



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AGROALIMENTAR
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AMBIENTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**SISTEMA DE BOMBEAMENTO FOTOVOLTAICO EM PROPRIEDADE
RURAL – UM ESTUDO DE CASO**

LUCIANO FREITAS DO REGO JUNIOR

**POMBAL – PB
2023**

LUCIANO FREITAS DO REGO JUNIOR

SISTEMA DE BOMBEAMENTO FOTOVOLTAICO EM PROPRIEDADE
RURAL – UM ESTUDO DE CASO.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Unidade Acadêmica de Ciências e Tecnologia Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador(a): Prof^ª. Dr^ª. Rosinete Batista dos Santos Ribeiro

POMBAL – PB

2023

R343s Rego Junior, Luciano Freitas do.

Sistema de bombeamento fotovoltaico em propriedade rural – um estudo de caso / Luciano Freitas do Rego Junior. – Pombal, 2023.

63 f. il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar, 2023.

“Orientação: Prof. Dr. Rosinete Batista dos Santos Ribeiro”.
Referências.

1. Energia solar. 2. Emissão de CO₂. 3. Irrigação. I. Ribeiro, Rosinete Batista dos Santos. II. Título.

CDU 620.92

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AGROALIMENTAR
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AMBIENTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO.

LUCIANO FREITAS DO REGO JUNIOR

TÍTULO DO TRABALHO

Trabalho de Conclusão de Curso do discente (LUCIANO FREITAS DO REGO JUNIOR) **APROVADO** em 02 de fevereiro de 2023 pela comissão examinadora composta pelos membros abaixo relacionados como requisito para obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL pela Universidade Federal de Campina Grande.

Registre-se e publique-se.

Rosinete Batista dos Santos Ribeiro

Prof^a. Dr^a. ROSINETE BATISTA DOS SANTOS RIBEIRO
Orientadora – UFCG/CCTA

Prof^a. Dr^a. ÉRICA CRISTINE MEDEIROS MACHADO
Membro Interno – UFCG/CCTA

MSc LÍLIAN DE QUEIROZ FIRMINO
Membro Externo – UFCG/CTRN

LUCIANO FREITAS DO REGO JUNIOR
Aluno – UFCG/CCTA

Dedico este trabalho a todos que amo, em especial aos meus pais: Severina Linhares e Luciano Freitas (in memoriam).

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por cada dia de vida que ele tem me proporcionado, cada novo aprendizado e conquista, por seu cuidado e preparo ao conduzir e guiar os meus passos no caminho do conhecimento e ser presença constante em minha vida.

Aos meus pais, dona Severina Linhares, que sempre trabalhou duro e fez de tudo para que eu me tornasse o ser humano que sou hoje, e Luciano Freitas, que não pode ver minha conquista em vida, mas trabalhou arduamente para que um dia fosse possível. Por todo o incentivo e esforço que me levaram ao caminho do saber, minha eterna gratidão aos dois. Aos meus avós, Seu Severino (in memoriam) e dona Joana, a quem sempre tive como meus pais.

À minha orientadora Dra. Rosinete Batista dos Santos Ribeiro, por seus conhecimentos repassados e por sua fundamental presença e colaboração na realização desta etapa da minha formação acadêmica.

Aos meus amigos com quem pude ter momentos incríveis, conhecê-los e formar eternos laços durante esta caminhada: João Carlos, Diego Maycol, Mikael Lucas, Gabriel Paz, Aercio Silva, Alberto Oliveira, Matheus Alencar, Matheus Grenedith e os outros inúmeros que não serão mencionados. Os anos que passamos juntos e todas as memórias ficarão guardadas para sempre comigo, obrigado por terem feito parte da minha vida.

Por fim, a todas as pessoas que torceram por mim, me deram palavras de incentivo e acreditaram no meu potencial, especialmente à minha amada namorada, Airla Farias, por todo carinho e amor, e por estar ao meu lado nos momentos mais difíceis. A todos aqueles que contribuíram com essa fase da minha vida, meus sinceros agradecimentos, eu não teria conseguido sozinho!

“Lembre-se que as pessoas podem tirar tudo de você, menos o seu conhecimento.”

(Albert Einstein)

RESUMO

O bombeamento de água para irrigação e dessedentação animal é bastante comum em propriedades rurais, prática que acarreta custos elevados com energia elétrica. Sendo assim, é importante a inserção de meios tecnológicos que reduzam esses gastos e a energia solar/fotovoltaica pode ser apontada como uma alternativa viável, pois além do baixo custo, proporciona benefícios ambientais. Este estudo teve como objetivo dimensionar um sistema de bombeamento usando energia fotovoltaica, para irrigação de culturas forrageiras e dessedentação animal no sertão da Paraíba. Para isso, realizou-se a caracterização da área de estudo, visando obter a demanda hídrica de projeto e os dados de radiação no local de implantação. Para o dimensionamento do sistema, composto por treze painéis fotovoltaicos, um inversor e onze baterias, seguiu-se as seguintes etapas: verificação do sistema de recalque, dimensionamento dos painéis fotovoltaicos, seleção do inversor e dimensionamento das baterias e cabeamento. Por fim, realizou-se a análise da viabilidade econômico-financeira do projeto e estimou-se a quantidade de gás carbônico que pode ser evitado de lançar na atmosfera com a adoção da medida. O custo total de projeto foi estimado em R\$ 31.182,02 e o retorno de investimento previsto para o sexto ano após a implantação do sistema, com um lucro ao final da vida útil de quase R\$ 350 mil. A medida poderá evitar a emissão de mais de 50 mil kg de CO₂. Concluiu-se que o sistema de bombeamento fotovoltaico proposto é uma boa alternativa, além de proporcionar benefícios econômicos e ambientais.

Palavras-chave: Energia solar. Emissão de CO₂. Irrigação.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sistema de bombeamento	18
Figura 2 – Capacidade global de energia solar instalada 2002-2021 em (GW) ..	21
Figura 3 – Sistema solar isolado e seus componentes	22
Figura 4 – Sistema solar híbrido e seus componentes	23
Figura 5 – Sistema solar conectado à rede on-grid	23
Figura 6 – Sistema de energia solar acoplado a bombeamento para uso agrícola	24
Figura 7 – Variáveis de um sistema de bombeamento	27
Figura 8 – Localização da área de implantação do projeto	31
Figura 9 – Layout do sistema	35
Figura 10 – Faixas de utilização de bombas fotovoltaicas	38
Figura 11 – Local de implantação do sistema fotovoltaico	46
Figura 12 – Poço artesiano utilizado na área de estudo	47
Figura 13 – Plantação de capim na área de estudo	47
Figura 14 – Modelo de motobomba mais indicado para o projeto	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação de sistemas de bombeamento de água	25
Tabela 2 – Consumo de água de dessedentação para bovinos em L/dia·animal	33
Tabela 3 – Dados da motobomba selecionada	34
Tabela 4 – Parâmetros de projeto do sistema de recalque	34
Tabela 5 – Vazões mínimas diária	48
Tabela 6 – Irradiação solar diária média mensal (kWh/m ² ·dia) da cidade de Pombal-PB	49
Tabela 7 – Resultados dos cálculos da altura manométrica	49
Tabela 8 – Resultados do cálculo da potência requerida do gerador Fotovoltaico	51
Tabela 9 – Dados do modelo de painel fotovoltaico selecionado	51
Tabela 10 – Dados do modelo de inversor selecionado	52
Tabela 11 – Número mínimo e máximo de painéis em série	52
Tabela 12 – Dados do modelo de bateria selecionado	53
Tabela 13 – Orçamento do sistema fotovoltaico	54
Tabela 14 – Retorno do investimento	55

LISTA DE SIGLAS

CA – Corrente Alternada

CC – Corrente Contínua

CRESESB - Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

MCTI – Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações

NBR – Norma Técnica Brasileira

PB – Paraíba

PI – Piauí

PVC - Policloreto de Vinila

SFVI – Sistema Fotovoltaico de Irrigação

UDES – Unidade Demonstrativa com Uso de Energia Solar

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	14
1.1.	Justificativa	15
1.2.	Objetivos.....	16
1.2.1.	<i>Geral.....</i>	16
1.2.2.	<i>Específicos</i>	16
1.3.	Escopo do Trabalho.....	16
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	17
2.1	Sistemas de bombeamento convencional	17
2.1.1.	<i>Conjunto Motobomba</i>	19
2.2.	Energia solar	20
2.2.1.	<i>Sistemas de energia solar.....</i>	21
2.3.	Sistema de bombeamento solar	24
2.3.1.	<i>Dispositivos das placas</i>	25
2.3.2.	<i>Parâmetros de dimensionamento do sistema de bombeamento</i>	26
2.4.	Estudos de caso – aplicações de sistema de bombeamento fotovoltaico para irrigação	28
3.	METODOLOGIA.....	31
3.1.	Localização da área de implantação do projeto.....	31
3.2.	Caracterização da área de estudo	31
3.2.1.	<i>Vazão de água necessária para a irrigação das culturas forrageiras</i>	32
3.2.2.	<i>Vazão de água necessária para dessedentação animal</i>	33
3.2.3.	<i>Radiação solar em Pombal-PB</i>	33
3.3.	Verificação do atual sistema de recalque	34
3.4.	Dimensionamento do sistema fotovoltaico	39
3.4.1.	<i>Número de painéis fotovoltaicos.....</i>	39
3.4.2.	<i>Seleção do inversor e definição do arranjo dos painéis</i>	40
3.4.3.	<i>Dimensionamento das baterias</i>	41
3.4.4.	<i>Dimensionamento do cabeamento.....</i>	42
3.5.	Análise da viabilidade econômico-financeira do projeto	43
3.5.1.	<i>Orçamento</i>	43
3.5.2.	<i>Custos com manutenção</i>	44
3.5.3.	<i>Retorno do investimento.....</i>	44

3.6.	Carbono evitado.....	45
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	46
4.1.	Caracterização da área de estudo	46
4.1.1.	<i>Vazão diária de água requerida</i>	<i>47</i>
4.1.2.	<i>Radiação solar em Pombal-PB</i>	<i>48</i>
4.2.	Verificação do sistema de recalque	49
4.3.	Dimensionamento do sistema fotovoltaico	50
4.3.1.	<i>Número de painéis fotovoltaicos.....</i>	<i>50</i>
4.3.2.	<i>Seleção do inversor e definição do arranjo dos painéis</i>	<i>52</i>
4.3.3.	<i>Dimensionamento das baterias</i>	<i>53</i>
4.3.4.	<i>Dimensionamento do cabeamento.....</i>	<i>53</i>
4.4.	Análise da viabilidade econômico-financeira do projeto	54
4.4.1.	<i>Orçamento</i>	<i>54</i>
4.4.2.	<i>Custos de manutenção.....</i>	<i>54</i>
4.4.3.	<i>Retorno do investimento</i>	<i>55</i>
4.5.	Carbono evitado.....	56
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	57
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58
	ANEXOS	63

1. INTRODUÇÃO

Muitas propriedades e comunidades rurais, no Brasil, não são atendidas por serviços básicos essenciais, como por exemplo energia elétrica, água potável e saneamento básico. No entanto, a disponibilidade energética e hídrica é extremamente importante para atividades nessas áreas, como a agricultura irrigada e a dessedentação animal. No geral, os sistemas de irrigação exigem sistema de bombeamento, o que acarreta elevado consumo de energia elétrica e conseqüentemente o alto custo de operação. Dessa maneira, os pequenos agricultores têm a prática da agricultura irrigada limitada, em especial aqueles que não residem em regiões com disponibilidade de rede elétrica ou hídrica.

Sendo assim, o ambiente rural necessita de meios tecnológicos para o seu desenvolvimento. As tecnologias para o aproveitamento das energias renováveis, como por exemplo a fotovoltaica, nesse âmbito, têm alcançado bons níveis de maturidade e confiabilidade, tornando-as opções viáveis para a solução deste problema no meio rural (NOGUEIRA, 2009).

A energia solar/fotovoltaica se apresenta como uma fonte de potencial elevado quando comparada às demais fontes de energias renováveis, pois apresenta níveis de radiações disponíveis teóricos aplicados para diferentes finalidades. Uma de suas aplicações, é para o acionamento de motor-bombas destinadas ao uso da irrigação. Neste contexto, o Sistema Fotovoltaico de Irrigação (SFVI) torna-se atraente, principalmente no Nordeste, em que regiões mais áridas, que apresentam maior necessidade hídrica, são áreas com maior quantidade de radiação solar disponível (LEITE, 2016).

Andrade (2013), em estudo acerca do uso de sistemas fotovoltaicos, verificou que o uso da energia solar no sistema de bombeamento de água, quando bem dimensionada, tornou-se uma técnica vantajosa em comparação a outras fontes de energia, uma vez que, em sistemas fotovoltaicos não há custos de consumo e sua manutenção se restringe à limpeza da bomba ou a troca de bateria – caso o sistema disponha de uma.

