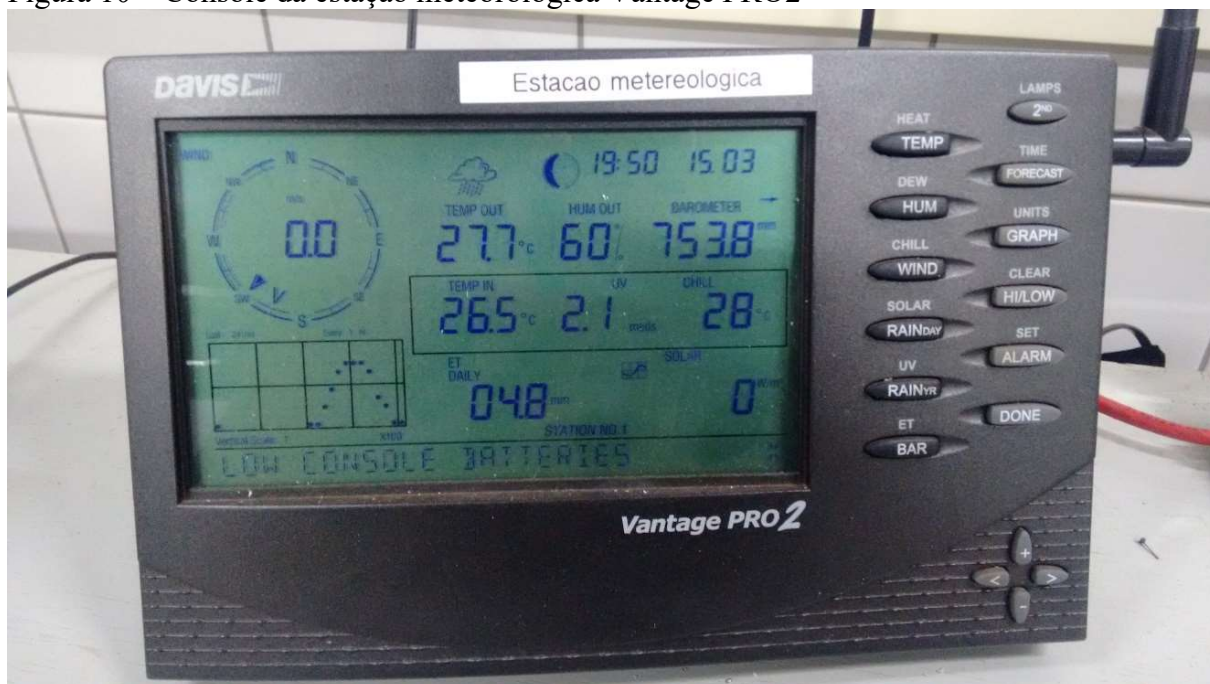


Fonte: Adaptada de Debastiani (2013).

O equipamento contém: (1) sensor de chuva – pluviômetro (modelo 7852: Rain Collector, 0,2 mm); (2) sensor de temperatura, sensor de umidade e sensor de pressão atmosférica (modelo 7859); (3) sensor de radiação solar e de radiação UV – piranômetro (modelo 6450); e (4) anemômetro (modelo K7911), nos quais coletam os dados meteorológicos e os enviam para o console da Vantage Pro2 via ondas de rádio de baixa intensidade. O

“wireless” ISS (5), é alimentado por bateria de lítio de 3V e envia os dados ao Console Vantage Pro2 localizado no interior do Laboratório de Fontes De Energias Renováveis. O Console Vantage Pro2 encontra-se representado na Figura 10. Os dados registrados no console são transferidos para o computador através de um cabo USB e analisados com a ajuda de um software.

Figura 10 – Console da estação meteorológica Vantage PRO2



Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

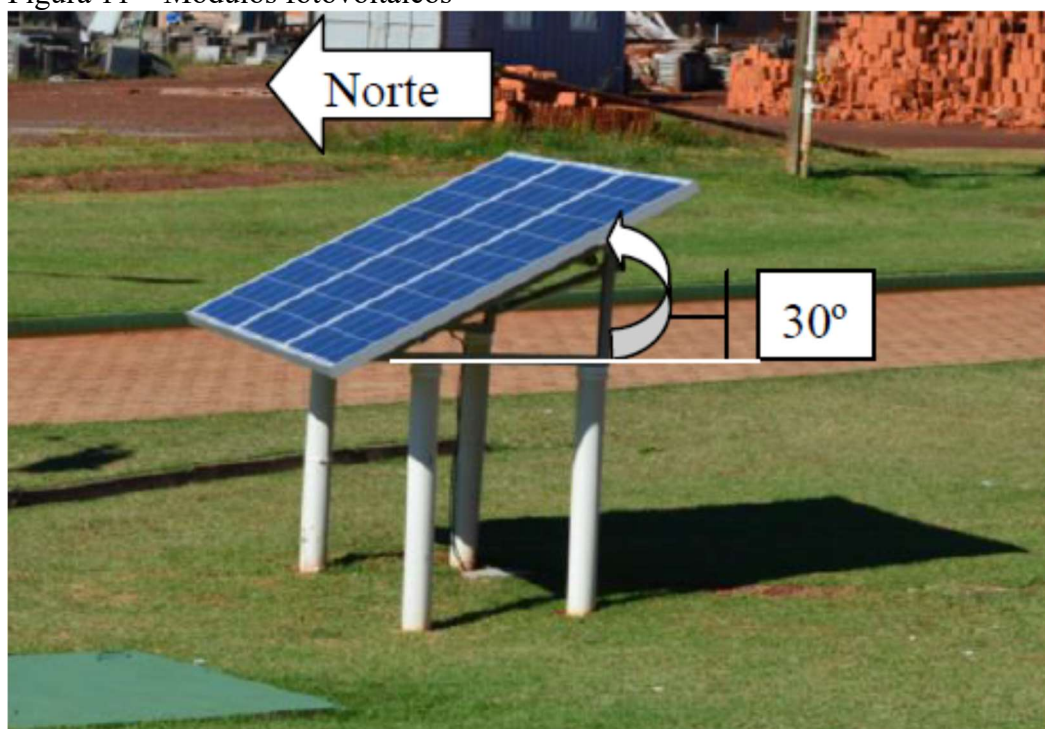
3.3 EQUIPAMENTOS INSTALADOS NO SISTEMA FOTOVOLTAICO

3.3.1 Módulos fotovoltaicos

O sistema fotovoltaico foi concebido com a instalação de três módulos fotovoltaicos da marca BYD, modelo 146 P6-18, com potência nominal de 140 Wp cada e tensão individual de 18 Vcc, perfazendo um total de 420 Wp instalados, para a geração de energia elétrica a partir da energia solar incidente no local. Os módulos foram conectados em série para elevação da tensão de saída em 54 Vcc.

Na Figura 11, encontram-se os módulos fotovoltaicos instalados em um suporte, voltado para o norte geográfico e inclinado em um ângulo de 30° nesta direção, correspondente à latitude do local ($24^\circ 57'$) adicionada de 5° . As especificações físicas, elétricas e construtivas dos módulos fotovoltaicos são apresentadas na Tabela 2.

Figura 11 – Módulos fotovoltaicos



Fonte: Adaptada de Debastiani (2013).

Tabela 2 – Especificações técnicas dos módulos fotovoltaicos.

Marca/modelo: BYD/146 P6-18	
ESPECIFICAÇÕES	
FÍSICAS	
Dimensões	1482 x 676 x 50 mm
Peso	13 kg
Número de células	36
Área de células do módulo	1,0018 m ²
ELÉTRICAS (1000 W/m², 25°C célula, AM 1.5)	
Tensão nominal	18 Vcc
Potência máxima	140 Wp (Watt pico)
Corrente de curto-circuito	8,76 A
Tensão de circuito aberto	21,49 Vcc
Corrente de máxima potência	7,78 A
Tensão de máxima do sistema	1000 Vcc

Temperatura Nominal de Operação de Célula	45±2°C
Tolerância	± 3%
CONTRUTIVAS	
Células	Silício policristalino
Fabricante	BYD Company Limited
Cor	Azul
Eficiência do painel	13,97 %

Fonte: Extraída do manual do equipamento.

3.3.2 Baterias

Para manter o consumo de corrente elétrica, nos períodos em que não possui irradiância, necessária ao acionamento da motobomba e estabilizar a tensão de alimentação da mesma, foi instalado um banco de baterias, composto por quatro unidades. As baterias são do tipo automotivas de chumbo-ácido, da marca MAXXICARGO 100Ah, e foram associadas em série, para operar na tensão do sistema que é 48Vcc. A profundidade de descarga adotada foi de 70%.

