

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
DE MINAS GERAIS - *CAMPUS* AVANÇADO ARCOS  
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Rafael Moreira Soares

**DIMENSIONAMENTO DE BOMBA PARA IRRIGAÇÃO  
UTILIZANDO UM SISTEMA FOTOVOLTAICO**

Arcos

22 de dezembro de 2023

RAFAEL MOREIRA SOARES

**DIMENSIONAMENTO DE BOMBA PARA IRRIGAÇÃO UTILIZANDO  
UM SISTEMA FOTOVOLTAICO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Bacharelado em Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Minas Gerais *Campus* Arcos, como requisito parcial à obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.  
Orientador: Prof.Dr.Ricardo Carrasco Carpio.

Arcos  
22 de dezembro de 2023

---

**Catálogo na Fonte Biblioteca IFMG - Campus Avançado Arcos**

S676d Soares, Rafael Moreira.

Dimensionamento de bomba para irrigação utilizando um sistema fotovoltaico / Rafael Moreira Soares. - Arcos, 2023.

60 p. : il. color.

Orientador: Ricardo Carrasco Carpio.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica.) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais - *Campus Avançado Arcos*.

1. Energia solar. 2. Energia fotovoltaica. 3. Irrigação. I. Carpio, Ricardo Carrasco (orientador). II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais - *Campus Avançado Arcos*. III. Título

CDD 621.47

---

**Catálogo: Meriely Ferreira de Almeida - CRB-6/2760**



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO**  
**SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA**  
**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS GERAIS**

**Campus Avançado Arcos**  
**Diretoria de Ensino**  
**Docentes Área Técnica**  
Av. Juscelino Kubitschek, 485 - Bairro Brasília - CEP 35588000 - Arcos - MG  
3733515173 - www.ifmg.edu.br

**Ata de Defesa de Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Bacharelado em Engenharia Mecânica do IFMG – Campus Arcos, realizada em 15 de dezembro de 2023.**

Aos quinze dias do mês de dezembro de dois mil e vinte e três, às treze horas e trinta minutos, se reuniu presencialmente a banca composta pelo Professor Dr. Ricardo Carrasco Carpio (orientador), Instituto Federal de Minas Gerais – Campus Avançado Arcos; Prof. Dr. Reginaldo Gonçalves Leão Júnior, Instituto Federal de Minas Gerais – Campus Avançado Arcos e o Prof. Dr. Marcos Paulo Gonçalves Pedroso; Instituto Federal de Minas Gerais – Campus Avançado Arcos, para avaliar o trabalho intitulado **"DIMENSIONAMENTO DE BOMBA PARA IRRIGAÇÃO UTILIZANDO UM SISTEMA FOTOVOLTAICO"**, apresentado pelo aluno Rafael Moreira Soares, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Engenheiro Mecânico. Após apresentação e arguição, emitiu-se o parecer **"APROVADO"**, sendo a verificação das modificações sugeridas de responsabilidade do orientador. Para fins de registro, a banca avaliadora emite, em consenso, o conceito final 79. Nada mais havendo a tratar a defesa foi encerrada às quinze horas, onde eu, Ricardo Carrasco Carpio, lavrei a presente ata que, após lida e aprovada, foi assinada por todos os avaliadores.

Arcos, 15 de dezembro de 2023.



Documento assinado eletronicamente por **Ricardo Carrasco Carpio, Professor**, em 15/12/2023, às 15:03, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Marcos Paulo Gonçalves Pedroso, Professor**, em 15/12/2023, às 15:07, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Reginaldo Gonçalves Leão Junior, Professor**, em 15/12/2023, às 16:38, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



A autenticidade do documento pode ser conferida no site <https://sei.ifmg.edu.br/consultadoocs> informando o código verificador **1774594** e o código CRC **A663826C**.

23808.000988/2023-11

1774594v1

*Dedico este trabalho primeiramente a Deus, que me proporcionou toda a fé e força de vontade para seguir em frente, aos meus pais Edmar e Carlinda pelo incentivo incondicional, meus irmãos Ricardo e Rodolfo pelo apoio em seguir até o final e minha avó Arlinda e meus amigos, que sempre me motivaram a ir o mais longe que posso.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, por me permitir obter sucesso nesta etapa de minha vida. Meus pais e irmãos, pois, mesmo durante as dificuldades, se privaram de seus luxos para que eu pudesse continuar. Minha avó e amigos, por dedicarem tempo, paciência e depositarem toda a fé em mim, para que eu pudesse chegar onde estou. Também a meus colegas de curso, pelo apoio, companheirismo e consolo nas horas difíceis.