De acordo com o IBGE (2016), 79% dos postos de trabalhos gerados pelo setor agrícola dependem diretamente da disponibilidade de recursos hídricos. Corroborando com essas informações, dados apontam que até o ano de 2016 o uso

da água tem crescido cerca de duas vezes mais rápido do que a população mundial (JIMÉNEZ, 2017). Estima-se que, se mantidos os mesmos padrões de consumo até 2030, o mundo enfrentará um déficit no abastecimento de água em torno de 50% (WWAP, 2016). Portanto, é evidente a importância de investir na busca por novas alternativas que visem à melhoria da eficiência energética e à conservação dos recursos naturais para evitar a escassez hídrica e promover o desenvolvimento sustentável (WWAP, 2016).

Desta forma, este estudo visa apresentar um sistema de bombeamento fotovoltaico, capaz de atender às demandas hídricas de uma propriedade rural, localizada no sítio Tabuleiro Redondo, Pombal – PB. A iniciativa facilitará no processo de irrigação e dessedentação animal, permitindo o uso eficiente dos recursos hídricos, além de reduzir os custos de operação no sistema de irrigação.

1.1. Justificativa

O setor agrícola assegura a subsistência e a geração de emprego de várias famílias de comunidades rurais, contribuindo diretamente para a segurança alimentar e nutricional da população do país. Assim, este estudo surge como uma forma de assegurar o bem estar e uma vida estável para a família da área de estudo, localizada no Sítio Tabuleiro Redondo, município de Pombal-PB.

A busca por uma solução mais econômica capaz de relacionar e analisar às problemáticas provocadas pela condição climática do país, bem como do estado, poderá dar uma contribuição significativa no campo teórico e prático em projetos de bombeamento fotovoltaico, principalmente para as comunidades rurais do sertão paraibano que fazem uso da irrigação.

Além disso, esse estudo visa apresentar alternativa que proporcione benefícios econômicos e ambientais pela adoção de um sistema fotovoltaico, pois além de contribuir com a redução de custos com energia elétrica, ele beneficia diretamente o meio ambiente, evitando o lançamento de gás carbônico na atmosfera, uma vez que se trata de uma energia renovável.

1.2. Objetivos

1.2.1. Geral

Dimensionar um sistema de bombeamento usando energia fotovoltaica, para irrigação de culturas forrageiras e dessedentação animal no sertão da Paraíba, bem como apontar os benefícios econômicos e ambientais da adoção dessa medida.

1.2.2. Específicos

- Verificar o atual sistema de recalque;
- Dimensionar o sistema fotovoltaico;
- Apontar possíveis benefícios econômicos e ambientais da adoção do sistema fotovoltaico para o bombeamento.

1.3. Escopo do Trabalho

No Capítulo 1, é apresentada uma breve introdução acerca da aplicação da energia solar em sistemas de irrigação. São descritos também a justificativa do estudo e os objetivos propostos.

No Capítulo 2, o referencial teórico apresenta um conjunto de informações norteadoras do estudo. São abordados definições e conceitos essenciais para análises e discussões dos resultados.

No Capítulo 3, é descrita a metodologia utilizada na realização do estudo. É feita a descrição detalhada do cálculo de dimensionamento do sistema de bombeamento fotovoltaico.

No Capítulo 4, são expostos os resultados do dimensionamento do sistema de bombeamento por energia fotovoltaica. São apresentados todos os componentes dimensionados, o orçamento básico do projeto, além da análise econômico-financeira e benefícios ambientais.

No Capítulo 5, são apresentadas as considerações finais do estudo.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Sistemas de bombeamento convencional

De maneira geral, o sistema de bombeamento convencional é composto por um conglomerado de instalações e equipamentos que fazem o deslocamento de um determinado fluido entre pontos distintos, com intuito de vencer distâncias e diferenças de níveis geométricos, sendo o seu objetivo primordial o fornecimento de água com determinada quantidade e pressão desejada para seus usos específicos, sejam eles residencial, serviços públicos, consumo industrial, irrigação, entre outros (FERNANDES, 2017).

Acerca dos sistemas de bombeamento convencionais afirma Jiménez (2017, p. 29):

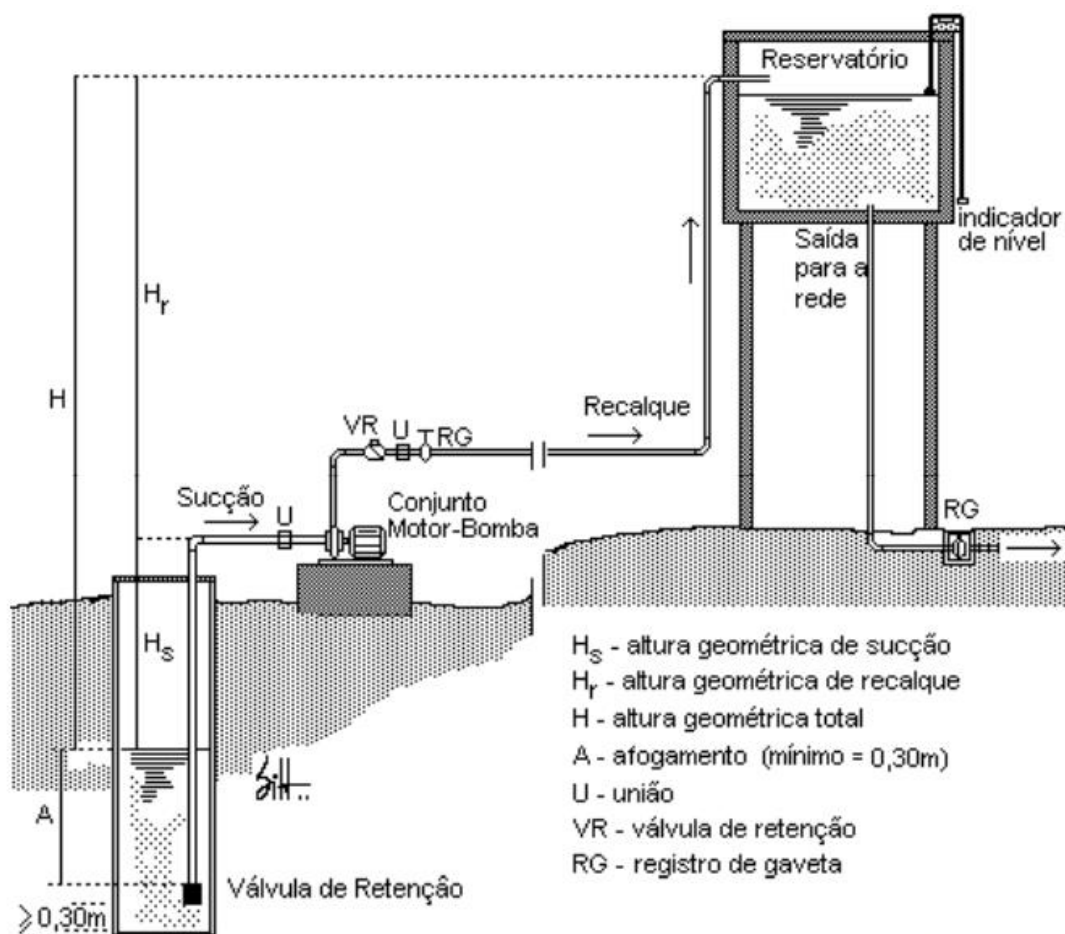
Para cumprir sua função, por meio do trabalho conjunto de tubulações, acessórios, bomba(s) e motor(es), o sistema de bombeamento converte diferentes formas de energia (seja elétrica, cinética, da queima de combustíveis, entre outras) em energia mecânica e a transfere ao fluido de trabalho para que este possa ser transportado de um reservatório inferior, ou de uma captação, para um reservatório superior ou ponto de consumo.

Vale ressaltar, que para a utilização de sistemas de bombeamento faz-se necessário um estudo prévio, para conhecer a demanda da vazão de água, eficiência do sistema, altura demanda de bombeamento. De um modo geral, não existem sistemas de partida melhores ou piores (GOMES, 2009). A escolha deve ser realizada a partir da verificação das limitações da instalação elétrica, das características da carga acoplada ao motor, do plano de manutenção desejado, do capital inicial disponível etc.

Entretanto, o sistema de bombeamento convencional pode ser dividido em três partes principais (Figura 1), sendo elas:

- Tubulação (sucção e recalque),
- Conjunto elevatório (motor e bomba) e,
- Poço/Reservatório.

Figura 1 – Sistema de bombeamento.



Fonte: Fernandes (2017).

As tubulações tem a função de permitir que a água circule entre pontos desejados com o mínimo de perdas possíveis, por caminho com menor custo, rapidez e consumo de energia mecânica. Busca tornar a diferença de altura monométrica entre os pontos a menor possível. As tubulações são formadas pelo agrupamento de vários acessórios como tubos, expansões, reduções, válvulas, curvas, entre outras (JIMÉNEZ, 2017).

Entretanto, como relata Jiménez (2017), o responsável por fornecer o dinamismo à água, causando o seu deslocamento entre os níveis geométricos desejados, é o conjunto motobomba. O funcionamento do motobomba atua convertendo a energia elétrica em mecânica podendo assim transferi-la para a água por meio da bomba, logo o seu dimensionamento depende um do outro, pois a especificidade de cada sistema exige que haja uma escolha ideal para cada aplicação.

Portanto, é importante que haja o conhecimento dos diferentes tipos de equipamentos que estão disponíveis no mercado, de modo que haja a melhor escolha para atender às características e demandas, para que sejam respeitados os termos de eficiência e baixo custo do sistema de bombeamento em questão.

2.1.1. Conjunto Motobomba

Para que seja feita a melhor escolha do conjunto motor e bomba o seu dimensionamento tende a ser feito de forma dependente, visto que é com a união deles que se atinge as melhores condições de trabalho. Logo, é importante conhecer os diversos equipamentos disponíveis no mercado e suas especificações, visando uma melhor escolha em termos de eficiência e custos. Comumente, as bombas podem ser classificadas em 2 categorias levando em consideração o tipo de fluxo que induzem, são elas: as volumétricas ou de deslocamento positivo, e as turbo bombas conhecidas como cinéticas, ou ainda de bombas de fluxo (JIMÉNEZ, 2017).

Bombas volumétricas são aquelas que possuem uma ou mais câmaras, que há um aumento de pressão provocado por meio de um elemento móvel assim causando o deslocamento do fluido, o seu funcionamento se dá quando ocorre uma rotação do eixo, que desloca um volume fixo de produto, independente das condições de pressão na saída. Tais bombas são aplicáveis a situações onde se demanda baixa vazões e altas pressões, ideais para fluidos mais espessos (EFFICIENTIA, 2005).

Já sobre as turbobombas descreve com propriedade Jiménez (2017, p. 31).

No caso das turbobombas, sua principal característica é a presença de um elemento girante dotado de pás chamado de rotor, movido por alguma fonte de potência através do seu eixo. A carcaça alberga ao conjunto, deixando em evidência o eixo, que transfere a potência de acionamento à sucção, por onde o fluido entra no conjunto, e à descarga, por onde ele sai. A parte da carcaça que contém o rotor se chama voluta, possui uma forma espiral que produz uma seção de escoamento crescente na periferia do rotor. O contínuo crescimento da seção de escoamento na voluta e bocal produz uma conversão de energia cinética em pressão. Estes dispositivos, em que ocorre a conversão de energia cinética em pressão, são chamados de difusores.

Quando falamos do bombeamento de água, as bombas mais indicadas são: bombas centrífugas, mistas e axiais. Entretanto, para que sejam satisfeitas as aplicações, o rotor sofre algumas mudanças, geralmente os classificamos em rotores fechados, abertos e semiabertos cada qual com intuito e aplicação específica, sendo

os rotores fechados adequados para bombeamento de líquidos limpos ou puros, pois os seus dutos podem ser facilmente obstruídos; enquanto os rotores abertos e semiabertos são ideias para bombear líquidos com partículas em suspensão, como esgotos sanitários (EFFICIENTIA, 2005).

Após a realização do dimensionamento da bomba, para munir as demandas, determina-se a quantidade de trabalho necessário para seu funcionamento, esta pode advir das mais variadas fontes, todavia, devido a sua eficiência, larga faixa de potência e praticidade, o motor elétrico predomina em estações elevatórias. Os motores elétricos se inserem em dois grandes grupos, os que funcionam com corrente contínua (motores CC), e os acionados por corrente alternada (motores CA) (JIMÉNEZ, 2017).