3.3.3 Sistema de proteção

A proteção do banco de baterias para eventuais sobrecargas, produzidas pelos componentes do sistema fotovoltaico, por produção excessiva de corrente pelo painel fotovoltaico, será feito através de um controlador de carga de 40A, da marca Schneider, Figura 12, que controlará a carga e a descarga do banco de baterias, baseado na tensão máxima de 52,5Vcc e tensão mínima de 49,5Vcc, respectivamente.

Figura 12 – Controlador de carga



Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

3.4 SISTEMA DE BOMBEAMENTO D'ÁGUA

3.4.1 Motobomba

Para o bombeamento de água optou-se pela utilização de uma motobomba de superfície de diafragma, de acionamento por corrente contínua e tensão de alimentação de 12 Vcc da marca SHURflo, modelo 8000, Figura 13.

Figura 13 – Motobomba SHURflo 8000



Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Esta bomba é ideal para aplicações residenciais ou rurais que não necessitem de alta pressão, a mesma possui vazão de até 4,8 l/min a 60 PSI ou 42mca e baixo consumo de energia. Especificações técnicas conforme Tabela 3.

Tabela 3 – Especificações técnicas da motobomba SHURflo 8000

Altura de Recalque Máxima	42,25 metros
Peso	2 Kg
Alimentação	12 Vcc
Conexão	1/2"
Diâmetro de Tubulação	1/2" a 1"
Dimensões	215 X 114 X 104 mm
Vazão	490 L.h ⁻¹ (sem recalque)
Consumo	3.0A até 7.3A

Fonte: Extraída do manual do equipamento.

3.4.2 Hidrômetro

Para a realização da medição do volume de água bombeada será utilizado um hidrômetro unijato magnético do fabricante LAO (Figura 14), que possui vazão nominal de $1,5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ e uma vazão mínima de $0,030 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$.

Figura 14 – Hidrômetro



Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

3.4.3 Reservatórios

Como reservatórios foram utilizadas duas caixas d'água de fibra, onde uma foi utilizada como reservatório inferior e a outra como reservatório superior para onde foi bombeada a água, todo o sistema de bombeamento é fechado, ou seja, a água ficará recirculando entre os dois reservatórios. O conjunto de reservatórios do experimento foi montado sobre uma estrutura metálica com 2,00 m de altura, onde estão dispostas as caixas d'água com 300 L cada.

Para o funcionamento do sistema de sucção e recalque, da caixa inferior para a entrada da motobomba, foram utilizados tubos e conexões de PVC com diâmetro de $\frac{3}{4}$ ", e para interligar a saída da motobomba até a caixa superior tubulação de $\frac{1}{2}$ ", estas diferenças de diâmetros das tubulações tem por finalidade evitar a cavitação na entrada da motobomba.

Para o processo de esvaziamento da caixa superior, também foram utilizados tubos e conexões com $\frac{3}{4}$ " de diâmetro para a interligação à caixa inferior.

Toda a água que foi bombeada para a caixa superior desce por gravidade pela tubulação, passando pelo hidrômetro registrando assim a quantidade de água bombeada e deste para a caixa inferior, de onde será bombeada novamente, gerando assim um ciclo contínuo.

3.4.4 Manômetro

Como a altura do Laboratório de Fontes de Energias Renováveis possui uma altura baixa, cerca de 3 m de altura, foi utilizado um registro do tipo esfera, afim de simular uma maior altura manométrica, de até 30 metros de coluna de água.

Para verificar a altura simulada, utilizou-se um manômetro na escala de -1 Kg.cm^{-2} até 3 Kg.cm^{-2} , ver Figura 15.

Figura 15 – Manômetro



Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

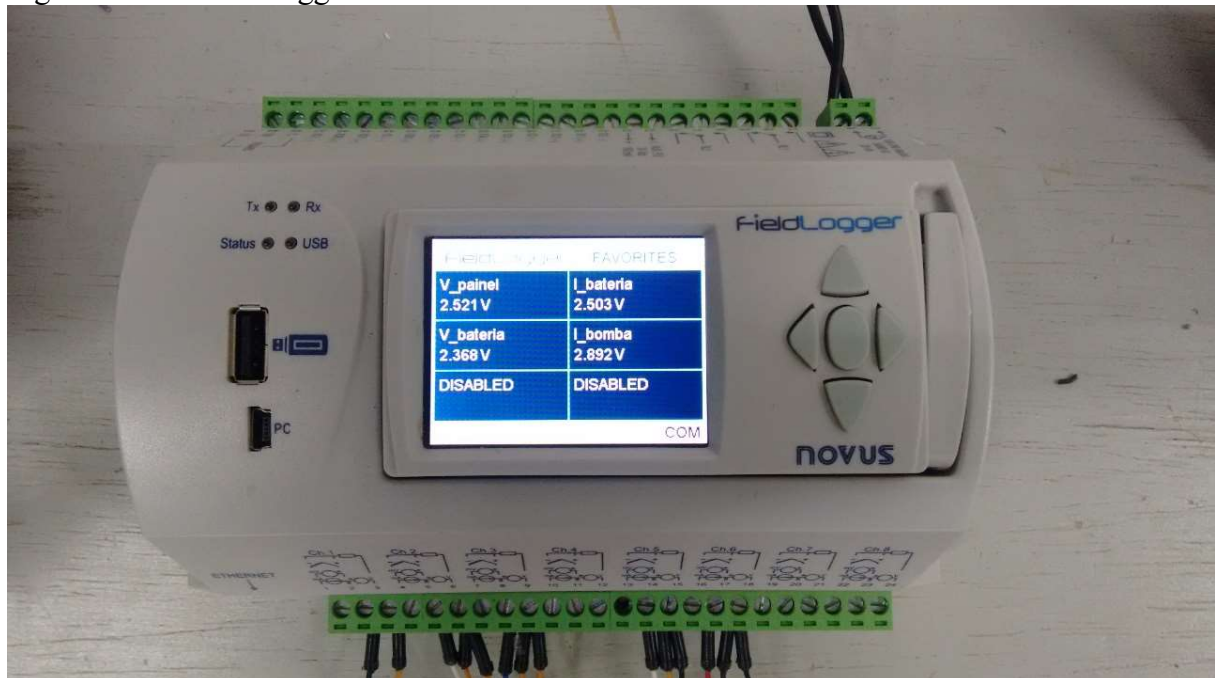
3.5 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS ELÉTRICOS

Para coletar e armazenar os dados elétricos no sistema fotovoltaico, foi utilizado um *data logger* FieldLogger da marca Novus, Figura 16.

O registrador de dado é um componente essencial nos sistemas de aquisição de dados remotamente. Podem interpretar uma grande variedade de sensores de medição, executar quaisquer cálculos programados, converter os dados para outras unidades de medida e armazenar os dados na memória. O *data logger* FieldLogger usado no experimento, também pode transmitir os dados para análise, compartilhamento e relatórios, bem como controlar dispositivos externos.

Foram configurados quatro canais analógicos como entrada, os quais foram programados para lerem tensões de 0 Vcc até 5 Vcc, provenientes do divisor de tensão e do sensor de corrente ASC 712 30A. As principais especificações técnicas do *data logger* FieldLogger encontram-se na Tabela 4.

Figura 16 – Fielder Logger Novus



Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Tabela 4 – Especificações técnicas do *data logger*

DATA LOGGER FIELDLOGGER ESPECIFICAÇÕES	
Entradas analógicas	8
Impedância de entrada dos canais analógicos	Termopares / Pt100 / Pt 1000 / mVcc: > 2 MΩ 15Ω + 1,5 Vcc Vcc: 1,1 MΩ
Entradas / Saídas digitais	8
Entradas digitais	Nível lógico “0”: de 0 a 0,8 Vcc Nível lógico “1”: de 2 a 30 Vcc Máxima tensão de entrada: 30 Vcc
Saídas digitais	Máxima tensão na saída: 30 Vcc; Máxima corrente na saída: 200 mA
Saídas a relé	2 (A max: 3 A @ 250 Vca; 3 A @ 30 Vcc)
Memória interna	2 MB
Proteção	IP20
Peso	400 g
Alimentação	100 a 240 Vca ±10 %, 50/60 Hz
Consumo máximo:	20 VA
Altitude de funcionamento	< 2000 m

Fonte: Extraída do manual do equipamento.

O *data logger* foi configurado para fazer medições nos canais analógicos, a cada um segundo e fazer uma média a cada um minuto destes dados.