*Não creio que haja uma emoção mais intensa para um inventor do que ver suas criações funcionando. Essas emoções fazem você esquecer de comer, de dormir, de tudo.*

**Nikola Tesla**

## RESUMO

O presente trabalho realiza o dimensionamento de uma bomba hidráulica, para um sistema de recalque em propriedades rurais alimentada por energia fotovoltaica. O dimensionamento inicia a partir da determinação da área a ser irrigada e o volume de água necessário para sua umidificação ideal. Assim, prossegue-se para o projeto dos condutos hidráulicos, calculando o diâmetro da tubulação e a altura de elevação a ser vencida pela bomba. A partir destes dados, realiza-se a escolha do produto que obtém melhor desempenho para realizar a operação e por fim, calcula-se o tamanho ideal do painel fotovoltaico para fornecer energia elétrica à bomba hidráulica. Para realizar este dimensionamento, foi construído um programa na linguagem de programação *Python*, utilizando a ferramenta *Jupyter Notebook*. Este programa pode ser utilizado para dimensionar tanto os modelos de bombas centrífugas quanto os modelos e bombas submersas, nas quais, ambas com classificação de deslocamento não positivo. Após a construção do programa, foi utilizado para estudo de caso o dimensionamento da bomba hidráulica para uma propriedade pertencente ao município de Divinópolis MG. Na qual, foi possível obter os dados para calcular os condutos, determinar a bomba a ser utilizada e a quantidade de módulos necessários para fornecer energia elétrica à bomba.

**Palavras-chave:** Dimensionamento de bomba, energia fotovoltaica, sistema de irrigação, energia solar

## ABSTRACT

The present work carries out the sizing of a hydraulic pump, for a settlement on rural properties powered by photovoltaic energy. Sizing begins by determining the area to be irrigated and the volume of water required for ideal humidification. Therefore, proceed to the design of the hydraulic conduits, calculating the circumference diameter and the service lifting height achieved by the pump. Based on this data, choose the product that provides the best performance to carry out the operation and finally, calculate the ideal size of the photovoltaic panel to supply electrical energy to the hydraulic pump. To carry out this sizing, a program was built in the *Python* programming language, using the *Jupyter Notebook* tool. This program can be used to size both centrifugal pump models and submersible pump models, both with non-positive positioning classification. After building the program, the sizing of the hydraulic pump for a property belonging to the municipality of Divinópolis MG was used as a case study. As such, it was possible to obtain the data to calculate the conductors, determine the pump to be used and the number of modules needed to supply electrical energy to the pump.

**Keywords:** Pump sizing, photovoltaic energy, irrigation system, solar energy

# LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Crescimento da produção de energia elétrica no Brasil entre 1970 e 2022.	16
Figura 2.1 – Exemplo de turbina Pelton.	20
Figura 2.2 – Exemplo de turbina Francis.	20
Figura 2.3 – Exemplo de turbina Kaplan.	21
Figura 2.4 – Exemplo de Roda d'água.	21
Figura 2.5 – Exemplo de carneiro hidráulico.	22
Figura 2.6 – Exemplo de bomba alternativa por pistão.	23
Figura 2.7 – Exemplo de bomba rotativa por engrenagem.	24
Figura 2.8 – Exemplo de bomba rotativa por pás.	24
Figura 2.9 – Exemplo de bomba rotativa por lobolo.	24
Figura 2.10 – Exemplo de bomba rotativa por parafuso.	25
Figura 2.11 – Exemplo de rotor fechado.	26
Figura 2.12 – Exemplo de rotor aberto.	26
Figura 2.13 – Curva característica genérica para bombas de deslocamento positivo.	28
Figura 2.14 – Curva característica genérica para bomba centrífuga e axial.	28
Figura 2.15 – Campo de aplicação segundo (HENN, 2006).	29
Figura 2.16 – Exemplo de sistema de irrigação por superfície.	31
Figura 2.17 – Exemplo de sistema de irrigação por aspersão pivô central.	32
Figura 2.18 – Exemplo de sistema de irrigação localizada por gotejamento.	32
Figura 2.19 – Exemplo de sistema de irrigação subsuperficiais.	33
Figura 2.20 – Exemplo do efeito fotovoltaico.	35
Figura 2.21 – Demonstração da formação das células, módulos e painéis.	36
Figura 2.22 – Corte lateral de um módulo fotovoltaico.	37
Figura 2.23 – Atuação das componentes irradiadas.	38
Figura 2.24 – Alternância de posição do sol de acordo com as estações.	39
Figura 3.1 – Fluxograma das atividades desenvolvidas.	40
Figura 3.2 – Representação do cálculo da altura manométrica.	45
Figura 4.1 – Ponto de operação da bomba SUB15-07NY4E6.	55
Figura A.1 – Disponibilidade de insolação local ( $HSP_{med}$ ).	72