Os motores CC são comumente utilizados para as aplicações que tem a necessidade de ajustes na velocidade e rotação, ou quando a energia elétrica advém de baterias como é o exemplo de automóveis e sistemas solares isolados sem o inversor, esses tipos de motores geralmente incorporam sistemas de energia solar pois são de excitação independente (separado), série e shunt (GOMES, 2009).

Já os motores CA, os síncronos apresentam uma rotação rigorosa, sendo dispostos em aplicações que não necessitem de variações na velocidade e rotação, quando aplicados com grandes potências também exercem a função de capacitores síncronos. Os modelos assíncronos que são baseados em indução eletromagnética, são adequados para operarem em alta e baixa tensão em operações como siderúrgicas, refinarias, petroquímicas e indústrias de cimento, papel, mineração, bombeamento de água, e uso geral; portanto, são os mais usados por suas amplas características operacionais e sua robustez (GOMES, 2009).

2.2. Energia solar

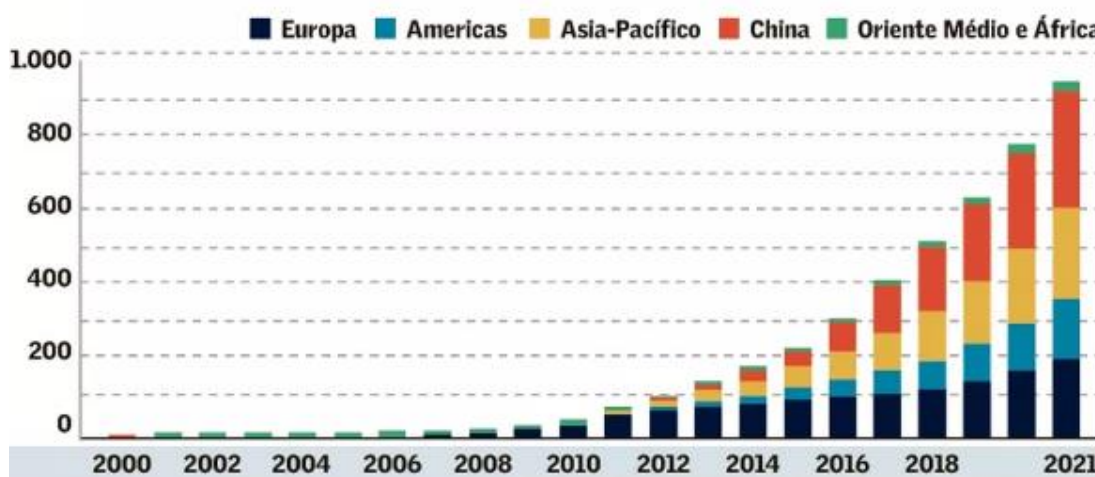
A energia solar é uma fonte sustentável, por ser menos poluente que as demais, além de apresentar uma ótima viabilidade econômica, conhecida por ser uma fonte quase infinita. Em algumas localidades do globo, o sol e seus raios estão disponíveis desde o momento que passamos a existir na Terra, entretanto vem sendo melhor aproveitada com a evolução tecnológica. Por isso, nos dias atuais muitos dizem que a energia solar é a melhor opção por apresentar uma parcela menor de desvantagens em relação as outras energias renováveis. Porém, para conseguir montar um sistema

que forneça energia de forma confiável, encontram-se um certo grau de complexidade e algumas dificuldades (LOPEZ, 2013).

A energia solar é uma ótima fonte de eletricidade para telecomunicação, iluminação, televisores, micro-onda, ferramentas, computador, rádios, refrigeração de vacina, ventiladores, bombas, telefones e eletrônicos (LOPEZ, 2013).

Nos últimos anos a energia solar vem ganhando muita presença no mercado especialmente a partir de 2015, em que apresentou um crescimento de 25% em relação ao ano de 2014, houve um aumento recorde de 50 GW, quando no mundo atingiu um total de 227 GW, o que foi visto como um crescimento que aconteceu de forma surpreendente, em função de apresentar um aumento de quase 10 vezes a capacidade acumulada na década anterior (REN21, 2016). A partir da Figura 2, pode-se perceber o crescimento da energia fotovoltaica no mundo.

Figura 2 – Capacidade global de energia solar instalada 2002-2021 em (GW).



Fonte: SolarPower Europe (2022).

2.2.1. Sistemas de energia solar

O sol transmite energia para a Terra através dos seus raios, porém, por localizar-se a uma grande distância do nosso planeta, apenas uma pequena fração da radiação total que é emitida chega à superfície terrestre. Contudo, essa baixa radiação é suficiente para suprir a demanda global de energia, visto que fica disposto o estimado a 1×10^{18} Kwh o que é equiparado a dez mil vezes a demanda de energia no mundo. Portanto, utilizando apenas 0,01% do que o sol nos fornece já

conseguiríamos atender a demanda energética total da humanidade (PORTAL ENERGIA, 2004).

Separado em três principais categorias: isolados, híbridos ou conectados à rede, os sistemas solares fotovoltaicos podem ser dispostos em qualquer localidade do planeta onde haja radiação solar suficiente. Os sistemas isolados (Figura 3) tem como componentes uma unidade geradora (painel fotovoltaico), dispositivo de armazenamento (baterias) e um controlador de carga que regula o carregamento da bateria. Esse tipo de sistema não faz uso da rede elétrica funcionando de forma independente, também se faz necessária a instalação de um conversor ao sistema (inversor CC-CA), atuando na alimentação adequada das cargas que vem das baterias (LOPEZ, 2013).

Figura 3 – Sistema solar isolado e seus componentes.



Fonte: NeoSolar (2022).

Já os sistemas híbridos são aqueles que fazem uso de duas ou mais fontes de energia, não se retendo apenas a geração solar (Figura 4), esse tipo de sistema apresenta um maior grau de complexidade, pois necessitam de algum tipo de controle para que haja a integração entre os vários geradores (LOPEZ, 2013).

Figura 4 – Sistema solar híbrido e seus componentes.



Fonte: Solar Brasil (2022).

Em instalações solares domésticas, usualmente adota-se o sistema convencional conectado à rede (Figura 5), também conhecido como on-grid geralmente não tem a necessidade de dispositivos que armazenem energia e funcionam fornecendo uma parcela da sua geração de energia para rede (LOPEZ, 2013).

Figura 5 – Sistema solar conectado à rede on-grid.



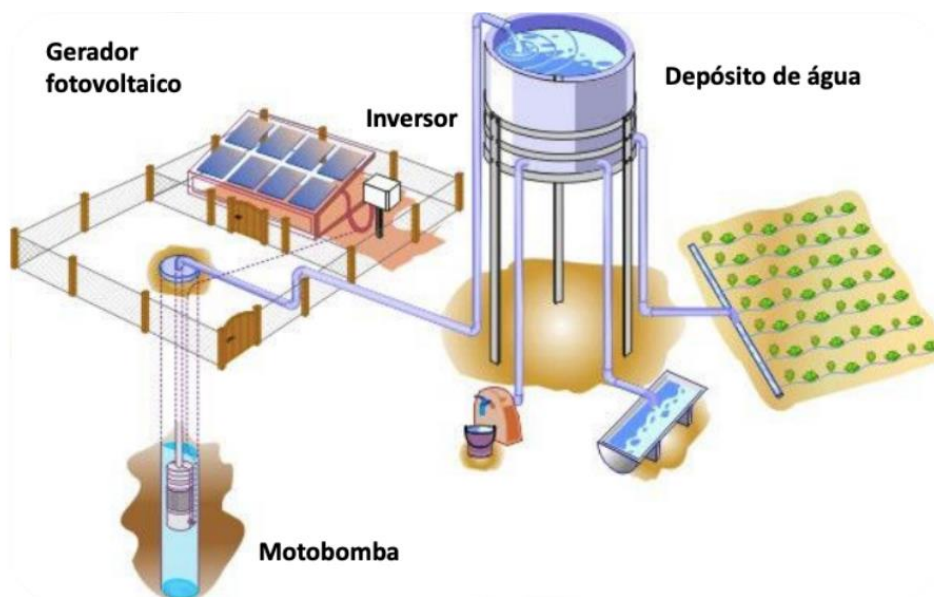
Fonte: CRS Energia Solar (2014).

2.3. Sistema de bombeamento solar

Uma alternativa para alimentação de sistemas de bombeamento é o uso da energia solar fotovoltaica (Figura 6), haja visto a grande demanda de bombeamento d'água principalmente na Região Nordeste brasileira, onde ocorrem os maiores índices de insolação. Além disso, os constantes aumentos dos preços de combustíveis fósseis, que também são geradores de impactos ambientais, são aspectos que contribuem para a opção desses sistemas. Outrossim, é uma ótima escolha para localidades de difícil acesso onde as concessionárias de energia têm dificuldade de prestarem seus serviços (LI et al, 2017).

Os estudos na área de bombeamento solar iniciaram-se na década de 1970. O primeiro empreendimento em larga escala noticiado se deu no continente africano, mais especificamente em Mali (FREDRIZZI, 1997). Desde então vem apresentando avanços significativos em diferentes componentes, além de externar grande viabilidade econômica o que fortalece a relação desse tipo de alternativa com as questões ambientais e sustentáveis (LI et al, 2017).

Figura 6 – Sistema de energia solar acoplado a bombeamento para uso agrícola.



Fonte: CICLOVIVO (2022).

Fraidenraich e Vilela (1999) mostram que ao se tratar do bombeamento de água, é possível notar diversas vantagens relacionadas às bombas que utilizam sistema solar quando comparadas a outros sistemas, dispostas na Tabela 1:

Tabela 1 – Comparação de sistemas de bombeamento de água.

Tipo de bomba	Principais vantagens	Desvantagens
Bomba manual	Baixo custo; Fácil manutenção; Não necessita de combustível; Pode ser usada com poços escavados manualmente.	Manutenção frequente; Baixo fluxo de água; Demanda tempo e energia que se poderia usar com mais produtividade em outras atividades.
Bomba solar (acionada por geradores fotovoltaicos)	Pouca manutenção; Não necessita combustível; Fácil de instalar; Confiável; Grande durabilidade; Funciona sem supervisão; Poucos custos repetitivos; Sistema modular, fácil de adaptar à demanda.	Investimento inicial elevado; Menor produção em climas com baixo recurso solar.
Bomba diesel	Inversão de capital moderada; Pode ser portátil; Tecnologia bem conhecida; Fácil de instalar.	Manutenção inadequada reduz sua vida útil; Combustível caro e abastecimento irregular; Problema de ruído e poluição.

Fonte: Fraidenraich e vilela (1999).

2.3.1. Dispositivos das placas

O coração do sistema é seu arranjo fotovoltaico, que é a matriz de geração de energia e pode ser composto pela associação em série ou paralelo de módulos fotovoltaicos, módulos esses formados pela combinação das células fotovoltaicas. Tais componentes são encontrados no mercado principalmente fabricados em silício monocristalino e silício policristalino, tendo o monocristalino o maior custo. Como disserta Li et al. (2017), é importante que haja o dimensionamento do número de módulos do arranjo de acordo com a necessidade de energia do sistema,

considerando todas as perdas que surgirem nas unidades posteriores, como inversores, bateria e motor.

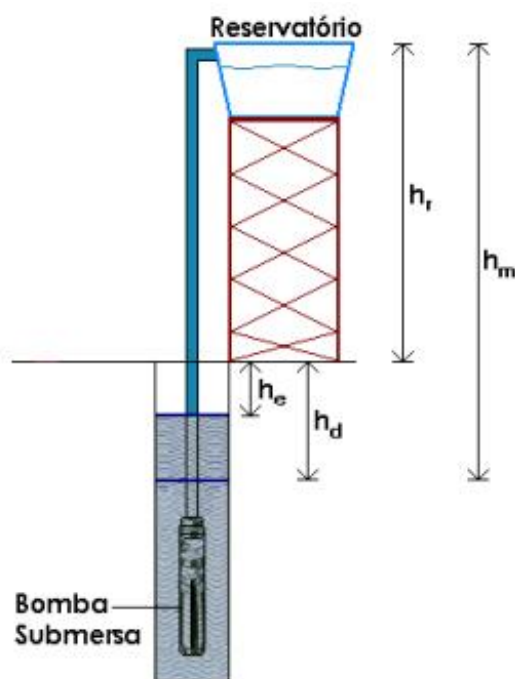
Quanto a fixação dos arranjos fotovoltaicos, esses podem ser dispostos em estruturas metálicas de inclinação fixas ou aquelas que ocorrem variações, as automatizadas com sistemas de rastreamento solar. No caso de fixas em estruturas metálicas convencionais, tem-se como vantagem a economia já que não se faz necessário os gastos com motores e automação, apenas com mão de obra na sua instalação, já estabelecendo o ângulo de inclinação. Porém, fica implícito que o sistema automatizado tem uma eficiência superior ao fixo haja visto a sua mudança de posição de acordo com a movimentação do sol, mostrando-se cerca de 25% a 50% mais eficaz (SONTAKE; KALAMKAR, 2016).