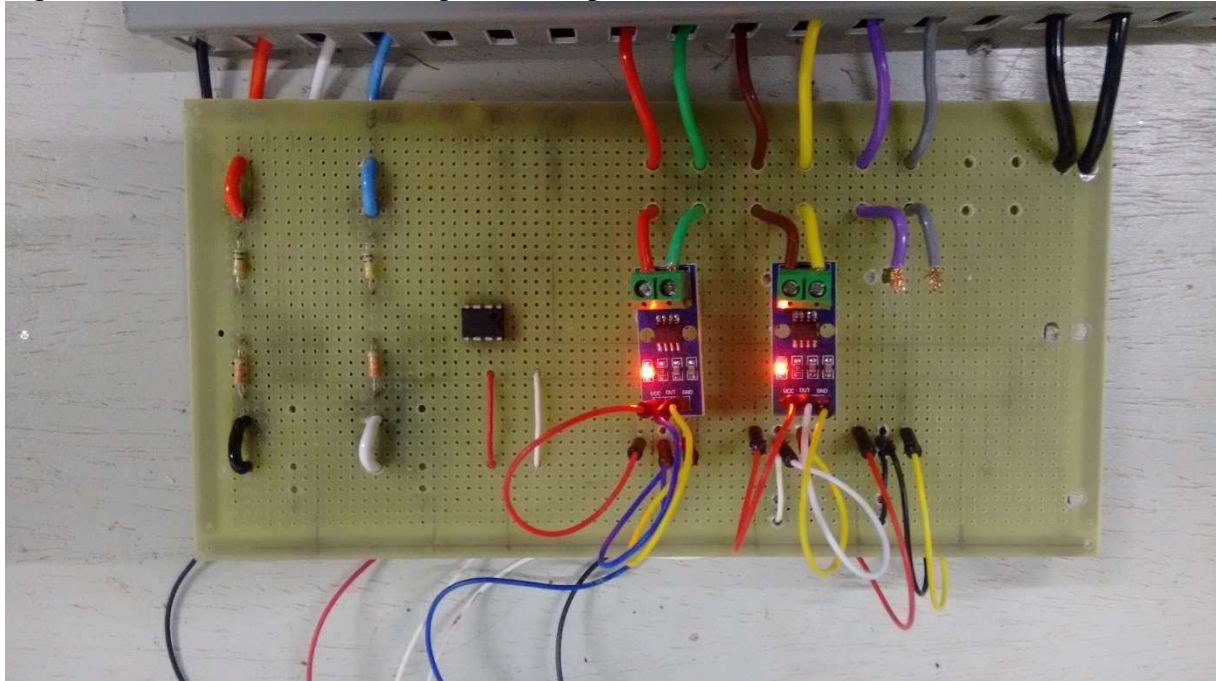
3.6 EQUIPAMENTOS PARA MEDIÇÃO DE DADOS ELÉTRICOS

Para a medição dos valores da tensão elétrica (Vcc) do sistema fotovoltaico e do banco de baterias, os quais podem atingir até 55,0 Vcc, foi necessário utilizar divisores de tensão, estes confeccionados através da associação em série de duas resistências elétricas de 560 kΩ (± 5%) e de 33 kΩ (± 5%), permitindo que os valores lidos sejam proporcionais às tensões das baterias e dos painéis fotovoltaicos, e assim possam ser registrados no *data logger*, com esta associação o valor que o registrador de dados leu foi de no máximo de 3,061 Vcc.

Este divisor de tensão foi isolado eletricamente do *data logger*, através de um amplificador operacional, TL082, na sua configuração de seguidor de tensão.

Já para a medição das correntes elétricas consumida pela motobomba e corrente elétrica fornecida pelo painel fotovoltaico, foram instalados dois dispositivos eletrônicos, ASC 712 30A, com o objetivo principal de converter os dados de corrente elétrica, de 0 A até 30 A, em valores proporcionais de tensão elétrica, dentro das faixas de entrada, suportadas pelo *data logger*, ou seja, de 0 Vcc até 5 Vcc, além de proporcionar um isolamento elétrico entre os canais, evitando possíveis interferências nos registros, Figura 17.

Figura 17 – Divisor de tensão, amplificador operacional e sensor de corrente



Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Para o correto funcionamento do isolador e fornecimento de alimentação elétrica ao mesmo, utilizou-se uma fonte de alimentação universal - IMPAC, modelo 3645A - que fornece tensão de corrente contínua regulável de 0 Vcc até 36 Vcc e uma corrente regulável de 0A até 3A. Para o experimento ela foi ajustada em 12 Vcc @ 0,25A.

Para realizar as calibrações necessárias realizadas no divisor de tensão, no amplificador operacional, TL082, no sensor de corrente ASC 712 30A, fez-se necessário a utilização de dois Multímetros Digitais MINIPA modelo ET-2082A.

3.7 COLETA DOS DADOS METEOROLÓGICOS E ELÉTRICOS

A coleta dos dados meteorológicos foi feita através das informações recebidas pelo Console Vantage Pro2 (receptor) da estação meteorológica localizado no interior do Laboratório de Fontes de Energias Renováveis, que foram transferidos para o computador através de um cabo USB.

O sistema de aquisição dos dados meteorológicos e elétricos foram configurados para efetuarem leituras a cada 1 segundo e fazer médias dos valores lidos a cada 1 minuto, porém, apenas a irradiância solar (em Wm^{-2}), será utilizada no presente estudo.

3.8 PARÂMETROS CALCULADOS

3.8.1 Potência

O cálculo da potência gerada pelos painéis fotovoltaicos e motobomba foi feito de acordo com a expressão:

$$P = V \times i \quad (1)$$

Em que:

P – potência (W);

V – tensão (V); e,

i – corrente (A).

3.8.2 Determinação da Altura Manométrica

A altura manométrica (H_m) de um sistema hidráulico é a soma de sua altura geométrica (H_g), com as perdas que ocorrem nas tubulações de sucção e recalque, transformadas em comprimentos equivalentes (H_p), conforme citou Moreira (2009). Portanto:

$$H_m = H_g + H_p \quad (2)$$

3.8.3 Vazão

A vazão é igual ao volume de água bombeado dividido pelo número de horas de funcionamento do sistema:

$$Q = \frac{v}{t} \quad (3)$$

Onde:

Q – vazão ($L.h^{-1}$);

v – volume de água (L);

t – tempo (h).

3.8.4 Energia disponível e energia consumida

As transformações da irradiação total em energia disponível e da potência em energia consumida foram feitas através das Equações 4 e 5, respectivamente.

$$Ed = Rt \times t \quad (4)$$

$$Ec = P \times t \quad (5)$$

$$Rt = Rs \times A \quad (6)$$

Em que:

Ed – energia disponível (Wh);

Ec – energia produzida (Wh);

Rt – irradiação total (W);

t – tempo (h);

P – potência (W);

Rs – irradiação solar global (Wm^{-2}), e

A – área útil do módulo (m^2).

3.8.5 Eficiências

A eficiência do painel fotovoltaico foi obtida por meio da Equação 7 (MOREIRA, 2009):

$$\eta P = \left(\frac{Ec}{Ed} \right) \times 100 \quad (7)$$

Em que:

ηP – eficiência do painel (%);

E_c – energia produzida (Wh); e

E_d – energia disponível, (Wh).

A eficiência da motobomba foi obtida pela Equação 8, adaptada de Debastiani (2013).

$$\eta B = \left(\frac{E_{mb}}{E_c} \right) \times 100 \quad (8)$$

Onde:

ηB = Eficiência da motobomba (%);

E_{mb} = Energia consumida pela motobomba (Wh); e

E_c = Energia produzida (Wh).

A eficiência global do sistema foi calculada através da Equação 9, adaptada de Debastiani (2013).

$$\eta G = \left(\frac{E_{mb}}{E_d} \right) \times 100 \quad (9)$$

Onde:

ηG = Eficiência global do sistema (%);

E_{mb} = Energia consumida pela motobomba (Wh); e

E_d – energia disponível (Wh);

3.9 ANÁLISE DOS DADOS COLETADOS

Os dados elétricos coletados ficam armazenados no próprio *data logger*, em um cartão de memória e, semanalmente, transferidos ao computador. Com os dados salvos, média a cada minuto, foram tabulados e processados utilizando do pacote Microsoft Office Professional Plus 2013, com o aplicativo Excel 2013.