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Crescimento da geração de energia solar fotovoltaica (GWh). . . . .	17
Tabela 3.1 – Faixa de eficiências de acordo com a categoria de cada bomba. . . . .	48
Tabela 3.2 – Tabela de entrada de dados. . . . .	50
Tabela 4.1 – Tabela de dados iniciais para estudo de caso. . . . .	51
Tabela 4.2 – Dados para área efetiva da horta. . . . .	52
Tabela 4.3 – Dados para o diâmetro hidráulico (m) e a velocidade econômica (m/s). . . . .	53
Tabela 4.4 – Dados coeficiente da perda de carga pelos acessórios (m). . . . .	53
Tabela 4.5 – Resultados para a perda de carga pelos acessórios (m). . . . .	54
Tabela 4.6 – Dados e resultados para o cálculo do painel fotovoltaico. . . . .	56
Tabela 4.7 – Dados e resultados para o cálculo do painel fotovoltaico. . . . .	56
Tabela 4.8 – Tabela de entrada para o dimensionamento na ferramenta <i>Jupyter Notebook</i> . . . . .	57
Tabela 4.9 – Dados de saída para o dimensionamento na ferramenta <i>Jupyter Notebook</i> . . . . .	57

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO . . . . .	16
1.1	Justificativa . . . . .	17
1.2	Objetivos . . . . .	18
1.2.1	<i>Objetivo Geral</i> . . . . .	18
1.2.2	<i>Objetivos específicos</i> . . . . .	18
2	REFERENCIAL TEÓRICO . . . . .	19
2.1	Bombas hidráulicas . . . . .	19
2.1.1	<i>Classificação de máquinas hidráulicas</i> . . . . .	19
2.1.2	<i>Máquinas mistas</i> . . . . .	22
2.1.3	<i>Classificação de bombas hidráulicas</i> . . . . .	22
2.1.4	<i>Bombas de deslocamento não-positivas</i> . . . . .	25
2.1.5	<i>Curvas características das bombas</i> . . . . .	27
2.1.6	<i>Categorias de motores elétricos</i> . . . . .	29
2.2	Sistemas de irrigação . . . . .	30
2.3	Energia solar fotovoltaica . . . . .	33
2.3.1	<i>Introdução à energia fotovoltaica</i> . . . . .	33
2.3.2	<i>Painéis fotovoltaicos</i> . . . . .	34
2.4	Irradiação . . . . .	37
2.4.1	<i>Radiação solar</i> . . . . .	37
2.4.2	<i>Ângulo de incidência</i> . . . . .	38
3	METODOLOGIA . . . . .	40
3.1	Avaliando a área do canteiro . . . . .	41