2.3.2. Parâmetros de dimensionamento do sistema de bombeamento

O dimensionamento de um sistema de bombeamento que utiliza energia solar, pode ser feito em duas etapas sendo a primeira delas o cálculo de demanda d'água para atividade em questão, seja ela agrícola, residencial ou de consumo humano. Esta etapa tem grande importância para a determinação da vazão que se deseja bombear, a segunda parte se dá pelo dimensionamento do sistema de geração (CRESESB, 2014).

Para que seja executada a etapa de dimensionamento, antes de tudo é importante o conhecimento acerca de alguns conceitos que estão expressos na (Figura 7).

Figura 7 – Variáveis de um sistema de bombeamento.



Fonte: CRESESB (2014).

Os parâmetros mostrados na figura acima são:

- Altura estática (h_e): definida como a distância entre o nível do solo e o nível da água em repouso;
- Altura dinâmica (h_d): distância entre o nível do solo e o nível da água durante o bombeamento;
- Altura do reservatório (h_r): distância do ponto superior do reservatório ao solo;
- Altura manométrica (h_m): soma da altura dinâmica com a altura do reservatório.

As resistências que a água bombeada sofre ao escoar pela tubulação ou pelas peças hidráulicas, que compõe parte do sistema de bombeamento, são consideradas nas perdas de cargas. Tais perdas são mensuradas em metros, sendo assim equivalente a uma maior distância percorrida pelo fluido, o que implica em uma maior necessidade energética do sistema. Logo, visando uma maior praticidade na hora de fazer essas instalações os fabricantes de tubos e conexões fornecem tabelas para a

consideração desses valores, possibilitando assim calcular a altura monométrica do sistema (CRESESB, 2014).

A altura manométrica e a demanda de água são dados essenciais para a definição da energia hidráulica e energia elétrica necessária para o adequado funcionamento do sistema. É muito importante definir esses parâmetros de maneira cuidadosa, pois serão utilizados para o dimensionamento de todos os componentes: motobomba, painéis solares, inversores e baterias.

2.4. Estudos de caso – aplicações de sistema de bombeamento fotovoltaico para irrigação

- **Estudo de caso 1**

Na pesquisa desenvolvida por Cartaxo (2016), que apresentou a implantação de UDES – Unidade demonstrativa com uso da energia solar em uma fruticultura familiar irrigada –, localizada na comunidade de Surrão dos Poços, município de Galante – PB, outra na comunidade de Açude de Dentro, no município de Catolé de Boa Vista – PB. Segundo a autora, a área de estudo do município de Galante – PB possuía aproximadamente $\frac{1}{4}$ de hectare com sistema instalado para irrigação por micro aspersão, injetando a água diretamente na folhagem, enquanto a área de cultivo de Catolé de Boa Vista – PB também possuía $\frac{1}{4}$ de hectare, com sistema inicialmente instalado por micro aspersão, mas devido ao problema de salinidade afetar o plantio, fez-se a mudança para irrigação por gotejamento.

A autora apresentou em seu estudo todas as diferentes formas de irrigação, enfatizando o uso de sistema de bombeamento fotovoltaico em seu desenvolvimento. Na pesquisa em questão foi instalada uma UDES composta por um conjunto motobomba alimentado diretamente por um gerador fotovoltaico. Este conjunto, foi instalado sobre um poço próximo ao reservatório de água na comunidade de Surrão dos Poços. Entretanto, o conjunto motobomba instalado em Açude de Dentro necessitou de uma elevação de 5 metros, devido a condição do terreno e além disso houve a necessidade de uma contribuição da eletricidade convencional devido a bomba não ter capacidade em razão da profundidade do poço (25 metros).

Após analisar os resultados obtidos com a instalação das UDES, a autora identificou os benefícios do uso de energia fotovoltaica quando aplicada na irrigação,

destacando entre eles a redução dos custos de operação, o aumento da produção, minimização dos riscos de perda de safra, criação de empregos, diminuição dos impactos ambientais, tempo menor para bombeio de água, segurança alimentar e redução do êxodo rural.

- **Estudo de caso 2**

Paniago (2022) realizou um estudo onde buscou desenvolver um modelo de sistemas de bombeamento fotovoltaico em corrente alternada para irrigação. Neste estudo, a autora escolheu o cultivo do tomateiro porque o Brasil é um grande produtor do fruto. Outro fator que contribuiu para a escolha é que a sua produção é realizada durante o período seco, entre março e setembro, o que faz a aplicação suplementar de água indispensável para o correto desenvolvimento do fruto.

A região estudada pela autora possuía cerca de 1,8 ha, e foi determinado que a irrigação estudada seria por gotejamento, e a partir de sua escolha realizou o estudo do manejo da irrigação, do tipo do solo, da eficiência de irrigação, do dimensionamento do sistema motobomba e etc. O dimensionamento passa pelo manejo da irrigação, volume necessário de água, potência hidráulica, escolha da motobomba, inversor de frequência e dimensionamento do conjunto fotovoltaico. Ao final dele, a autora também realizou um estudo de viabilidade econômica onde compara um sistema alimentado por gerador a diesel com um sistema de bombeamento apresentado pelo trabalho.

- **Estudo de caso 3**

Morales (2011), estudou a utilização de sistemas fotovoltaicos de bombeamento para irrigação em pequenas propriedades rurais. O desenvolvimento da pesquisa se deu através da análise e revisão das experiências realizadas no Brasil e em outros países, com a finalidade de identificar e caracterizar as principais barreiras e potencialidades para o uso de sistemas fotovoltaicos de irrigação e propor orientações para futuros projetos com essa tecnologia.

Paralelo às análises da revisão bibliográfica, o autor visitou dois projetos com sistemas fotovoltaicos aplicados na irrigação, um localizado no Peru e outro no Chile, afim de conhecer a tecnologia aplicada e o impacto da mesma nas localidades beneficiadas.

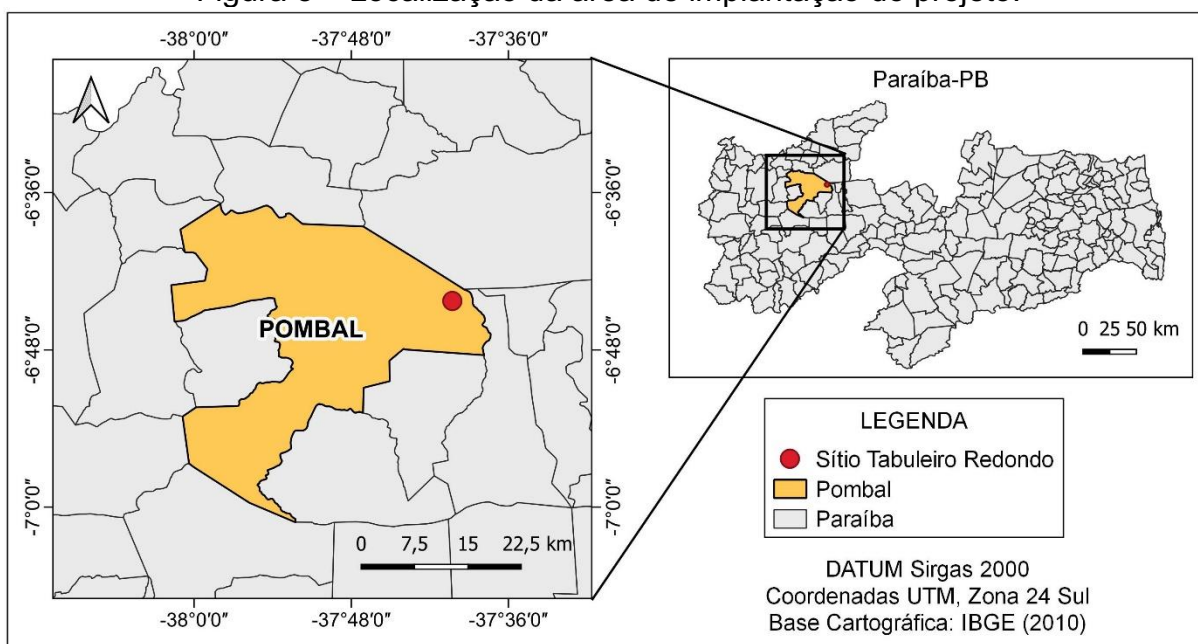
Após o levantamento dos dados, o autor apresentou em sua pesquisa os benefícios e as barreiras encontradas com a implantação dos sistemas de bombeamentos fotovoltaicos de irrigação. O autor destacou, que estas barreiras são resumidas em cinco grupos: econômicas/financeiras, informativas, técnicas, institucionais/regulatórias e comerciais. Por esse motivo, trata-se de um sistema relativamente novo implantado no mercado de trabalho.

3. METODOLOGIA

3.1. Localização da área de implantação do projeto

A área de implantação do projeto é uma propriedade rural localizada no Sítio Tabuleiro Redondo, no município de Pombal, sertão da Paraíba (Figura 8).

Figura 8 – Localização da área de implantação do projeto.



Fonte: Autor (2023).

Essa propriedade é destinada à criação de bovinos e parte da alimentação desses animais é advinda do plantio de cultura forrageira (capim elefante roxo). A dessedentação animal e a irrigação do capim é realizada diariamente por meio do bombeamento de água de um poço artesiano.

3.2. Caracterização da área de estudo

Para realizar a caracterização da área de estudo, foram feitas visitas no local da futura implantação do sistema fotovoltaico. Através dessas visitas coletou-se informações do poço artesiano e os dados necessários para a determinação do consumo diário de água destinada à irrigação e dessedentação animal.

Para o dimensionamento do sistema de bombeamento faz-se necessário conhecer a vazão de recalque, que foi obtida através do somatório das vazões diárias de irrigação e dessedentação animal, por meio da Equação 1.

$$Q_d = Q_i + Q_a \quad (1)$$

Em que:

Q_d : vazão diária de água (m^3/dia);

Q_i : vazão diária de água na irrigação (m^3/dia);

Q_a : vazão diária de água na dessedentação animal (m^3/dia).

3.2.1. Vazão de água necessária para a irrigação das culturas forrageiras

O consumo diário de água ou vazão necessária para a irrigação foi estimado com base na metodologia de cálculo de Scaloppi (2014), através da Equação 2:

$$Q_i = 10 \times A \times \frac{D}{E} \quad (2)$$

Em que:

Q_i : vazão diária de água na irrigação (m^3/dia);

A: área irrigada (ha);

D: quantidade de água requerida pela forrageira (mm/dia);

E: eficiência de aplicação de água desejada (adimensional e decimal).

A área irrigada do projeto é de aproximadamente 0,7 ha. A quantidade de água requerida pela forrageira, segundo Scaloppi (2014), é um parâmetro que depende de vários fatores como evaporação do solo, transpiração das plantas, constituição dos tecidos vegetais, entre outros. Existem valores médios adotados em projetos, sendo que para a região Sudeste, Sul e Centro-Oeste, normalmente adota-se 4 mm/dia, no entanto a região Nordeste, onde situa-se a área de estudo, possui condições climáticas muito diferentes, exigindo valores superiores.

Desta forma, foram realizadas pesquisas na literatura para definir um valor de projeto adequado da quantidade de água requerida. Através das pesquisas, adotou-se $D = 5,90$ mm/dia, baseando-se em Rodrigues et al. (2011), que estudou acerca da evapotranspiração do Capim-Tanzânia em Teresina-PI, planta semelhante a cultivada

na área de estudo e também em uma região com condições climáticas mais próximas da realidade de projeto.

Considerando que o sistema de irrigação não opera com eficiência absoluta, pois sempre ocorrem perdas durante o processo de aplicação, adotou-se nesse projeto $E = 0,8$.

3.2.2. Vazão de água necessária para dessedentação animal

O consumo de água ou vazão destinada a dessedentação animal foi definido com base em bancos de dados da EMBRAPA (PILHARES, 2013). Sabendo a quantidade de bovinos (48 animais) e suas características (28 animais de até 370 kg, 10 vacas em lactação e 10 bezerros lactantes), foi possível definir o consumo diário por meio do Tabela 2 e da Equação (3).

Tabela 2 – Consumo de água de dessedentação para bovinos em l/dia·animal.

Bovinos de corte	Consumo
Até 250 kg	25
Até 370 kg	40
Até 455 kg	60
Bovinos de leite	Consumo
Vaca em lactação	64
Vaca e novilha no final da gestação	51
Vaca seca e novilha gestante	45
Bezerro Lactante (a pasto)	12

Fonte: Adaptado de Pilhares (2013).

$$Q_a = \frac{\sum c \times q_a}{1000} \quad (3)$$

Em que:

Q_a : vazão diária de água na dessedentação animal (m^3 /dia).

c : consumo diário de água por animal (l/dia·animal);

q_a : quantidade de animais.