Após a coleta foi feito o cálculo de potência dos valores pontuais de tensão e corrente, calculado a média horária dos dados meteorológicas, bem como o consumo da energia pela carga instalada e a quantidade de litros bombeados pela motobomba. Foram analisados os seguintes itens:

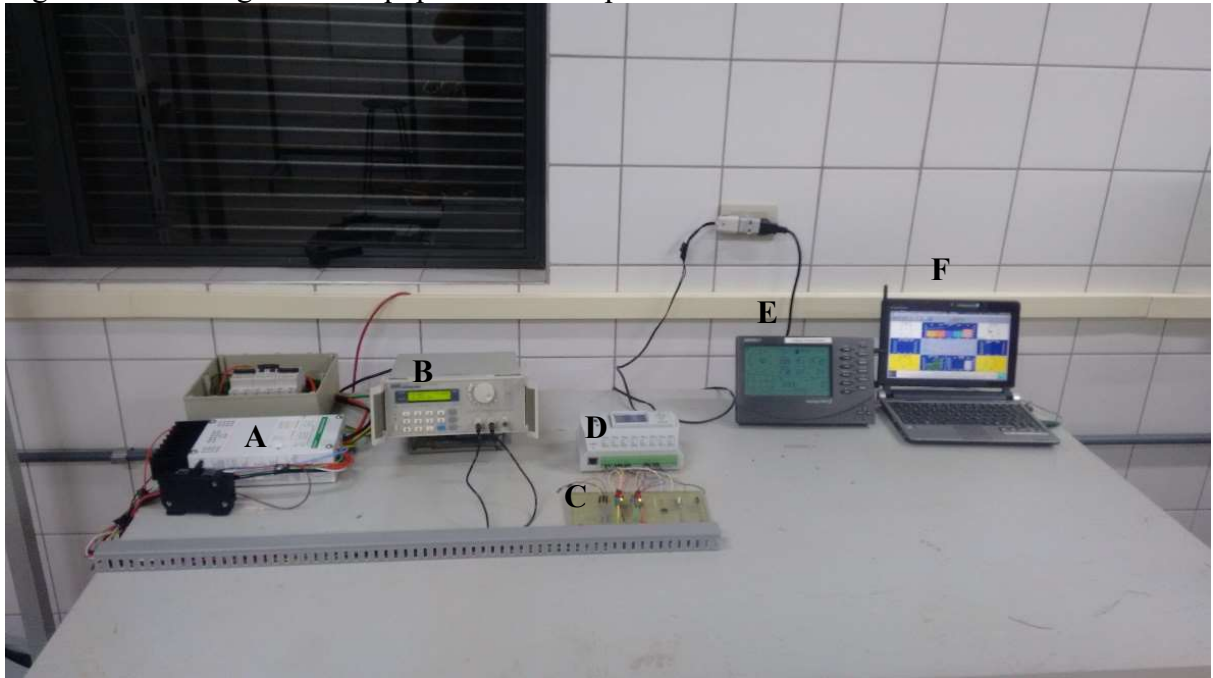
- a) Volume de água bombeado (L);
- b) Irradiância solar média horária (Wm^{-2}) x horas do dia;
- c) Ocorrência da irradiância solar média horária (Wm^{-2}) x percentual de ocorrência;
- d) Vazão (L.min^{-1}) em função da energia consumida (W.h);
- e) Energia elétrica diária produzida x energia diária consumida (kW por dia);
- f) Volume bombeado (L) em função da energia produzida (W.h);
- g) Rendimento do sistema de bombeamento (%); e
- h) Eficiência global do sistema de bombeamento fotovoltaica (%).

Todos os resultados foram apresentados em forma gráfica, avaliando-se assim a eficiência do sistema solar fotovoltaico (painéis fotovoltaicos), do sistema de bombeamento (motobomba) e o rendimento do sistema completo (painéis fotovoltaicos mais motobomba).

3.10 VISTA GERAL DO EXPERIMENTO

Na Figura 18 temos uma visão geral dos equipamentos eletrônicos instalados no Laboratório de Fontes de Energias Renováveis do Centro a utilizados no experimento. Da esquerda para a direita temos: (A) controlador de carga; (B) fonte de alimentação; (C) divisor de tensão e isoladores; (D) data logger; (E) console da estação meteorológica; e (F) computador utilizado para a coleta dos dados.

Figura 18 – Vista geral dos equipamento do experimento



Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Na Figura 19 temos a imagem dos sistema de bombeamento em circuito fechado de água, onde: (G) reservatório inferior; (H) reservatório superior; (I) motobomba; e (J) hidrômetro.

Figura 19 – Reservatórios, motobomba e hidrômetro



Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CONSIDERAÇÕES

Todos os dados analisados levaram em consideração apenas o período de funcionamento da motobomba e, conseqüentemente, o funcionamento do sistema de bombeamento de água. O período considerado foi do de 8 de fevereiro até 15 de março do corrente ano, totalizando vinte dias de coleta. O experimento esteve em funcionamento em diferentes horários do dia.

O banco de baterias formado por quatro baterias de chumbo-ácido de 12 Vcc cada, ligadas em série, fornecendo um total de 48Vcc, pois os painéis fotovoltaicos instalados no Centro Universitário FAG e o controlador de carga, funcionam nesta tensão. Porém a motobomba funciona em 12 Vcc e com isso ela era ligada somente em uma das baterias, para não haver a descarga profunda de somente uma das baterias, realizando-se um rodízio entre elas.

4.1.1 Altura manométrica

A altura manométrica, Figura 20, se manteve fixa para os dezesseis primeiros dias do experimento.

Considerando valores tabelados para os vários componentes da tubulação e utilizando a Equação 2, temos que:

$$H_g = 2,40 \text{ m}$$

$$H_p (\text{sucção}) = 0,45 \text{ m}$$

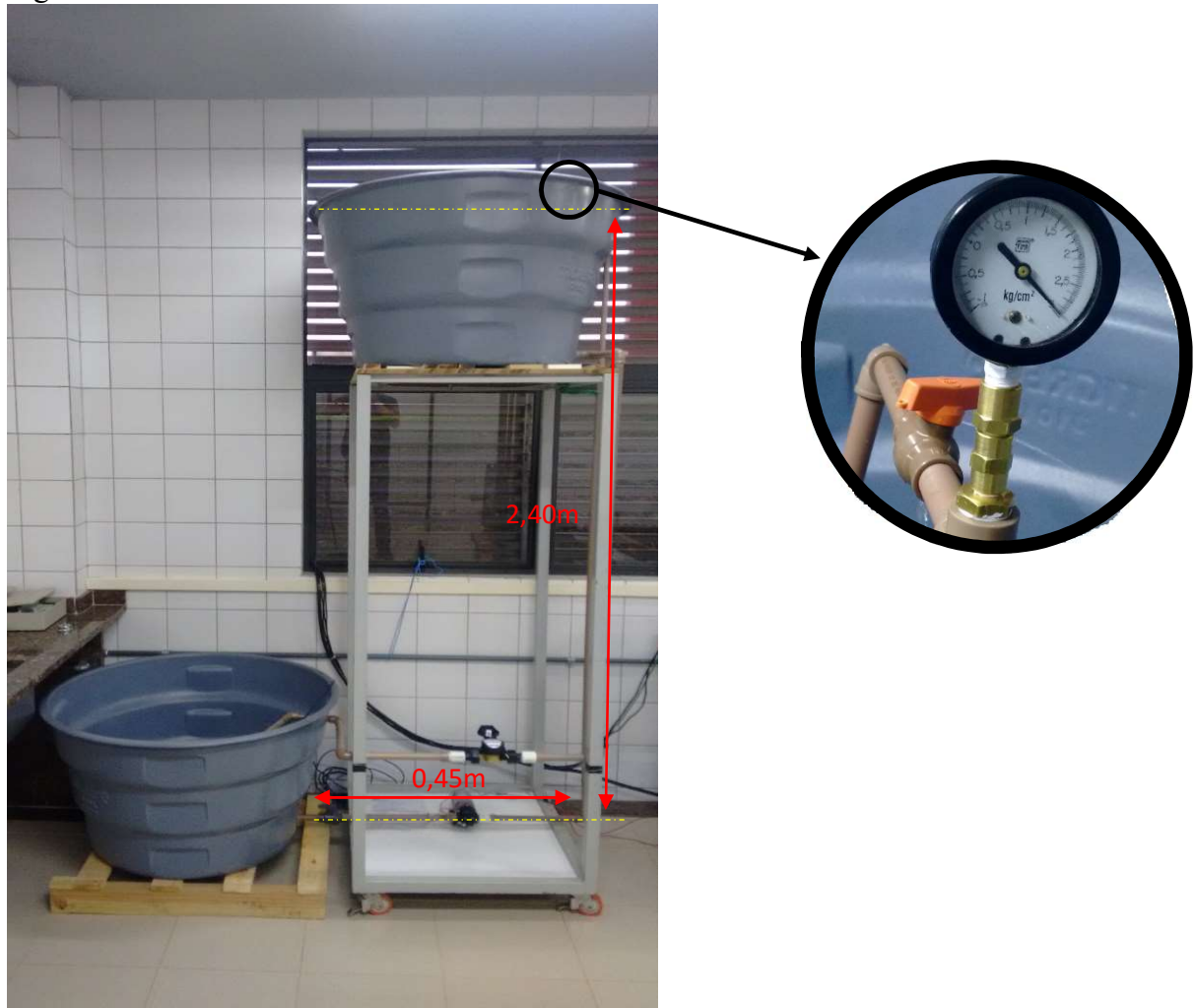
Portanto:

$$H_m = 2,85 \text{ m.}$$

Nos últimos quatro dias do experimento foi elevada a pressão do sistema, com o auxílio de um registro tipo esfera, para 3 Kg.cm^{-2} , ou seja, 30 mca, a fim de simular uma maior altura manométrica.