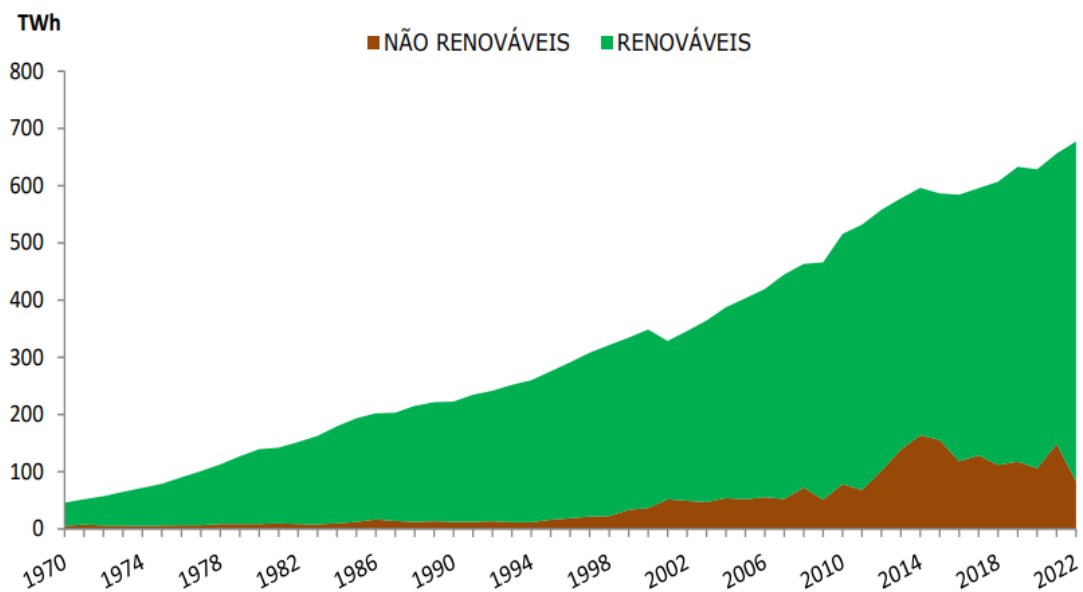
3.2	Dimensionamento da bomba . . . . .	42
3.2.1	<i>Determinação da vazão</i> . . . . .	42
3.2.2	<i>Determinação do diâmetro hidráulico</i> . . . . .	43
3.2.3	<i>Altura manométrica do sistema de bombeamento</i> . . . . .	44
3.3	Dimensionamento da bomba . . . . .	47
3.4	Definição do painel fotovoltaico . . . . .	49
3.5	Construção do programa no <i>software Python</i> . . . . .	50
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO . . . . .	51
4.1	Coleta de dados . . . . .	51
4.2	Cálculo da demanda de água . . . . .	51
4.3	Calculando a vazão . . . . .	52
4.4	Cálculo do diâmetro hidráulico e da velocidade . . . . .	52
4.5	Cálculo da altura manométrica . . . . .	53
4.5.1	<i>Cálculo da perda de carga</i> . . . . .	53
4.6	Escolha da bomba . . . . .	54
4.7	Cálculo dos módulos fotovoltaicos . . . . .	56
4.8	Resultados ferramenta <i>Jupyter Notebook</i> . . . . .	57
5	CONCLUSÃO . . . . .	59
5.1	Sugestões para trabalhos futuros . . . . .	60
	REFERÊNCIAS . . . . .	61
	APÊNDICE A – CÓDIGO DE DIMENSIONAMENTO DA BOMBA .	64
	ANEXO A – DADOS COMPLEMENTARES . . . . .	72
A.1	Valores para os condutos e propriedades da água . . . . .	72

ANEXO B – DADOS DA BOMBA . . . . .	74
------------------------------------	----

# 1 INTRODUÇÃO

A busca por fontes de geração de energia renováveis, tanto no Brasil quanto no mundo, vem aumentando a cada ano. Devido a preocupação com as condições climáticas do planeta, aliadas à extração em larga escala dos recursos naturais como madeira, petróleo e carvão mineral, utilizadas como combustível para geração de energia e trabalho, incentiva o estudo e avanço tecnológico nas áreas de geração de energia limpa e sustentável. Desta forma, fomenta-se realizar a substituição dos geradores de energia através da queima de combustíveis fósseis, madeira ou matéria orgânica nocivos ao meio ambiente por energias de origem renováveis (NASCIMENTO et al., 2012). De acordo com o Balanço Energético Nacional (EPE, 2023), o crescimento do uso de energias renováveis para a geração de energia elétrica é apresentado na figura 1.1.

**Figura 1.1 – Crescimento da produção de energia elétrica no Brasil entre 1970 e 2022.**



Fonte: (EPE, 2023)

No Brasil, a maior parcela da energia elétrica disponibilizada para uso advém das usinas hidrelétricas. Porém, no decorrer dos anos, vêm se mudando este panorama por meio de parques eólicos e fotovoltaicas para fornecer energia elétrica a localidades distantes de usinas hidrelétricas. Ocorreu-se também o crescimento da aplicação de energia fotovoltaica principalmente no âmbito de mini e micro geração, como pode ser observado na tabela 1.1 do (BEN 2022) (EPE, 2023).

**Tabela 1.1 – Crescimento da geração de energia solar fotovoltaica (GWh).**

Fluxo	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Geração total	4,8	16,1	58,9	85,3	831,8	3.461,4	6.654,6	10.748,3	16.752,3	30.126,5
Consumo total	4,8	16,1	58,9	85,3	831,8	3.461,4	6.654,6	10.748,3	16.752,3	30.126,5

Fonte: Adaptado de (EPE, 2023)

Atualmente, a geração de energia elétrica por meio de fontes hídricas no país está comprometida devido às alterações climáticas. Esta questão impacta tanto no sistema de fornecimento de energia quanto no abastecimento de água e alimentos. Pois, estes são recursos indispensáveis para a criação de rebanhos, desenvolvimento das lavouras e para o consumo humano. Além do fator abastecimento, também afetará o sistema financeiro com o aumento de custo de produção de alimentos, no tratamento da água e esgoto e aumento de taxas sobre a energia elétrica e água tratada distribuída (MEDEIROS, 2018).