3.2.3. Radiação solar em Pombal-PB


Para o dimensionamento do sistema fotovoltaico, é extremamente importante o conhecimento da radiação solar diária média mensal da área do projeto. Para a

obtenção desse dado foi utilizado o *Website* do Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (CRESESB, 2022), no qual foi possível obter a radiação solar diária média mensal da cidade de Pombal-PB.

3.3. Verificação do atual sistema de recalque

O atual sistema de irrigação é composto por uma motobomba, cujas características estão descritas na Tabela 3.

Tabela 3 – Dados da motobomba selecionada.

Descrição	Dados	Imagem
Marca	Schneider	
Modelo	BRAVA E30	
Potência (cv)	3	
Altura manométrica mínima (mca)	2	
Altura manométrica máxima (mca)	30	
Vazão mínima (m³/h)	4,2	
Vazão máxima (m³/h)	43,6	
Tipo de motor	Elétrico trifásico IP-68	
Polos do motor	2	
Frequência do motor (Hz)	60	
Temperatura máxima do líquido bombeado (°C)	40	

Fonte: Schneider Motobombas (2019).

Fez-se necessário verificar se essa motobomba é realmente ideal para o sistema projetado. Para isso, inicialmente calculou-se a altura manométrica. Os parâmetros de projeto utilizados nesse cálculo estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Parâmetros de projeto do sistema de recalque.

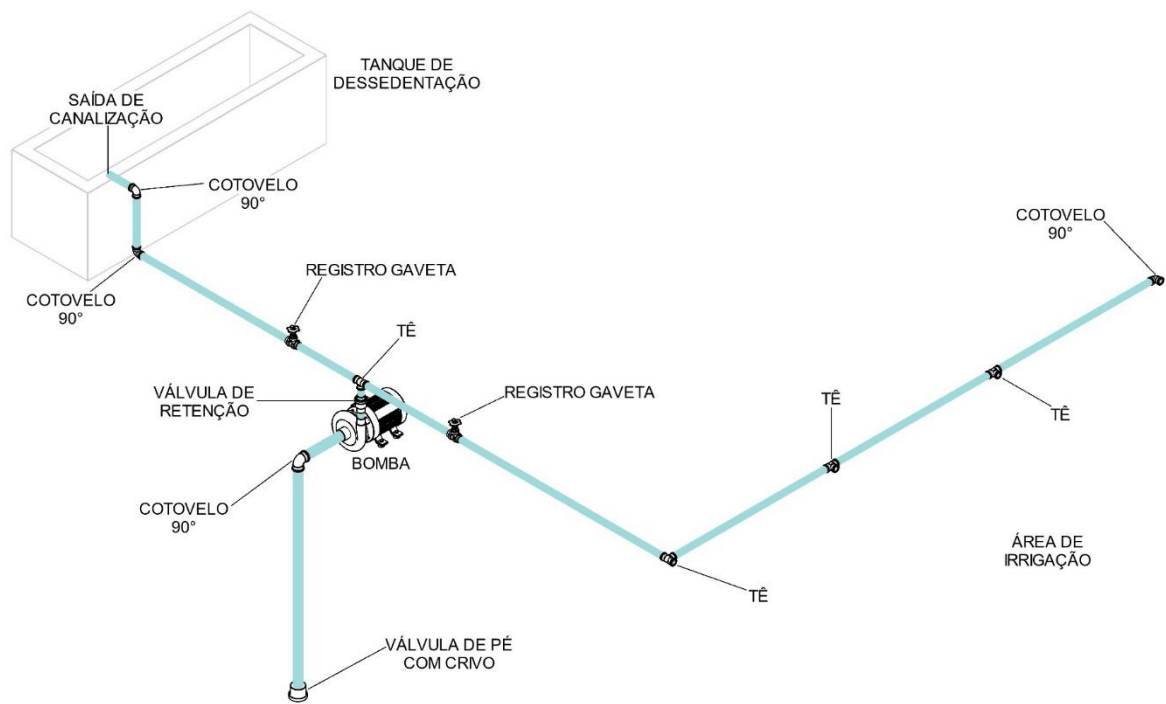
Parâmetros de projeto	Valores de projeto
Vazão máxima do poço (m³/h)	6
Nível dinâmico (m)	15
Desnível do fim do poço até a saída da tubulação (m)	2,5
Diâmetro da tubulação de recalque (mm)	40
Comprimento da tubulação de recalque (m)	196

Fonte: Autor (2023).

A vazão máxima do poço e o nível dinâmico são dados fornecidos pelo proprietário. O desnível do poço até a saída da tubulação, o diâmetro e o comprimento da tubulação de recalque, foram medidos e obtidos na visita ao local.

De posse dos dados necessários, deu-se início o dimensionamento do sistema (Figura 9).

Figura 9 – Layout do sistema.



Fonte: Autor (2023).

O cálculo da altura manométrica seguiu a metodologia descrita por Porto (2006), que considera o método universal, através da Equação (4).

$$H_m = H_d + H_g + h \quad (4)$$

Em que:

H_m : altura manométrica (m);

H_d : nível dinâmico (m);

H_g : desnível do fim do poço até a saída da tubulação (m);

h : perda de carga total no sistema.

Os valores de H_d e H_g já são conhecidos (Tabela 4). A perda de carga total do sistema foi obtida através do somatório das perdas de carga distribuída e localizada.

Para determinar a perda de carga distribuída, foi necessário calcular a velocidade de escoamento, o número de Reynolds e o fator de atrito. Primeiro definiu-se a velocidade de escoamento na tubulação, por meio da Equação (5) (PORTO, 2006).

$$U = \frac{Q}{\frac{\pi D^2}{4}} \quad (5)$$

Em que:

U: velocidade média de escoamento (m/s);

Q: vazão máxima do poço (m³/s);

D: diâmetro da tubulação de recalque.

Em seguida, foi calculado o número de Reynolds, por meio da Equação (6), considerando a viscosidade cinemática da água igual a 10⁻⁶ m²/s (PORTO, 2006).

$$Re = \frac{UD}{\nu} \quad (6)$$

Em que:

Re: número de Reynolds;

U: velocidade média de escoamento (m/s);

D: diâmetro da tubulação de recalque;

ν : viscosidade cinemática da água (m²/s).

Para o fator de atrito foi usada a Equação (7), de Swamee-Jain, recomendada por Porto (2006) para faixas de número de Reynolds entre 5×10³ e 10⁸.

$$f = \frac{0,25}{\left[\log \left(\frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^2} \quad (7)$$

Em que:

f: fator de atrito;

ε : rugosidade usual da tubulação (mm);

D: diâmetro da tubulação de recalque;
Re: número de Reynolds.

Foi adotada uma rugosidade de 0,06 mm para tubos de plástico (PVC), baseado em Baptista e Lara (2014). Por fim, calculou-se a perda de carga distribuída por toda a tubulação de recalque, através da equação (8) (PORTO, 2006).

$$h_d = \frac{fLU^2}{2gD} \quad (8)$$

Em que:

h_d : perda de carga distribuída (m);
f: fator de atrito;
L: comprimento da tubulação de recalque (m);
U: velocidade média de escoamento (m/s);
g: aceleração da gravidade (9,81 m/s²);
D: diâmetro da tubulação de recalque.

Para o cálculo da perda de carga localizada, levou-se em consideração todos os acessórios do sistema e seus respectivos coeficientes de perda de carga (K_u). Os coeficientes de perda de carga de cada peça foram adotados conforme a tabela do Anexo A, e a obtenção do coeficiente de perda de carga total (K_t) foi obtido por meio da Equação (9).

$$K_t = \sum K_u \times q_p \quad (9)$$

Em que:

K_t : coeficiente de perda de carga total do sistema;
 K_u : coeficiente de perda de carga unitário das peças;
 q_p : quantidade de cada peça/acessório.

As peças/acessórios consideradas no sistema, representado na Figura 9, foram: quatro cotovelos de 90°, um crivo, uma válvula de pé, quatro tês de saída de lado, um tê de saída bilateral, uma saída de canalização, duas válvulas de gaveta aberta e uma válvula de retenção.

Considerando o valor de K_t obtido, calculou-se a perda de carga localizada usando a Equação (10) (PORTO, 2006).

$$h_l = \frac{K_t U^2}{2g} \quad (10)$$

Em que:

h_l : perda de carga localizada (m).

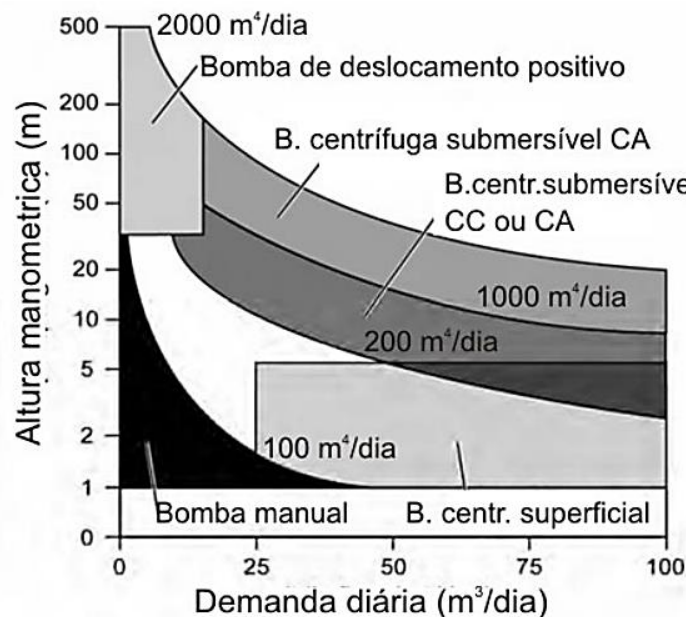
K_t : coeficiente de perda de carga total do sistema;

U : velocidade média de escoamento (m/s);

g : aceleração da gravidade (9,81 m/s²).

Com todos os dados definidos, calculou-se a altura manométrica utilizando a Equação (04) e a partir dos dados de altura manométrica e demanda diária, definiu-se o modelo de bomba ideal para o sistema fotovoltaico, por meio da Figura 10.

Figura 10 – Faixas de utilização de bombas fotovoltaicas.



Fonte: Morales (2011).

Por fim, analisou-se os parâmetros de projeto calculados e comparou-se com os dados do modelo utilizado atualmente, de modo a definir a viabilidade de ser ou não reutilizado no sistema proposto nesse estudo.

3.4. Dimensionamento do sistema fotovoltaico

O dimensionamento do sistema fotovoltaico foi feito seguindo o Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos (CRESESB, 2014). Se deu nas seguintes etapas: definição do número de painéis fotovoltaicos necessários para o sistema; dimensionamento do inversor (necessários para motores do tipo C.A.); e dimensionamento das baterias.

3.4.1. Número de painéis fotovoltaicos

Inicialmente, calculou-se a energia hidráulica do sistema através da Equação (11) (CRESESB, 2014).

$$E_h = 2,725 \times Q_d \times H_m \quad (11)$$

Em que:

E_h : energia hidráulica diária necessária (Wh/dia);

Q_d : vazão diária de água (m³/dia);

H_m : altura manométrica (m);

Calculada a energia hidráulica, foi possível determinar a energia elétrica do sistema, por meio da Equação (12) (CRESESB, 2014).

$$E_{el} = \frac{E_h}{\eta_{mb}} \quad (12)$$

Em que:

E_{el} : energia elétrica diária necessária (Wh/dia);

E_h : energia hidráulica diária necessária (Wh/dia);

η_{mb} : eficiência do conjunto motobomba e equipamentos auxiliares (inversor e bateria).

Para definir o valor da eficiência total, levou-se em consideração a eficiência da bomba (Anexo B) e também a eficiência do inversor (97%) e das baterias (95%), com base no banco de dados dos fornecedores.

Por último, calculou-se a potência do gerador fotovoltaico, utilizando a Equação (13) (CRESESB, 2014).

$$P_{FV} = 1,25 \times \frac{E_{el}}{HSP} \quad (13)$$

Em que:

P_{FV} : potência do gerador fotovoltaico (Wp);

E_{el} : energia elétrica diária necessária (Wh/dia);

HSP: horas de sol pleno ou radiação solar diária média mensal (kWh/m²-dia).

Sabendo a potência do sistema, foi determinada a quantidade de painéis solares, por meio da Equação (14), que leva em consideração uma degradação de 20% dos painéis solares, ao longo de uma vida útil de 25 anos.

$$q_p = 1,20 * \frac{P_{FV}}{P_p} \quad (14)$$

Em que:

q_p : quantidade de painéis;

P_{FV} : potência do gerador fotovoltaico (Wp);

P_p : potência de um painel (Wp).