Esta variação na altura manométrica visou provocar, na motobomba uma maior potência requerida para seu funcionamento, afim de chegar mais próximos das condições reais de uso.

Figura 20 – Altura manométrica e detalhe do manômetro



Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

4.2 VOLUME BOMBEADO DE ÁGUA

Na Figura 21, é possível avaliar o volume de água bombeado por dia, durante o período de observação. Foi bombeado um volume total de 34.403 litros, com média diária de 1.720 litros.

Segundo Moreira (2009), como pode ser visto na Tabela 1, na página 23 deste trabalho, com um volume médio diário de 1720 litros de água é possível atender uma pequena propriedade rural típica, onde vivem em torno de 6 pessoas, 20 aves, 3 bovinos, 2 suínos, 2 equinos e com uma área cultivada de 175m².

Figura 21 – Quantidade de água bombeada no período de observação

Dia	Hora início	Hora término	Funcionamento (h)	Leitura anterior (m³)	Leitura atual (m³)	Litros bombeados	Litros por hora	Litros por minuto
8/2	10:20	13:31	3:11	0,000	1,235	1235,00	387,96	6,466
9/2	9:55	12:01	2:06	1,235	2,048	813,00	387,14	6,452
13/2	18:53	21:06	2:13	2,048	2,904	856,00	386,17	6,436
15/2	18:38	22:47	4:09	2,904	4,517	1613,00	388,67	6,478
16/2	18:45	22:55	4:10	4,517	6,140	1623,00	389,52	6,492
17/2	18:44	22:09	3:25	6,140	7,471	1331,00	389,56	6,493
20/2	18:49	20:35	1:46	7,471	8,164	693,00	392,26	6,538
22/2	17:15	22:11	4:56	8,164	10,095	1931,00	391,42	6,524
23/2	07:07	18:54	11:47	10,095	14,651	4556,00	386,65	6,444
24/2	07:16	18:20	11:04	14,651	18,906	4255,00	384,49	6,408
1/3	18:54	22:15	3:21	18,906	20,199	1293,00	385,97	6,433
2/3	07:16	18:32	11:16	20,199	24,538	4339,00	385,12	6,419
3/3	15:49	20:25	4:36	24,538	26,311	1773,00	385,43	6,424
6/3	17:05	22:20	5:15	26,311	28,340	2029,47	386,57	6,443
7/3	16:58	19:10	2:12	28,340	29,181	840,28	381,95	6,366
9/3	18:42	21:15	2:33	29,181	30,157	976,34	382,88	6,381
10/3	14:37	18:12	3:35	30,157	31,521	1364,18	380,70	6,345
13/3	18:48	20:20	1:32	31,521	32,115	593,68	387,18	6,453
14/3	18:49	20:45	1:56	32,115	32,868	752,74	389,35	6,489
15/3	14:12	18:10	3:58	32,868	34,403	1535,52	387,11	6,452
20 dias	04:27 h/dia		89:01		1.720,16 L/dia	34.403,20 L	386,48 L/h	6,45 L/min

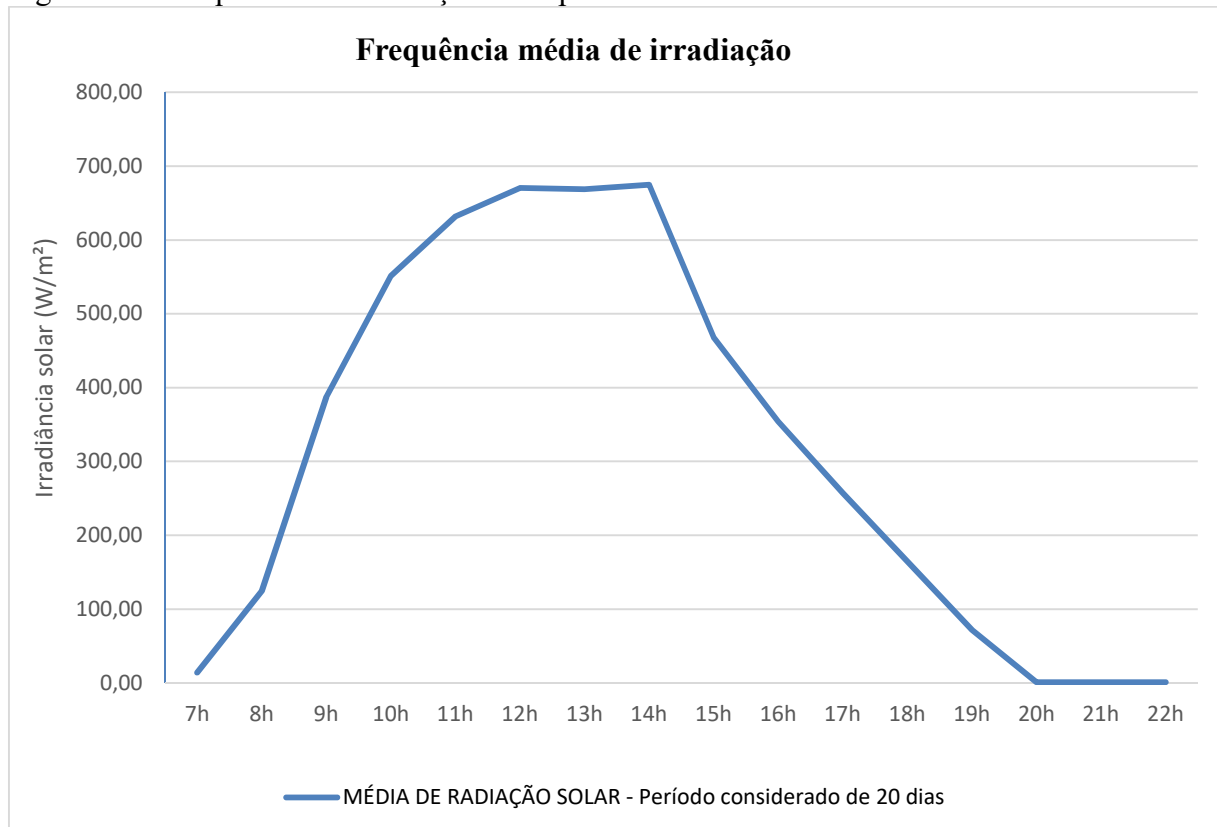
Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Cabe ressaltar ainda que a motobomba se manteve ligada ininterruptamente por aproximadamente 4,5 horas diárias, e teve uma vazão média de 6,54 L.min⁻¹.

4.3 IRRADIÂNCIA SOLAR

A Figura 22 apresenta a irradiância solar média horária, para o período considerado. Verifica-se que a maior média ocorre entre as 12:00 e as 14:00h.