Segundo (JIMÉNEZ, 2017), a necessidade de aumentar a eficiência da utilização dos recursos hídricos diante a redução da disponibilidade de água potável com o passar dos anos, se torna cada dia mais importante. Assim, com o dimensionamento correto dos sistemas de bombeamento para fornecimento de água para plantações, reduz a demanda de recursos hídricos para a atividade e concomitantemente a redução do consumo de energia elétrica.

## 1.1 Justificativa

A utilização da água para o sustento e crescimento de uma comunidade é de extrema importância. Considerando que, com a expansão das comunidades pode ocorrer a deficiência do abastecimento de água, a utilização de um sistema de transporte do recurso às localidades mais distantes torna-se indispensável. Isto, pode ser resolvido a partir da aplicação de sistemas de bombeamento de água.

Nas cidades, as concessionárias de distribuição de água e coleta de esgoto, executam o trabalho de transporte da água para as residências, empresas, indústrias e comércio. Entretanto, se tratando das comunidades rurais, muitas delas não recebem a água através das concessionárias, necessitando de buscar o recurso por meio de bombeamento da água advindas de cisternas, poços artesianos, rios e açudes.

Porém, ao se encaixar na categoria que não recebe água das concessionárias, as comunidades dependem diretamente do consumo de energia elétrica para alimentar os sistemas de bombeamento, principalmente os pequenos produtores de frutas e hortaliças.

Desta forma, o dimensionamento de uma bomba hidráulica capaz de bombear a

quantidade de água necessária para abastecer a residência, horta ou a lavoura, se torna indispensável. Com a aplicação de um sistema fotovoltaico para a alimentação da bomba, obtém-se maior aproveitamento dos recursos naturais presentes na região, contando com a redução de gastos com energia elétrica e melhorando o desenvolvimento sustentável.

Assim, o presente trabalho tratará do dimensionamento de uma bomba hidráulica para abastecer uma horta de pequeno porte, estudando os modelos de bomba e analisando o modelo que melhor se aplica ao caso. Em seguida, determinar o tamanho do painel solar fotovoltaico satisfatório para fornecer energia elétrica suficiente para a alimentação da bomba.

## **1.2 Objetivos**

### ***1.2.1 Objetivo Geral***

O objetivo geral do presente trabalho de conclusão de curso será o dimensionamento de uma bomba hidráulica aplicada em um sistema de irrigação, alimentada por um sistema de geração de energia fotovoltaica. Assim mesmo será realizado um estudo de caso na zona rural na cidade de Divinópolis, Minas Gerais, para validar o sistema.

### ***1.2.2 Objetivos específicos***

- Estudo dos modelos de bombas hidráulicas;
- Estudo do sistema fotovoltaico;
- Dimensionamento da bomba hidráulica;
- Dimensionamento do sistema fotovoltaico, para fornecimento de potência à bomba hidráulica;

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Bombas hidráulicas

O desenvolvimento da utilização da energia contida nos fluidos para facilitar as atividades do cotidiano, vem desde os povos egípcios e mesopotâmicos. Onde era utilizado os rios para mover moinhos e regar grandes plantações (HENN, 2006).

Apesar do grande precursor das bombas hidráulicas modernas poder ser atribuído ao cientista egípcio Heron de Alexandria, com invenções pertinentes para a transferência de fluido de um lugar ao outro, os protótipos que mais se assemelham às máquinas de fluxo atuais, foram concebidos a partir do século XIX. Quando houve maior profundidade dos estudos na área da termodinâmica e aerodinâmica, aumentando a eficiência dos equipamentos durante a operação (HENN, 2006).

Atualmente, as aplicações de máquinas de fluidos abrange diversas áreas. Podem ser citadas a distribuição de água, geração de energia, alimentação de motores, aeroespacial e bombeamento de combustível para motores à combustão interna (HENN, 2006).

#### 2.1.1 *Classificação de máquinas hidráulicas*

Segundo (GUEDES, 2018), equipamentos que são capazes de transformar energias, são denominados máquinas. Na qual, são capazes de receber energia de uma determinada natureza (energia elétrica, potencial e cinética), e transformar em outra forma de energia (na maioria dos casos em energia mecânica).

As máquinas hidráulicas podem ser classificadas em três grupos diferentes (SANTOS, 2007). Sendo elas:

- Máquinas Motrizes;
- Máquinas Mistas;
- Máquinas Geratrizes.

##### 2.1.1.1 Máquinas Motrizes

As máquinas motrizes atuam a partir da transformação de energia hidráulica através da correnteza dos rios, ou através da energia potencial das quedas de água em uma represa (SANTOS, 2007).