A potência de um painel foi definida mediante a escolha de um modelo de mercado da marca OSDA.

3.4.2. Seleção do inversor e definição do arranjo dos painéis

Será utilizado apenas um inversor central, em que todos os painéis serão conectados. A escolha do inversor baseou-se no fator de dimensionamento do inversor, que segundo o CRESESB (2014), pode ser obtido através da Equação (15).

$$FDI = \frac{P_{inv}}{P_{FV}} \quad (15)$$

Em que:

FDI: fator de dimensionamento do inversor (adimensional);

P_{inv} : potência nominal do inversor (W);

P_{FV} : potência do gerador fotovoltaico (Wp);

Realizou-se pesquisas em sites de vendas de inversores para sistemas fotovoltaicos, selecionou-se um modelo e em seguida foi feita a verificação do fator de dimensionamento. De acordo com o CRESESB (2014), os fabricantes recomendam que o FDI esteja em uma faixa de 0,75 a 1,05.

Após selecionar o inversor, determinou-se o arranjo dos painéis fotovoltaicos. Os painéis podem ser ligados em série ou em paralelo. De acordo com Furtado (2020), a definição do número mínimo e máximo de painéis em série podem ser obtidos através das Equações (16) e (17).

$$N_{min} = \frac{V_{min,inv}}{V_{MP,p}} \quad (16)$$

$$N_{min} = \frac{V_{máx,inv}}{V_{OC,p}} \quad (17)$$

Em que:

N_{min} : número mínimo de painéis em série;

$N_{máx}$: número máximo de painéis em série;

$V_{min,inv}$: tensão mínima do inversor (V);

$V_{máx,inv}$: tensão máxima do inversor (V);

$V_{MPP,p}$: tensão de máxima potência do painel (V);

$V_{OC,p}$: tensão em aberto do painel (V).

Os dados de tensões mínima e máxima do inversor, tensão de máxima potência do painel e tensão em aberto do painel são especificações dos modelos selecionados, sendo fornecidos pelos fabricantes.

3.4.3. Dimensionamento das baterias

De acordo com o CRESESB (2014), o número de baterias em paralelo necessárias para o armazenamento da energia do sistema fotovoltaico é determinado através da Equação (18).

$$N_{b,s} = \frac{CBI}{CBI_b} \quad (18)$$

Em que:

$N_{b,s}$: número de baterias em paralelo;

CBI: capacidade do sistema de acumulação (Ah);

CBI_b : capacidade da bateria selecionada (Ah)

A CBI_b é a capacidade C20 da bateria selecionada, fornecida pelo fabricante. A CBI é a capacidade C20 do sistema de acumulação, que pode ser calculada por meio da Equação (19) (CRESESB, 2014).

$$CBI = \frac{E_{el} \cdot N}{P_d \cdot V_{sist}} \quad (19)$$

$$N = -0,48 \cdot HSP + 4,58 \quad (20)$$

Em que:

CBI: capacidade do sistema de acumulação (Ah);

E_{el} : energia elétrica diária necessária (Wh/dia);

N: número de dias de autonomia;

P_d : máxima profundidade de descarga da bateria;

V_{sist} : tensão nominal do sistema (V);

HSP: horas de sol pleno ou irradiação solar diária média mensal (kWh/m²-dia).

De acordo com o CRESESB (2014), o número de dias de autonomia não deve ser menor que 2. No Brasil, normalmente, são adotados valores entre 2 e 4. A máxima profundidade de descarga de baterias de ciclo raso (as mais comercializadas no Brasil) está entre 20% e 40%, nesse projeto adotou-se o valor de 40%.

A tensão nominal do sistema é de 24 V, considerando a adoção de monoblocos de bateria de 12 V (CRESESB, 2014).

3.4.4. Dimensionamento do cabeamento

O cabeamento do sistema fotovoltaico foi dimensionado para duas seções:

- S1: dos painéis até o inversor, que corresponde a uma corrente contínua (CC);
- S2: do inversor até o motor, que corresponde a uma corrente alternada (CA).

O dimensionamento das seções dos cabos foi feito a partir do critério da máxima tensão admissível, seguindo a metodologia de cálculo de Alonso, Garcia e Silva (2013), por meio da Equação (21):

$$S = \frac{n \cdot L \cdot I_{G,MPP}}{\sigma \cdot V_{NOM} \cdot \Delta V} \cdot 10^6 \quad (21)$$

Em que:

S: seção do condutor (mm²);

n: constante de acordo com o tipo de corrente, CC ou CA;

L: comprimento do condutor considerando positivo + negativo (m);

I_{G,MPP}: corrente de máxima potência (A);

σ: condutividade do cobre (5,8·10⁷ S/m);

V_{NOM}: tensão nominal (V);

ΔV: queda de tensão admissível;

Algumas considerações e recomendações feitas por Alonso, Garcia e Silva (2013), foram adotadas para o cálculo de cada uma das seções:

- Para a seção 1, corrente CC: adotou-se n = 2; o comprimento considerado foi de 20 m (10 m positivo + 10 m negativo); a corrente de máxima potência é fornecida pelo fabricante das placas fotovoltaicos; a tensão nominal é obtida multiplicando a tensão nominal de cada pela quantidade de placas do projeto; adotou-se uma queda de tensão admissível de 1%.
- Para a seção 2, corrente CA: adotou-se n=√3; o comprimento considerado foi de 50 m (25 m positivo + 25 m negativo); a corrente de máxima potência é fornecida pelo fabricante do inversor; a tensão nominal utilizada é a de funcionamento do inversor (220 V); adotou-se uma queda de tensão admissível de 0,5%.

3.5. Análise da viabilidade econômico-financeira do projeto

3.5.1. Orçamento

Para analisar a viabilidade do projeto, inicialmente foi elaborado um orçamento básico com os custos de implantação do projeto. Os preços dos componentes do sistema fotovoltaico foram obtidos no comércio online:

- Painéis solares: NeoSolar (2022);
- Inversor: Energyy Shop (2022);
- Baterias: Atacadão das Baterias (2022);
- Estrutura de fixação: Mercado Livre (2022).

Os custos do cabeamento e da mão de obra foram obtidos através de pesquisa de preço no mercado local.

3.5.2. Custos com manutenção

É necessário prever custos de manutenção do sistema fotovoltaico ao longo dos anos, que incluem a verificação dos painéis (limpeza) e dos demais componentes. Segundo Araújo (2016), estima-se que as despesas iniciais com manutenção variem entre 0,5% e 1% do custo total de implantação. Nesse projeto adotou-se o valor de 1%. Ao longo dos anos esse valor é ajustado por um fator de redução, obtido por meio da Equação (22) (ARAÚJO, 2016).

$$F_r = \frac{1}{(1 + D)^t} \quad (22)$$

Em que:

F_r : fator de redução;

D : taxa de desconto;

t : período de tempo, em anos.

Para esse projeto foi adotado uma taxa de desconto de 5%, valor recomendado por Araújo (2016).

3.5.3. Retorno do investimento

O retorno do investimento foi determinado com base na metodologia de Oliveira (2018), em que a economia anual foi obtida multiplicando a energia gerada no ano pela projeção do preço do kWh, através da Equação (23).

$$e_a = E_{ano} \cdot T \quad (23)$$

Em que:

e_a : economia anual gerada (R\$);

E_{ano} : energia gerada anualmente (kWh);

T: Tarifa de energia elétrica (R\$/kWh).

No cálculo da energia gerada foi considerado um índice de degradação anual de 0,5%, previsto pelo fabricante dos painéis solares. A tarifa média de energia elétrica utilizada no estudo, de 0,79 R\$/kWh, foi obtida no site da Energisa, para o grupo: B2, classe: rural irrigação. Esse valor foi ajustado anualmente, considerando uma inflação energética de 10% ao ano, valor recomendado por Oliveira (2018).

3.6. Carbono evitado

Para determinar a quantidade de CO₂ evitado por uma instalação fotovoltaica deve ser utilizada a Equação (25) (AZAMBUJA, 2022).

$$CO_{2,evitado} = E_{gerada} \cdot F_{emissão} \quad (25)$$

Em que:

CO_{2,evitado}: carbono não emitido na atmosfera (kg);

E_{gerada} : energia gerada ao longo da vida útil de 25 anos (kWh);

$F_{emissão}$: fator de emissão de CO₂ (kg/kWh).

A energia gerada ao longo dos 25 anos pode ser obtida somando a geração de cada ano, presente na Tabela 14. O fator de emissão de CO₂ é publicado pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI, 2022). Até o mês de novembro de 2022, o valor médio de emissão de CO₂ no ano era de 0,3689 kg/kWh.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Caracterização da área de estudo

A partir de visitas ao local de implantação do projeto, foram definidos todos os dados básicos necessários para o dimensionamento do sistema de bombeamento fotovoltaico.

A área de cultivo de forrageira (Figura 11) é de aproximadamente 0,7 ha. Atualmente a irrigação do plantio é feito por meio de bombeamento utilizando energia elétrica da rede geral. O poço artesiano está localizado exatamente no centro da área de cultivo.

Figura 11 – Local de implantação do sistema fotovoltaico.



Fonte: Google Earth (2022).

É possível observar que nas proximidades da área cultivada há uma extensa região livre de obstáculos, ideal para a instalação do sistema fotovoltaico, pois segundo Jiménez (2017), essa característica evita que haja possíveis perdas por sombreamento.

Nas Figuras 12 e 13 é possível observar o poço artesiano e a área de cultivo de capim.

Figura 12 – Poço artesiano utilizado na área de estudo.



Fonte: Autor (2023).

Figura 13 – Plantação de capim na área de estudo.



Fonte: Autor (2023).

4.1.1. Vazão diária de água requerida

Todos os dias faz-se necessário o bombeamento de um volume mínimo de água para satisfazer as demandas de irrigação e dessedentação animal.

Na Tabela 5 são apresentados os resultados dos cálculos das vazões diárias mínimas necessárias para satisfazer as demandas da área de estudo.

Tabela 5 – Vazões mínimas diária.

Demanda	Vazão (m³/dia)
Irrigação	51,63
Dessedentação	1,88
Total	53,51

Fonte: Autor (2022).

A vazão diária total é de 53,51 m³/dia, ou seja, o sistema de bombeamento fotovoltaico deve ser dimensionado para atender pelo menos essa vazão.

Devido ao volume total ser elevado, construir um reservatório para atendê-lo demandaria alto investimento. Pensando nisso, o sistema de bombeamento fotovoltaico será of-grid, composto por baterias para o armazenamento da energia solar, gerando maior autonomia para a irrigação, possibilitando que seja realizada de maneira direta sem necessidade de reservatório de armazenamento.

4.1.2. Radiação solar em Pombal-PB

O ângulo de inclinação das placas solares influencia na radiação incidente sobre elas e conseqüentemente na geração de energia do sistema. De acordo com o CRESESB (2014), a geração máxima de energia ocorre quando as placas estão com a mesma inclinação da latitude local da região de implantação.

A cidade de Pombal-PB está localizada a uma latitude de aproximadamente -6,8° N. De acordo com o CRESESB (2014), em áreas com latitudes variando de -10° a +10° N, é importante que seja adotada uma inclinação mínima de 10° N, para favorecer a autolimpeza dos módulos. Considerando essas informações, adotou-se para o sistema a inclinação de 15° N, que foi a mais próxima da mínima e com dados de irradiância disponíveis no site do CRESESB para a cidade de Pombal-PB.

Na Tabela 6 são apresentadas as médias mensais de radiação solar na cidade de Pombal-PB, a uma inclinação de 15° N.

Tabela 6 – Radiação solar diária média mensal (kWh/m²·dia) da cidade de Pombal-PB.

Mês	Irradiação
Janeiro	5,52
Fevereiro	5,75
Março	6,15
Abril	6,12
Maio	5,81
Junho	5,51
Julho	5,73
Agosto	6,34
Setembro	6,58
Outubro	6,34
Novembro	6,11
Dezembro	5,62
Média anual	5,97

Fonte: CRESESB (2022).

Como pode ser observado, o valor médio anual é de 5,97 kWh/m²·dia, sendo setembro o mês com maior radiação média (6,58 kWh/m²·dia) e junho o mês com menor radiação média (5,51 kWh/m²·dia). Seguindo a recomendação de Furtado (2020) e prezando pela eficiência e segurança, adotou-se, para o dimensionamento do sistema, a média do pior mês, ou seja, de junho.

4.2. Verificação do sistema de recalque

Na Tabela 7 estão presentes os resultados dos cálculos necessários para a definição da altura manométrica.

Tabela 7 – Resultados dos cálculos da altura manométrica.