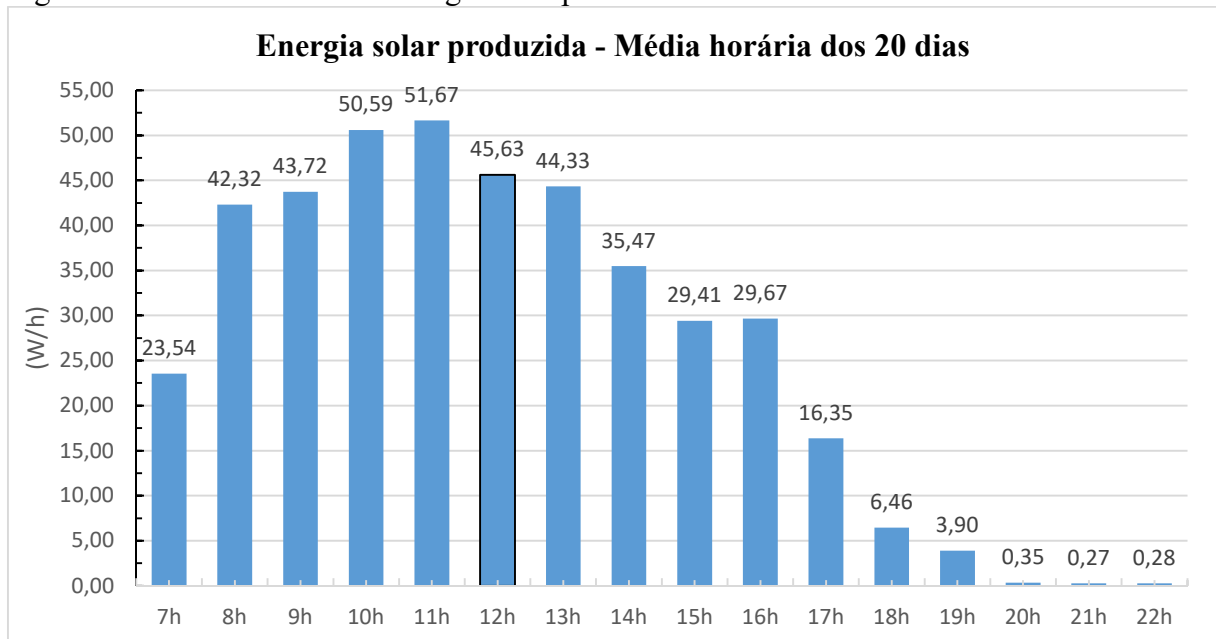
Figura 22 – Frequência da irradiação solar por hora.



Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Na Figura 23 temos uma representação da quantidade de energia produzida por hora, dentre uma média dos vinte dias coletados, observa-se que o pico de produção se dá entre onze de doze horas. Observa-se também que esta energia produzida é análoga à curva da frequência da irradiação solar, Figura 22.

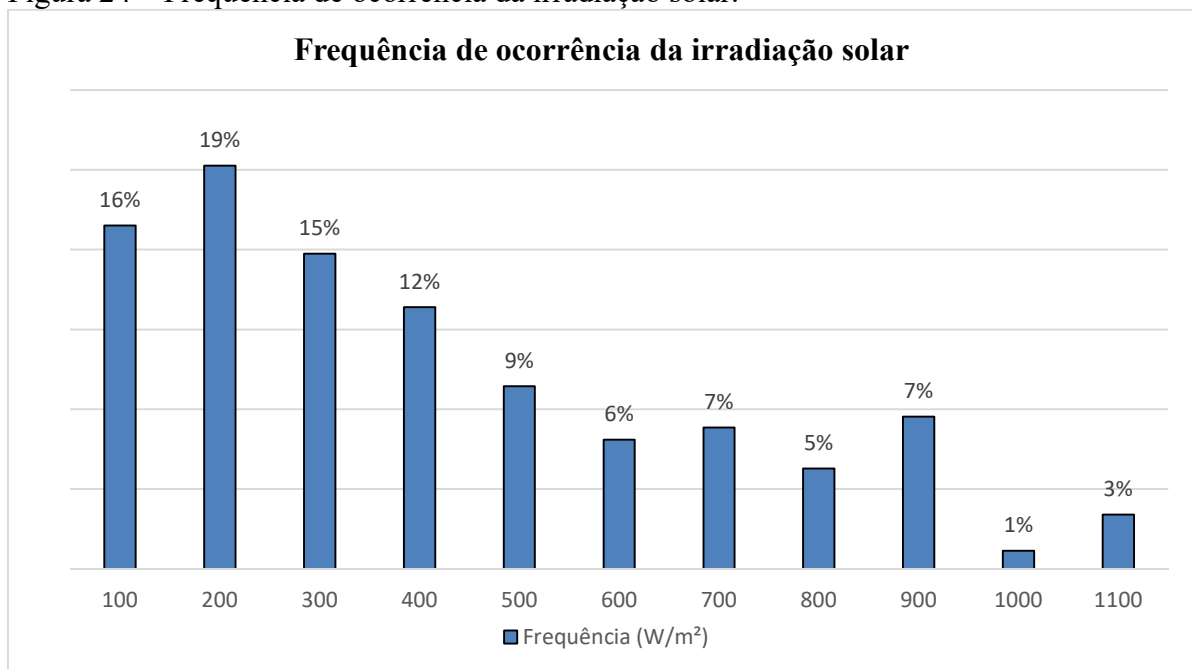
Figura 23 – Média horária da energia solar produzida.



Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Na Figura 24 são representados os valores da frequência de ocorrência da irradiância solar para o período observado. Verifica-se que o maior percentual de ocorrência possui média de 200 W.m^{-2} .

Figura 24 – Frequência de ocorrência da irradiação solar.

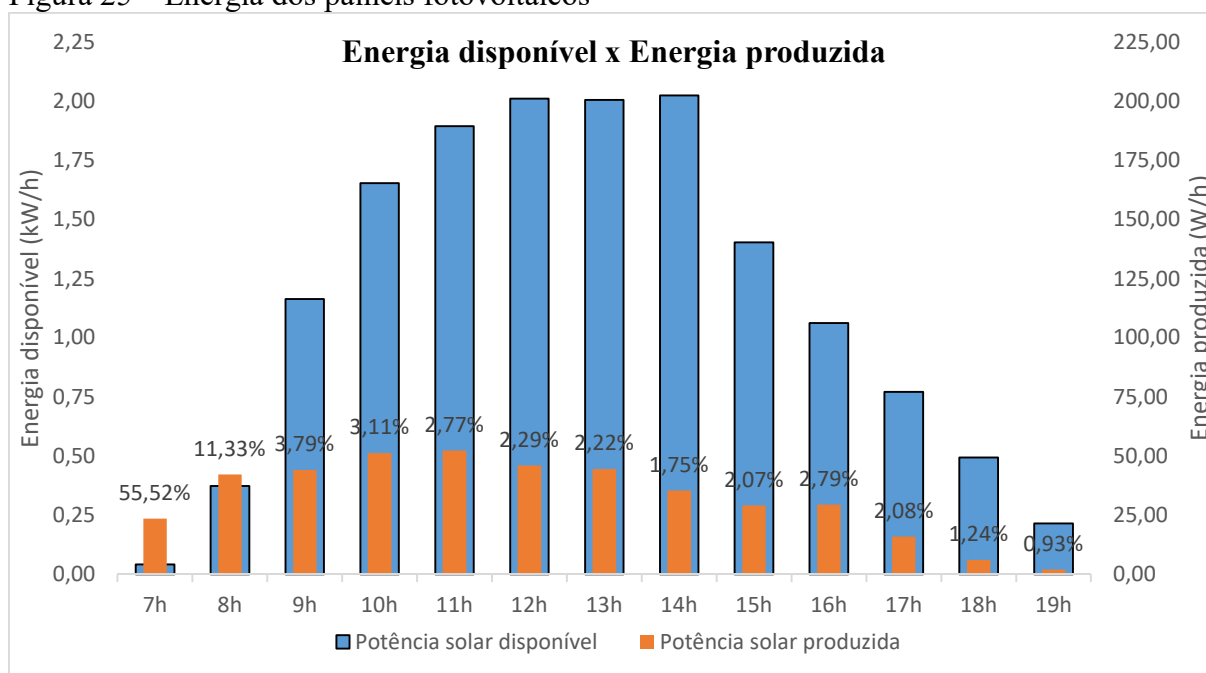


Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

4.4 DISPONIBILIDADE DE ENERGIA

Na Figura 25 estão representadas a média horária, dentre os vinte dias da coleta, da energia solar fotovoltaica diária disponível e a energia elétrica produzida pelos painéis. Verifica-se que a maior disponibilidade ocorre entre as doze e catorze horas, a maior produção ocorre entre as dez e onze horas e a menor disponibilidade e produção ocorrem no início da manhã e no final da tarde.