Dentro desta classificação, as máquinas são divididas em dois tipos. Sendo elas:

- Turbinas hidráulicas: a atuação da água ocorre por meio da energia cinética da água, assim acionando a rotação da turbina. Estas turbinas podem ser classificadas em turbinas de ação (Pelton), e turbinas de reação (Francis) e Kaplan, exemplificadas nas figuras 2.1, 2.2 e 2.3 (MACINTYRE, 1997).

**Figura 2.1 – Exemplo de turbina Pelton.**



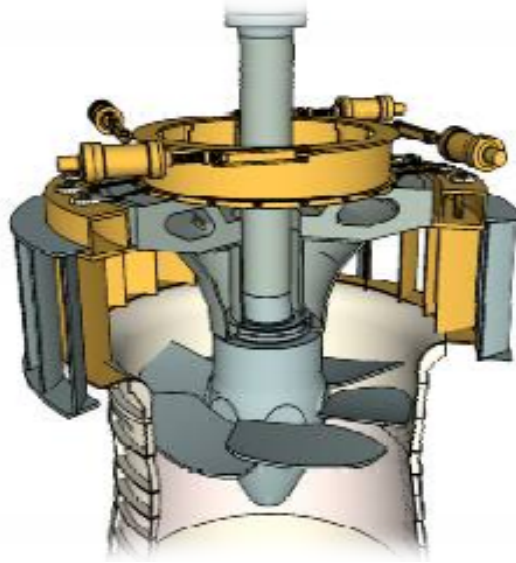
Fonte: (KRAULICH et al., )

**Figura 2.2 – Exemplo de turbina Francis.**



Fonte: (CERQUEIRA, 2018)

**Figura 2.3 – Exemplo de turbina Kaplan.**



Fonte: (SANTOS, 2013)

- Rodas hidráulicas: são atuadas a partir do peso ou pela velocidade da água. Na qual, a água é despejada nas cubas da roda, utilizando da força peso do fluido para girar a roda; e por meio da velocidade, é aproveitado o próprio fluxo do rio ou riacho para rotacionar a máquina, sendo exemplificada na figura 2.4 (MACINTYRE, 1997). Este modelo era muito utilizado em moendas de grãos e cana de açúcar.

**Figura 2.4 – Exemplo de Roda d'água.**

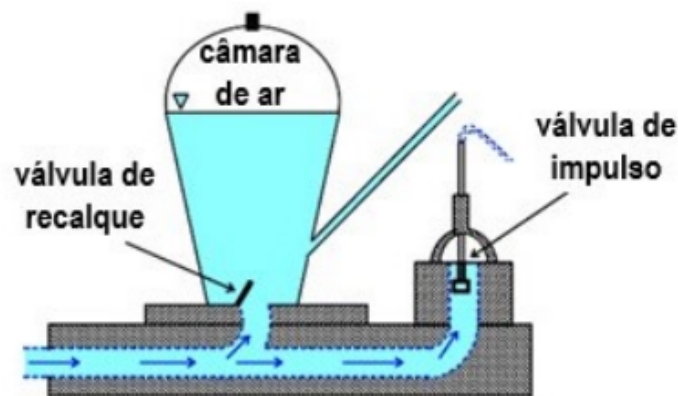


Fonte: (SOUZA, 2011)

### 2.1.2 Máquinas mistas

Esta categoria de máquinas de fluidos é caracterizada por utilizar da própria energia da água para realizar a transformação de energia, sendo o principal exemplo desta categoria é o carneiro hidráulico (NETTO et al., 1998).

Figura 2.5 – Exemplo de carneiro hidráulico.



Fonte: (DIAS, 2020)

#### 2.1.2.1 Máquinas geratrizes

Nesta categoria, se enquadra as máquinas que utilizam da energia mecânica de outro elemento para adicionar energia hidráulica no fluido. Desta forma, o deslocamento do líquido é realizado por escoamento, podendo ser por meio de pressão ou velocidade (MACINTYRE, 1997). Na próxima seção, será efetuado a classificação das máquinas geratrizes (bombas hidráulicas), descrevendo as principais características de cada elemento.

### 2.1.3 Classificação de bombas hidráulicas

As bombas hidráulicas são equipamentos utilizados para realizar a transposição de fluidos de um lugar para outro, entregando o recurso natural a locais não contemplados, como comunidades rurais ou localidades com escassez do recurso (ÇENGEL; CIMBALA, 2012). De acordo com (MACINTYRE, 1997), diversos outros autores associam outra nomenclatura para denominar as bombas hidráulicas, sendo chamadas de máquinas operatrizes hidráulicas. Isso se deve justamente por estes equipamentos deslocarem líquidos por meio de trabalho útil. As bombas hidráulicas também são utilizadas para realizar a movimentação de cargas em circuitos hidráulicos de elevação de carga. Assim, conforme a utilização e seu deslocamento, a principal classificação das bombas hidráulicas é por deslocamento positivo e deslocamento não positivo (SANTOS, 2007).