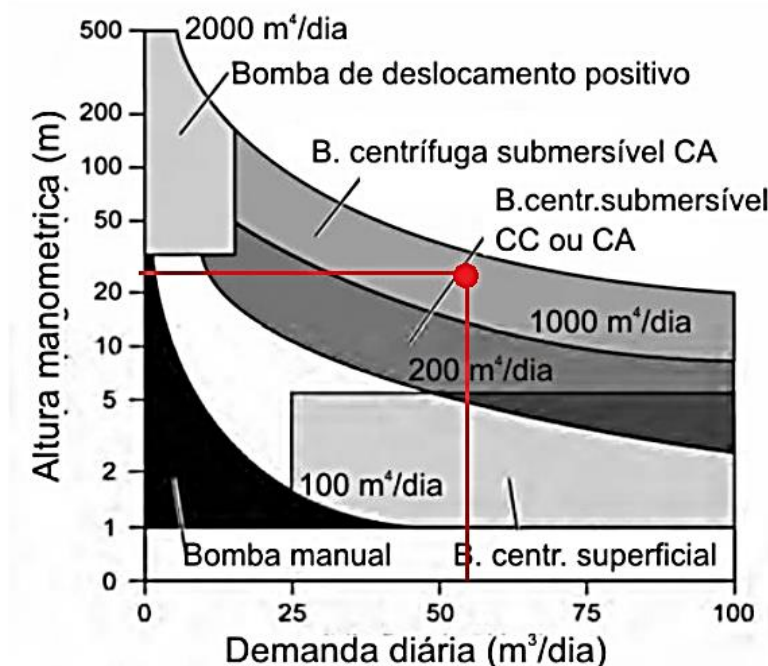
Parâmetro	Resultado
Velocidade média de escoamento (m/s)	1,326
Número de Reynolds	53051,65
Fator de atrito	0,020
Perda de carga distribuída (m)	9,00
Perda de carga localizada (m)	1,44
Altura manométrica (m)	27,95

Fonte: Autor (2023).

Como pode ser observado na Tabela 7, a altura manométrica do sistema é de 27,95 m. Cruzando o dado calculado da altura manométrica e a vazão requerida do

sistema (53,51 m³/dia) chega-se ao tipo de bomba mais indicado para o sistema fotovoltaico, como indicado na Figura 14.

Figura 14 – Modelo de motobomba mais indicado para o projeto.



Fonte: Adaptado de Morales (2011).

De acordo com a Figura 14, um modelo de bomba ideal para as características do projeto é a bomba submersível. O modelo BRAVA E30, da Schneider, utilizado atualmente na propriedade para a irrigação, se enquadra nessa categoria. Além disso, esse modelo suporta a altura monométrica e a vazão de projeto, podendo, portanto, ser reutilizado para compor o sistema proposto nesse estudo.

4.3. Dimensionamento do sistema fotovoltaico

4.3.1. Número de painéis fotovoltaicos

O primeiro passo do dimensionamento do sistema fotovoltaico foi a definição da quantidade de módulos necessários para suprir a demanda do sistema. Para realizar essa quantificação foi determinada a potência requerida pelo gerador. Na Tabela 8 são apresentados os resultados dos cálculos da potência.

Tabela 8 – Resultados do cálculo da potência requerida do gerador fotovoltaico.

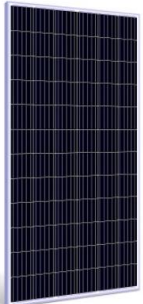
Parâmetros de projeto	Resultados
Energia hidráulica diária (Wh/dia)	4074,84
Energia elétrica diária (Wh/dia)	12634,17
Potência do gerador fotovoltaico (Wp)	2866,19

Fonte: Autor (2023).

Como pode ser observado, a potência mínima que o gerador fotovoltaico deve fornecer é de 2866,19 Wp.

A partir de pesquisas em sites de venda de painéis fotovoltaicos, levando em consideração o custo e as suas especificações, selecionou-se o modelo de painel solar descrito na Tabela 9.

Tabela 9 – Dados do modelo de painel fotovoltaico selecionado.

Descrição	Dados	Imagem
Marca	OSDA	
Modelo	ODA280-30-P	
Potência do painel (Wp)	280	
Tensão de máxima potência (V)	31,94	
Corrente de máxima potência (A)	8,77	
Tensão em aberto (V)	38,33	
Corrente de curto circuito (A)	9,41	
Tensão máxima do sistema (V)	1000	
Eficiência (%)	17,21	
Dimensões (mm)	1650 x 992 x 35	


Fonte: NeoSolar (2022).

O modelo selecionado possui uma potência de 280 Wp, ou seja, um único painel consegue gerar apenas 280 Wp de potência. No entanto, o sistema requer uma potência mínima de 2866,19 Wp, logo, para suprir essa necessidade, levando em consideração uma vida útil de 25 anos, farão necessário 13 painéis fotovoltaicos do modelo ODA280-30-P, que garantem uma potência total do gerador de 3640 Wp, equivalente a uma geração diária de energia elétrica de 16,05 kWh/dia e anual de 5856,47 kWh/ano.

4.3.2. Seleção do inversor e definição do arranjo dos painéis

A potência total do gerador fotovoltaico é de 3640 Wp, com base nesse dado, foram feitas pesquisas em sites de vendas de inversores para sistemas fotovoltaicos e selecionou-se um modelo com potência nominal próxima à potência do gerador. Na Tabela 10 encontram-se as especificações do modelo selecionado.

Tabela 10 – Dados do modelo de inversor selecionado.

Descrição	Dados	Imagem
Marca	Growatt	
Modelo	SPH3000	
Potência nominal de saída (W)	3000	
Tensão mínima (V)	150	
Tensão máxima (V)	550	
Corrente máxima de saída (A)	14,3	
Frequência (Hz)	50/60	
Eficiência (%)	97,5	
Temperatura operacional (°C)	-25 a +60	

Fonte: Growatt (2022).

O modelo selecionado apresenta um FDI de 0,82 e encontra-se dentro da faixa recomendada pelos fabricantes, que é de 0,75 a 1,05, sendo, portanto, adequado para o projeto.

Usando os dados de tensões mínima e máxima do inversor (Tabela 10) e, a tensão de máxima potência do painel e tensão em aberto do painel (Tabela 9), definiu-se o número máximo e mínimo de painéis em série do sistema.

Tabela 11 – Número mínimo e máximo de painéis em série.

Número de painéis	Resultado
Número mínimo	5
Número máximo	14

Fonte: Autor (2023).


Conforme mencionado anteriormente, o sistema será composto por 13 painéis. Como o número de painéis encontra-se entre o mínimo e o máximo, conclui-se que elas podem ser instalados em série, compondo uma única fileira de 13 painéis.

4.3.3. Dimensionamento das baterias

Para dimensionar o arranjo necessário de baterias para o funcionamento do sistema fotovoltaico, o primeiro dado determinado foi a capacidade do sistema de acumulação em Ah, cujo valor obtido foi 2632,13 Ah.

A determinação da quantidade de baterias em paralelo depende da capacidade do sistema de acumulação e da capacidade da bateria utilizada. Dessa forma, selecionou-se um modelo competitivo de mercado, com melhor custo benefício, considerando a capacidade e valor de aquisição. Na Tabela 12 encontram-se os dados do modelo de bateria selecionado.

Tabela 12 – Dados do modelo de bateria selecionado.

Descrição	Dados	Imagem
Marca	Freedom	
Modelo	DF4100	
Tensão nominal (V)	12	
Capacidade C20 (Ah)	240	
Tipo	Chumbo-ácido	
Peso (kg)	60,3	

Fonte: Atacadão das Baterias (2022).

Como pode ser observado, a bateria selecionada possui uma capacidade C20 de 240 Ah. Dessa forma, para suprir a demanda do sistema, serão utilizadas 11 baterias.

4.3.4. Dimensionamento do cabeamento

Utilizando a Equação (21), obteve-se uma seção de 2 mm² para a S1 (das placas ao inversor), porém, o fabricante dos painéis solares recomenda que seja usado um diâmetro mínimo de 4 mm². Dessa forma, das placas até o inversor, serão utilizados 260 m (13 painéis com 20 m cada) de cabos com seção de 4 mm².

Para a S2 (do inversor até o motor), obteve-se uma sessão de 25 mm². Como essa parte do sistema trata-se de corrente alternada, é necessário atender aos requisitos da NBR 5410 (ABNT, 2004).

Considerando a linha elétrica do sistema como do tipo E (cabo multipolar suspenso por cabo de suporte, incorporado ou não), e utilizando a Tabela 38 da NBR

5410 (capacidades de condução de corrente, em amperes, para os métodos de referência E, F e G), definiu-se que para um condutor com seção de 25 mm² a corrente máxima permitida é de 119 A. Como a corrente máxima do inversor é de apenas 14,3 A, inferior ao limite determinado pela Norma, então pode ser utilizado cabo de 25 mm².

4.4. Análise da viabilidade econômico-financeira do projeto

4.4.1. Orçamento

Na Tabela 13 encontra-se o valor de cada componente e o valor total do sistema fotovoltaico a ser implantado, que foi de R\$ 31.182,02.

Tabela 13 – Orçamento do sistema fotovoltaico.

Item	Preço unitário	Quantidade	Preço total
Painel Solar Fotovoltaico 280W - OSDA - ODA280-30-P	R\$ 659,00	13	R\$ 8.567,00
Frete dos painéis	R\$ 102,61	1	R\$ 102,61
Inversor grid tie GROWATT 3KW monofásico 220V	R\$ 4.099,00	1	R\$ 4.099,00
Frete do inversor	R\$ 145,05	1	R\$ 145,05
Bateria Estacionária Freedom DF4100 (240Ah)	R\$ 1.126,90	11	RS 12.395,90
Frete das baterias	R\$ 270,27	1	R\$ 270,27
Kit estrutura suporte 04 placas painel solar viga madeira	R\$ 490,73	3	R\$ 1.472,19
Cabo flexível 4 mm ² (por metro)	R\$ 3,00	260	R\$ 780,00
Cabo flexível 25 mm ² (por metro)	R\$ 17,00	50	R\$ 850,00
Mão de obra	R\$ 2.500,00	1	R\$ 2.500,00
Total			R\$ 31.182,02

Fonte: Autor (2023).

4.4.2. Custos de manutenção

É importante levar em consideração que este sistema necessita de manutenções periódicas, seja para limpeza dos painéis fotovoltaicos ou eventual substituição de algum componente. Considerando que no primeiro ano 1% do valor total da implantação será utilizado em manutenção, obteve-se um custo inicial com manutenção de R\$ 311,82. Esse valor continua a ser aplicado ao longo dos anos considerando a taxa de redução, calculada por meio da Equação (22). Os valores

estimados para manutenção ao longo dos anos podem ser observados na Tabela (14), na coluna de custos.

É importante ressaltar que após 10 anos de uso considerou-se a troca das baterias e do inversor, pois segundo Miranda, Leandro e Silva (2019), esses equipamentos têm em média uma vida útil de 10 e 15 anos, respectivamente.

4.4.3. Retorno do investimento

A Tabela 14 apresenta a análise do retorno do investimento ao longo de uma vida útil de 25 anos.

Tabela 14 – Retorno do investimento.

Ano	Geração (kWh)	Tarifa (R\$/kWh)	Economia	Custos	Fluxo de caixa acumulado
Implantação	-	-	-	-R\$ 31.182,02	-R\$ 31.182,02
1	5856,47	0,79	R\$ 4.626,61	-R\$ 311,82	-R\$ 26.867,23
2	5827,19	0,87	R\$ 5.063,83	-R\$ 282,83	-R\$ 22.086,23
3	5798,05	0,96	R\$ 5.542,36	-R\$ 269,36	-R\$ 16.813,24
4	5769,06	1,05	R\$ 6.066,11	-R\$ 256,54	-R\$ 11.003,67
5	5740,21	1,16	R\$ 6.639,36	-R\$ 244,32	-R\$ 4.608,63
6*	5711,51	1,27	R\$ 7.266,78	-R\$ 232,69	R\$ 2.425,46
7	5682,96	1,40	R\$ 7.953,49	-R\$ 221,60	R\$ 10.157,34
8	5654,54	1,54	R\$ 8.705,09	-R\$ 211,05	R\$ 18.651,38
9	5626,27	1,69	R\$ 9.527,72	-R\$ 201,00	R\$ 27.978,10
10	5598,14	1,86	R\$ 10.428,09	-R\$ 191,43	R\$ 38.214,76
11**	5570,15	2,05	R\$ 11.413,55	-R\$ 17.092,53	R\$ 32.535,77
12	5542,30	2,25	R\$ 12.492,13	-R\$ 173,63	R\$ 44.854,26
13	5514,58	2,48	R\$ 13.672,63	-R\$ 165,36	R\$ 58.361,53
14	5487,01	2,73	R\$ 14.964,70	-R\$ 157,49	R\$ 73.168,74
15	5459,58	3,00	R\$ 16.378,86	-R\$ 149,99	R\$ 89.397,60
16	5432,28	3,30	R\$ 17.926,66	-R\$ 142,85	R\$ 107.181,42
17	5405,12	3,63	R\$ 19.620,73	-R\$ 136,05	R\$ 126.666,10
18	5378,09	3,99	R\$ 21.474,89	-R\$ 129,57	R\$ 148.011,42
19	5351,20	4,39	R\$ 23.504,27	-R\$ 123,40	R\$ 171.392,29
20	5324,45	4,83	R\$ 25.725,42	-R\$ 117,52	R\$ 197.000,19
21**	5297,82	5,31	R\$ 28.156,47	-R\$ 17.022,15	R\$ 208.134,52
22	5271,33	5,85	R\$ 30.817,26	-R\$ 106,60	R\$ 238.845,18
23	5244,98	6,43	R\$ 33.729,49	-R\$ 101,52	R\$ 272.473,15
24	5218,75	7,07	R\$ 36.916,93	-R\$ 96,69	R\$ 309.293,39
25	5192,66	7,78	R\$ 40.405,58	-R\$ 92,08	R\$ 349.606,89

Fonte: Autor (2023).