Figura 25 – Energia dos painéis fotovoltaicos



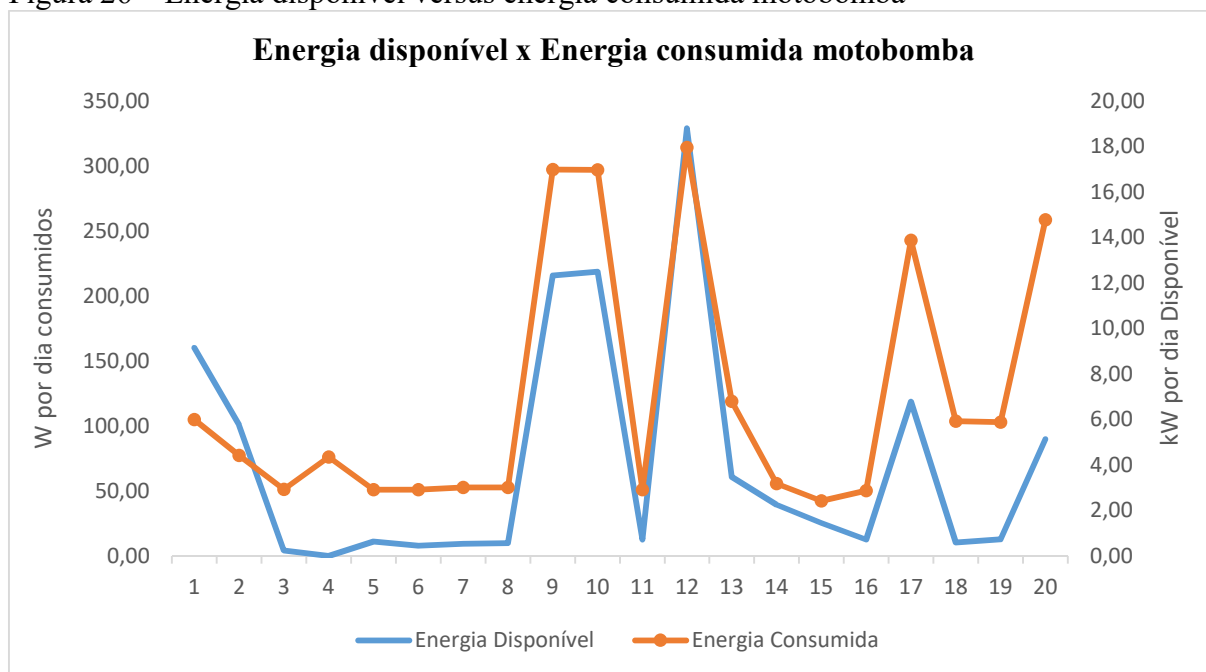
Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Pode-se observar ainda no rótulo de dados o percentual de energia produzida em relação à energia disponível.

4.5 ENERGIA DISPONÍVEL E ENERGIA CONSUMIDA PELA MOTOBOMBA

A Figura 26 apresenta os valores de energia disponível e energia consumida pela motobomba ao longo dos vinte dias de coleta.

Figura 26 – Energia disponível versus energia consumida motobomba



Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Como se pode observar no gráfico da Figura 26, no eixo vertical esquerdo temos a energia consumida pela motobomba (W) durante o dia do experimento, o maior consumo se deu entre os dias 23 e 26 de fevereiro, uma vez que a motobomba ficou ligada por doze horas ininterruptamente nestes dias.

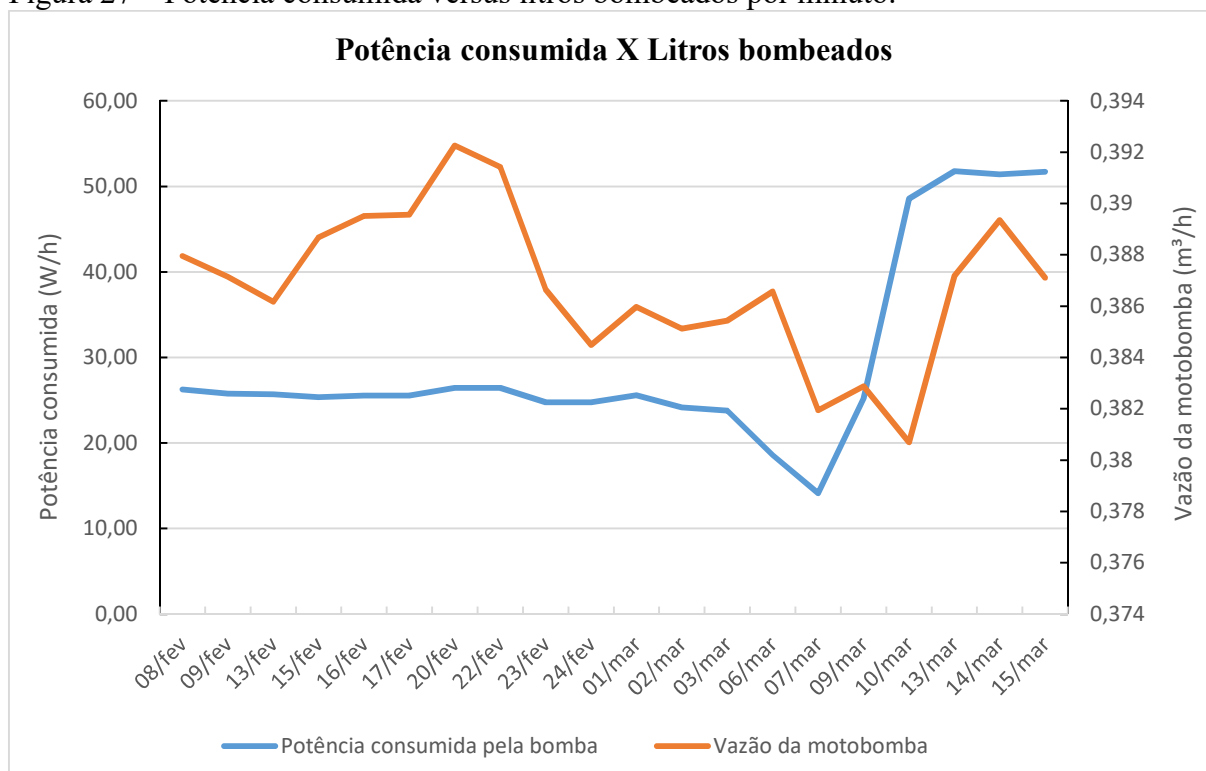
No eixo vertical do lado direito temos a quantidade de energia disponível durante o dia do experimento em kW, cabe ressaltar que no dia 15 de fevereiro a motobomba ficou ligada somente no banco de bateria, uma vez que se ligou das vinte horas até as vinte e duas horas.

Observa-se que de toda a energia disponível, apenas parte dela foi consumida pela motobomba. A energia consumida apresentou comportamento semelhante ao da energia disponível.

4.6 VOLUME BOMBEADO PELA ENERGIA CONSUMIDA

Na Figura 27 temos a relação da potência média diária consumida pela bomba e a quantidade de litros de água bombeado por hora.

Figura 27 – Potência consumida versus litros bombeados por minuto.



Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Nota-se que a potência da bomba (eixo vertical esquerdo) se manteve constante nos primeiros dezesseis dias da coleta, na casa de 25 Wh, alterando somente nos últimos quatro dias do experimento, em virtude da alteração da altura manométrica, exigindo mais do equipamento e com isso aumentando a potência consumida, com um consumo médio de 50 Wh, contudo a quantidade de água bombeada se manteve praticamente a mesma, com uma média de 6,45 L.min⁻¹ ou 0,387 m³.h⁻¹ (eixo vertical direito).

Na pior situação, a motobomba é capaz de bombear, com o consumo de 1 Wh, em média 7,74 litros de água a uma pressão de 3 Kg.cm⁻².

A figura ainda mostra que a potência requerida apresentou um comportamento semelhante à quantidade de litros bombeados por minuto.

4.7 EFICIÊNCIA DO SISTEMA

Considerando a energia efetivamente consumida pela bomba (E_c), Equação 5, e a energia solar disponível (E_d), Equação 4, fornecida pela irradiação solar sobre a área útil dos painéis, pode-se ainda obter a eficiência do painel fotovoltaico, Equação 7

De posse dos valores máximos de E_c e E_d foi calculada a eficiência em todos os dias, por média horária, sendo a eficiência real igual a média aritmética das eficiências calculadas ponto a ponto, que em 7,07%.

De acordo com Villalva e Gazoli (2012), nos painéis de silício policristalino a eficiência está na casa de 13% a 15%, e ainda, segundo o fabricante dos painéis instalados no Centro Universitário FAG, a eficiência destes é de 13,97%.

Percebe-se que no experimento esta eficiência se deu bem abaixo do preconizado, tanto pela literatura quanto pelo fabricante, mesmo assim o sistema se mostrou viável em questão da quantidade de litros bombeados para atender uma família rural média, o qual era um dos objetivos do presente trabalho.

A eficiência média da motobomba foi calculada através da Equação 8, onde se obteve um valor de 77,90% e a eficiência global do experimento foi de 3,91%.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo avaliar se um sistema de bombeamento de água fotovoltaico atende à demanda de uma família rural média de pequeno porte. As conclusões apresentadas na avaliação deste experimento estão condicionadas à forma de execução do experimento, sendo um reflexo dos resultados dele obtidos.