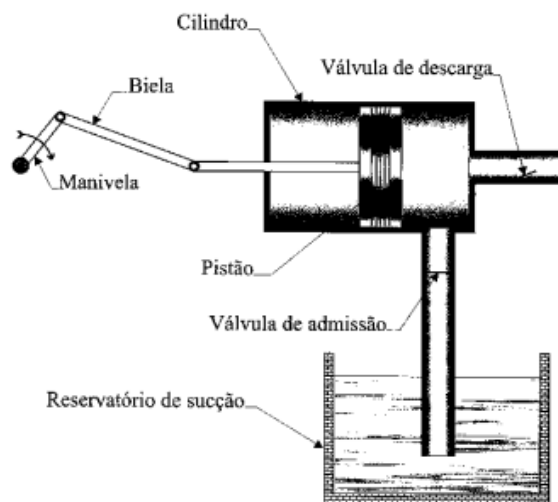
### 2.1.3.1 Bombas de deslocamento positivo

Esta categoria de bomba se denomina devido à direção de entrada e saída do fluido ser a mesma. Também possui a característica de seu mecanismo obter maior robustez, necessitando de maior potência elétrica para iniciar sua partida. Sua aplicação abrange a bombear fluidos com baixos volumes de vazão a grandes alturas manométricas (FLORES, 2019).

Segundo (HENN, 2006), dentro da classificação das bombas de deslocamento positivo, esta pode ser dividida entre dois tipos de acordo com sua forma de deslocamento. Na qual se deslocam de forma alternativa ou rotativa.

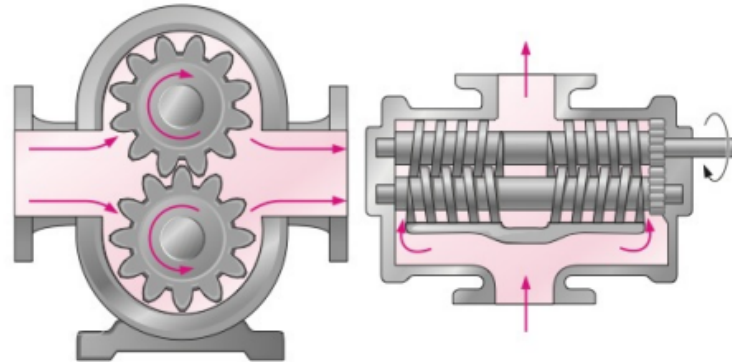
- Bombas de deslocamento positivo: possui seu deslocamento variável e sendo por meio de êmbolos, pistões ou diafragmas. Como mostra a figura 2.6 (HENN, 2006)
- Bombas Rotativas: estas são bombas com deslocamento constante, na qual, são representadas por bombas de engrenagens, palhetas, parafuso e rotores lobulares. Como mostra as figuras 2.7, 2.8, 2.10 e 2.9 (HENN, 2006).

Figura 2.6 – Exemplo de bomba alternativa por pistão.



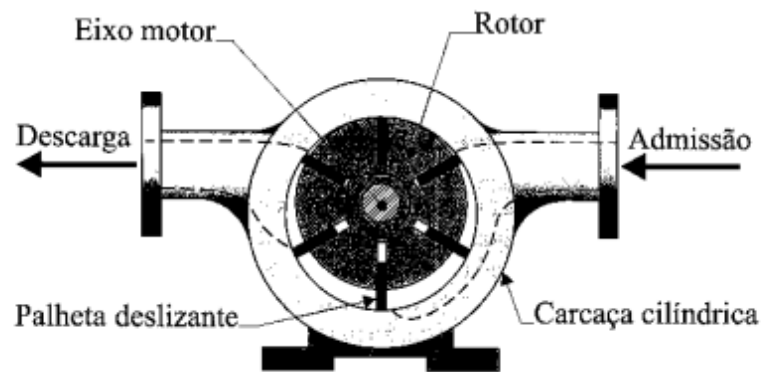
Fonte: (HENN, 2006)

Figura 2.7 – Exemplo de bomba rotativa por engrenagem.