*Ano em que ocorre o payback.

**Anos em que ocorre a troca de baterias e inversor.

Considerando uma capacidade de geração anual inicial de 5856,47 kWh e uma tarifa média de 0,79 R\$/kWh, é possível uma economia de R\$ 4.626,61 no primeiro ano de funcionamento do sistema fotovoltaico.

Observa-se na Tabela 14 que o *payback* simples ocorrerá no sexto ano após a implantação, ou seja, serão necessários seis anos para recuperar o investimento inicial do projeto proposto. Um excelente resultado, correspondendo a apenas 24% da vida útil do projeto.

No final do vigésimo quinto ano o fluxo de caixa acumulado será de R\$ 349.606,89. Portanto, além do projeto pagar o investimento inicial, irá proporcionar um ganho de quase R\$ 350 mil.

4.5. Carbono evitado

Ao longo de 25 anos de vida útil, há uma geração de energia de 137954,69 kWh, com isso, estima-se que seja evitada a emissão de aproximadamente 50891,49 kg de CO₂.

De acordo com Manfrinato, Vidal e Brancalion (2016), uma árvore da Mata Atlântica sequestra em média 4,3 kg de CO₂ por ano, que corresponde a um total de 107,5 kg ao longo de 25 anos. Dessa forma, a quantidade de CO₂ evitado pela implantação desse projeto equivale a 473 árvores plantadas.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O dimensionamento do sistema de bombeamento fotovoltaico destinado à irrigação foi realizado satisfatoriamente, seguindo parâmetros e metodologias disponíveis na literatura.

Verificou-se que a área de estudo apresenta condições favoráveis a esse tipo de sistema, pois possui características climáticas ideais quando se trata de energia solar, com boa radiação ao longo de todo o ano.

O sistema de recalque utilizado na propriedade rural satisfaz às necessidades exigidas para o adequado bombeamento da água. Além disso, o sistema proposto apresentou um bom retorno financeiro, com um tempo de *payback* estimado em 6 anos, que corresponde a apenas 24% da vida útil, que é de 25 anos. A implantação do projeto garante a redução de gastos com energia elétrica, gerando uma economia de quase R\$ 350 mil ao longo de 25 anos, e também benefícios ambientais, capaz de evitar o lançamento de mais de 50 mil kg de CO₂ na atmosfera.

O sistema dimensionado neste estudo é do tipo of-grid, com baterias. No entanto, caso houvesse um reservatório com capacidade de armazenar a vazão diária requerida, poderia ser usado um sistema on-grid. Sendo assim, sugere-se, para trabalhos futuros, a elaboração do projeto estrutural do reservatório e do sistema fotovoltaico on-grid, de modo a verificar qual dos dois sistemas possuem o melhor custo benefício.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **ABNT NBR 5410**: instalações elétricas de baixa tensão. Rio de Janeiro: ABNT, 209 p., 2004.

ALONSO, M. C.; GARCÍA, F. S.; SILVA, J. P. **Energia Solar Fotovoltaica**. Programa de capacitação em energias renováveis, ONUDI (Observatório de Energias Renováveis para América Latina e Caribe). 2013.

ANDRADE, M. G. **Efeito de um sistema de bombeamento de água fotovoltaico na operação de um micro aspersor**. 2013. 97 f. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) - Universidade Estadual de Oeste de Paraná, Cascavel, 2013.

ARAÚJO, R. V. M. **Dimensionamento de sistema fotovoltaico conectado à rede aplicado a uma fábrica de polpas de fruta**. 2016. 92 f. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

AZAMBUJA, A. V. R. **Estudo e projeto de um sistema fotovoltaico para a casa do estudante UFGD**. 2022. 52 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Energia) – Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, 2022.

BAPTISTA, M.; LARA, M. **Fundamentos de Engenharia Hidráulica**. 3. ed. 2. impressão. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014.

CARTAXO, B. M. C. **Uso de sistemas fotovoltaicos de bombeamento para irrigação na zona rural**. 2016. 60 f. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande – PB, 2016.

CICLOVIVO. **Bombeamento solar fotovoltaico: entenda o que é e como funciona**. 2022. Disponível em: <www.ciclovivo.com.br>. Acesso em: 02 jan. 2023.

CRESESB (Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito). **Potencial Solar - SunData v 3.0**. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata>>. Acesso em: 22 Out. 2022.

CRESESB (Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito). **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. CEPEL – CRESESB, Rio de Janeiro, 2014.

CRS ENERGIA SOLAR. **Sistema fotovoltaico híbrido**. 2014. Disponível em: <www.energiasolar.com.br>. Acesso em: 15 dez. 2022.

EFFICIENTIA, F. **Eficiência Energética em Sistemas de Bombeamento**. [S.l.]: Eletrobrás, 2005.

FERNANDES, R. O. **Estações Elevatórias de Água**. 2017. Disponível em: <<http://wiki.urca.br/dcc/lib/exe/fetch.php?media=estacao-elevatoria-agua.pdf>>. Acesso em: 6 set. 2022.

FRAIDENRAICH, N.; VILELA, O. C. Avanços em sistemas de abastecimento de água com bombeamento fotovoltaico para comunidades rurais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 4, n. 3, p. 69-81, 1999.

FREDRIZZI, M. C. **Fornecimento de água com sistemas de bombeamento fotovoltaicos**: dimensionamento simplificado e análise de competitividade para sistemas de pequeno porte. Dissertação (Mestrado em Energia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

FURTADO, J. P. S. **Dimensionamento e otimização de um sistema de bombeamento fotovoltaico para irrigação: Ilha de Santiago, Santa Cruz**. 2020. 135 f. Dissertação (Mestrado em Energia Renovável e Eficiência Energética) – Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, 2020.

GOMES, H. O. **Sistemas de Bombeamento: Eficiência Energética**. [S.l.]: Editorial universitária - UFPB, 2009.

IBGE. **Estatísticas do cadastro central de empresas 2014**. 2016.. Disponível em: <<http://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv97205.pdf>>. Acesso em: 17 dez. 2022.

JIMÉNEZ, J. P. V. **Projeto e dimensionamento de um sistema fotovoltaico isolado/conectado à rede para atender a demanda de irrigação de uva**. 2017. 154 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Energia) – Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2017.

LEITE, D. V. **Análise do potencial do uso da energia solar em sistemas de bombeamento para irrigação no perímetro irrigado Piauí no município de Lagarto - SE**. 2016. 121 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2016.

LI, Li et al. Expanding the role of reactive transport models in critical zone processes. **Earth-science reviews**, v. 165, p. 280-301, 2017.

LOPEZ, R. A. **Qualidade na energia elétrica - Efeitos dos distúrbios, diagnósticos e soluções**. 2. ed. São Paulo: Artliber Editora, 2013.

MANFRINATO, W.; VIDAL, E.; BRANCALION, P. **Como compensar suas emissões no transporte do dia a dia**. LASTROP – Laboratório de Silvicultura Tropical. 2016. Disponível em: <<https://esalqlastrop.com.br/capa.asp?pi=principal>>. Acesso em: 18 dez. 2022.

MCTI (Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações). **Fatores de emissão de CO2 pela geração de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional do Brasil - Ano Base 2022**. 2022. Disponível em: <<https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/dados-e-ferramentas/fatores-de-emissao>>. Acesso em: 18 dez. 2022.

MIRANDA, R. T.; LEANDRO, F. S.; SILVA, T. C. Gestão do fim de vida de módulos fotovoltaicos. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 8, n. 1, p. 364-383, 2019.

MORALES, L. R. V. **A utilização de sistemas fotovoltaicos de bombeamento para irrigação em pequenas propriedades rurais**. 2011. 170 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade de São Paulo, São Paulo – SP, 2011.

NOGUEIRA, C. U. **Utilização de sistemas solar e eólico no bombeamento de água para uso na irrigação**. 2009. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.

OLIVEIRA, L. H. **Dimensionamento de um sistema fotovoltaico residencial conectado à rede de energia elétrica**. 2018. 63 f. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.

PANIAGO, A. A. R. **Modelagem de sistemas de bombeamento fotovoltaico em corrente alternada para irrigação**. 2022. 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde, Goiás, 2022.

PILHARES, J. C. P. **Consumo de água na produção animal**. Comunicado Técnico 102. São Carlos/SP: Embrapa Pecuária Sudeste, 2013.

PORTAL ENERGIA. **Energia Fotovoltaica: manual sobre tecnologia, projeto e instalação**. 2004. Disponível em: <www.portal-energia.com>. Acesso em: 12 dez. 2022.

PORTO, R. M. **Hidráulica Básica**. 4. ed. São Carlos: EESC-USP, 2006.

REN21. **Energias renováveis 2016: relatório da situação mundial**. *Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, 2016*. Disponível em: <www.ren21.net>. Acesso em: 20 nov. 2022.

RODRIGUES, B. H. N.; ANDRADE, A. C.; MAGALHÃES, J. A.; BASTOS, E. A.; SANTOS, F. J. S. **Evapotranspiração e coeficiente de cultura do Capim-Tanzânia**. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2011.

SCALOPPI, E. J. **Irrigação de baixo custo em sistema de pastejo rotacionado**. 1. ed. São Paulo: Cultura Acadêmica, 2014.

SCHNEIDER MOTOBOMBAS. **Tabela de seleção de bombas e motobombas**. 2019.

SOLARPOWER EUROPE. **Global market outlook for solar power 2022-2026**. 2022. Disponível em: <<https://www.solarpowereurope.org/>>. Acesso em: 12 dez. 2022.

SOLAR BRASIL. **O que é energia solar fotovoltaica?** 2022. Disponível em: <www.solarbrasil.com.br>. Acesso em: 15 dez. 2022.

SONTAKE, V C; KALAMKAR, V R. Solar photovoltaic water pumping system - A comprehensive review. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, v. 59, p.1038-1067, 2016.

TAMBO, F. L. R. **Dimensionamento de sistemas de irrigação por gotejamento energizado por sistemas fotovoltaicos em regiões moçambicanas desprovidas de energia elétrica**. 2019. 73 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2019.

WWAP. **The United Nations World Water Development Report 2016**. 2016. Disponível em: <<http://unesdoc.unesco.org/images/0024/002439/243938e.pdf>>. Acesso em: 17 dez. 2022

ANEXOS

Anexo A – Valores aproximados do coeficiente de perda de carga localizada K.

Peça	K
Amplificador gradual	0,3
Bocais	2,75
Comporta aberta	1
Controlador de vazão	2,5
Cotovelo 90°	0,9
Cotovelo 45°	0,4
Crivo	0,75
Curva 90°	0,4
Curva 45°	0,2
Curva 22,5°	0,1
Entrada normal em canalização	0,5
Entrada de borda	1
Existência de pequena derivação	0,3
Junção	0,4
Medidor Venturi	2,5
Redução gradual	0,15
Saída de canalização	1
Tê, passagem direta	0,6
Tê, saída de lado	1,3
Tê, saída bilateral	1,8
Válvula de ângulo aberta	5
Válvula de gaveta aberta	0,2
Válvula de borboleta aberta	0,3
Válvula de pé	1,75
Válvula de retenção	2,5
Válvula de globo aberta	10

Fonte: Baptista e Lara (2014).

Anexo B – Valores de eficiência de diferentes tipos de bombas para sistemas fotovoltaicos.

Altura (m)	Tipo de bomba	Eficiência
5	Centrífuga de superfície	0,25
20	Centrífuga de superfície	0,15
20	Submersível	0,25
100	Submersível ou deslocamento positivo	0,35
>100	Deslocamento positivo	0,45

Fonte: CRESESB (2014).