Com o experimento foi possível avaliar que o sistema é mais que suficiente para atender as necessidades básicas de uma pequena propriedade rural. Foi bombeado um volume total de 34.403 litros, com média diária de 1.720 litros que, segundo Moreira (2009), um volume médio diário de 1200 litros de água é possível atender uma pequena propriedade rural típica, onde vivem em torno de 6 pessoas, 30 aves, 5 bovinos, 10 suínos e com uma área cultivada de 100m².

Com o levantamento dos dados elétrico e meteorológicos foi possível ver que a energia disponível pelo sistema é superior às necessidades para manter a motobomba em funcionamento, independente do horário que esta entrar em funcionamento.

Outro objetivo que foi alcançado com o levantamento dos dados elétricos foi verificar a eficiência dos equipamentos envolvidos no sistema. O sistema fotovoltaico (painel fotovoltaico, controlador de carga e baterias) apresentou rendimento médio de 7,07% na conversão de energia solar fotovoltaica em energia elétrica. A eficiência da motobomba foi no valor de 77,90% e a eficiência global do experimento de 3,91%.

Concluiu-se ainda que o potencial de utilização da tecnologia de bombeamento com energia solar fotovoltaica não é mais a tecnologia do futuro, mas que já pode, no momento atual, ter um papel relevante no suprimento de água de comunidades rurais espalhadas por todo país.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

Esta trabalho não esgota a análise de viabilidade de sistemas de bombeamento com energia solar fotovoltaica, ao contrário, ressalta muitos aspectos que merecem ser desenvolvidos.

Um ponto interessante seria testar novas alternativas que melhorem o desempenho dos sistemas fotovoltaicos. Essas alternativas podem ser os geradores fotovoltaicos que empregam sistemas de seguidor solar em um ou dois eixos.

Realizar um estudo, para fins de comparação com o presente, para a instalação de um inversor de tensão para a sistema de bombeamento trabalhar acoplado em um motor de corrente alternada e avaliar a sua respectiva eficiência.

Avaliar sistemas que utilizam outro tipo de moto bomba, por exemplo, as centrífugas.

Realizar a instalação e acompanhamento de um sistema de bombeamento fotovoltaico em campo, consolidando a utilização destes equipamentos.

REFERÊNCIAS

ABL. Academia Brasileira de letras. **Reduções:** Reduções mais correntes. 2017. Disponível em: <<http://www.academia.org.br/nossa-lingua/reducoes>>. Acesso em: 21 maio 2017.

ANEEL. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. Agência Nacional de Energia Elétrica. Brasília. ANEEL, 2005. 199p. Disponível em: <<http://zip.net/bktJY5>>. Acesso em: 10 out. 2016.

_____. **Informações técnicas:** Geração distribuída. Agência Nacional de Energia Elétrica. Brasília. ANEEL 2017. Disponível em: <<http://zip.net/bgtKgS>>. Acesso em: 03 abr. 2017.

BEN – **Balanco energético nacional**. Brasília: MME – Ministério de Minas e Energia, 2016. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/S%C3%ADntese%20do%20Relat%C3%B3rio%20Final_2016_Web.pdf>. Acesso em: 20 set. 2016.

CRUZ, C. N. P.; MOURAD, A. L.; MORÍNIGO, M. A.; SANGA, G. **Eletrificação rural: benefícios em diferentes esferas**. In: AGRENER 2004 – ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 5, 2004, Campinas. Anais.Campinas: NIPE/UNICAMP, 2004. 9p.

DEBASTIANI, G. **Avaliação da eficiência energética de um sistema híbrido eólico-fotovoltaico para cascavel-paraná - 2013**. 78 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Energia na Agricultura, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2013.

FEDRIZZI, M. C. **Fornecimento de água com sistemas de bombeamento fotovoltaicos: dimensionamento simplificado e análise de competitividade para sistemas de pequeno porte** Dissertação. 1997. 162 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Energia, Programa Inter unidades de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo (instituto de Eletrotécnica e Energia – Escola Politécnica – Instituto de Física – Faculdade de Economia e Administração, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

FIALHO, A. B. **Automação hidráulica:** projetos, dimensionamento e análise de circuitos. 2. ed. São Paulo: Érica, 2003. 290 p. Atualizada e ampliada.

GOMES, N. M. P. **Integração de dados LIDAR com imagens de muito alta resolução espacial para determinação de áreas urbanas com potencial solar**. 2011, 156p. Dissertação de Mestrado em Gestão do Território, Universidade Nova de Lisboa, Portugal, 2011. Disponível em: <http://run.unl.pt/bitstream/10362/7179/1/TeseMestrado_Nuno_Gomes_17856.pdf>. Acesso em 25 set. 2016.

HAUSCHILD, L. **Avaliação de estratégias de operação de Sistemas Híbridos Fotovoltaico-Eólico-Diesel**. 2006, 117p. Dissertação de Mestrado em Energia, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006. Disponível em: <http://lsf.iee.usp.br/lsf/pdf/mestrado/Mestrado_Luciano_Hauschild.pdf>. Acesso em 10 out. 2016.

JEWETT JR, J; SERWAY, R. **Física Para Cientistas e Engenheiros:** Eletricidade e Magnetismo Vol 3. Cengage Learning, 2012. 408 p. Tradução da 8ª edição norte americana.

KELMAN, R. **Inserção da energia solar no Brasil**. Relatório Final, maio/2012. São Paulo, 2012. Disponível em: <<http://zip.net/bxtKQb>>. Acesso: 10 out. 2016

LOPES JR, A. P. **A energia solar fotovoltaica utilizada em bombeamentos de água – aplicações e perspectivas.** 2005. 29 f. Monografia (Especialização) - Curso de Fontes Alternativas de Energia, Departamento de Engenharia, Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG. 2005.

MARINHO, M. J. N.; AQUINO, R. R. B. **Oferta de energia através da complementariedade sazonal hidro-eólica.** PCH Notícias & SHP NEWS, Itajubá, v. JAN/FEV/MAR, n.40, p.36-42, 2009. Disponível em: < <http://zip.net/bktJY7>>. Acesso em 25 set. 2016.

MOREIRA, C. A. M. **Avaliação do desempenho hidroenergético de sistemas fotovoltaicos utilizados no bombeamento de água.** 2009. 129 p. [Dissertação Mestrado] Energia na Agricultura. Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho/ Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP”, Botucatu, 2009.

ONUBR (Brasil). Organizações Unidas no Brasil (Org.). **A ONU e a água.** 2016. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/acao/agua/>>. Acesso em: 07 set. 2016.

PARIZOTTO, R. R. **Instalação e avaliação de um sistema de bombeamento d’água com aerogerador de pequeno porte para propriedades rurais, na cidade de Cascavel-PR.** 2014. 69 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Energia na Agricultura, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2014.

PINHO, J T; GALDINO, M A. **Manual de Engenharia Para sistemas Fotovoltaicos.** 2014. Centro de Referência Para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito (Org.) Ministério de Minas e Energia. Disponível em: < <http://zip.net/bxtKP9> >. Acesso em: 07 set. 2016.

SAMPAIO, J. **Universo da Física 3:** ondulatória, eletromagnetismo, física moderna. 2. ed. São Paulo: Atual, 2005. 520 p. (Coleção Universo da Física).

SANTOS, I. P. **Desenvolvimento de ferramenta de apoio à decisão em projetos de integração solar fotovoltaica à arquitetura.** 2013. 278p. Tese de Doutorado em Engenharia Civil – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013. Disponível em: < http://fotovoltaica.ufsc.br/Teses/Tese_IsisPortolanDosSantos.pdf>. Acesso em 09 out. 2016.

SCHIMITZ, A. P.; LOPES, G. M. **Política pública de eletrificação rural no estado do paraná: uma análise custo efetividade 2004/2007.** In: Sociedade Brasileira De Economia, Administração E Sociologia Rural – SOBER, 47 . 2009, Porto Alegre. Congresso. Ponta Grossa: UFPR, 2009. v. 1, p. 1 – 21.

VILLALVA, M. G. **Energia Solar Fotovoltaica:** conceitos e aplicações. 2. ed. São Paulo: Érica, 2015. 224 p. Revisada e atual.

VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R. **Energia Fotovoltaica:** Conceitos e Aplicações, 1 ed.; São Paulo: Érica, 2012.

WEG (Jaraguá do Sul – SC). Grupo Weg – Unidade Energia. **Motores de corrente contínua.** 2016. Disponível em: <<http://zip.net/brnGnw>>. Acesso em: 13 out. 2016