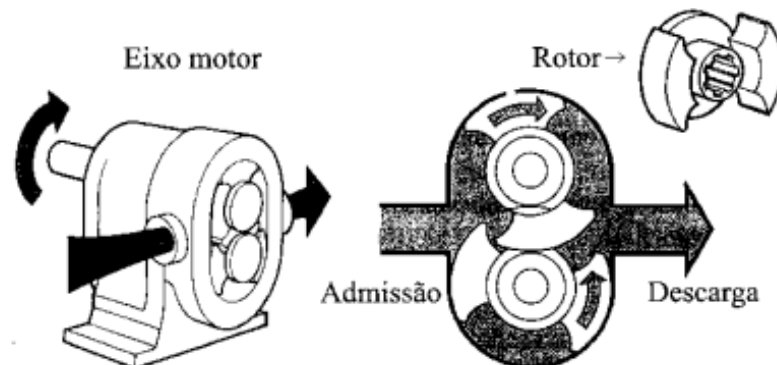
Fonte: (ÇENGEL; CIMBALA, 2012)

Figura 2.8 – Exemplo de bomba rotativa por pás.



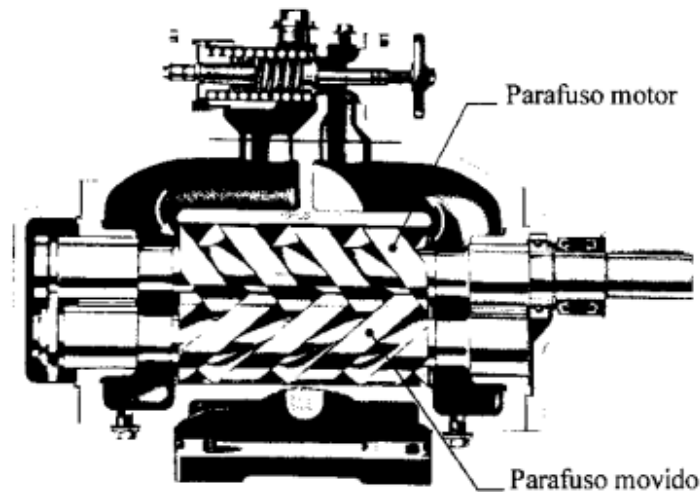
Fonte: (HENN, 2006)

Figura 2.9 – Exemplo de bomba rotativa por lobolo.



Fonte: (HENN, 2006)

Figura 2.10 – Exemplo de bomba rotativa por parafuso.



Fonte: (HENN, 2006)

#### 2.1.4 Bombas de deslocamento não-positivas

Esta categoria de bombas hidráulicas possui a característica principal de funcionar a partir da rotação do eixo do motor elétrico, que por sua vez, rotaciona um rotor de aletas. Por ser indicada para realizar a transposição de fluidos a baixa pressão e grandes volumes de fluidos, considerando a baixa potência elétrica necessária para acionar sua partida, esta obtém maiores aplicações na escolha de bombas hidráulicas (FLORES, 2019).

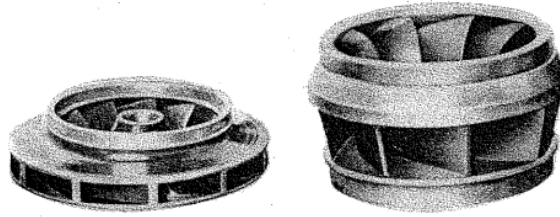
Segundo (MACINTYRE, 1997), antes da operação, as bombas centrífugas necessitam ser preenchidas pelo fluido ao qual será bombeado. Isso ocorre devido às folgas presentes dentro do rotor, dificultando a expulsão do ar presente na turbina e a sucção do líquido.

Para atender às diversas aplicações das bombas de deslocamento não-positivo, elas podem ser de diversas configurações de rotores, posição do eixo, trabalhar sobre altas e baixas pressões em reservatórios de captação com volume variável e não variável (NETTO et al., 1998). Por isso, existe uma classificação destas bombas em função com os requisitos a seguir:

##### 1. Tipo de Rotor

- Rotor Fechado: este modelo de rotor tem fixado em suas pás uma coroa, reduzindo a recirculação do fluido no elemento. Este modelo de rotor é indicado para fluidos puros, na qual, não contenham partículas flutuantes que possam obstruir a entrada do fluido pelas aberturas da coroa (MACINTYRE, 1997);

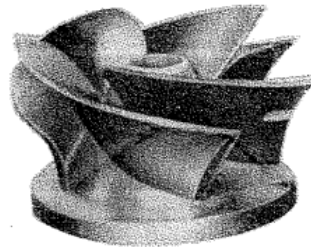
**Figura 2.11 – Exemplo de rotor fechado.**



Fonte: (MACINTYRE, 1997)

- Rotor Aberto: este modelo não contém a coroa fixada em sua parte superior. Assim, pode ser utilizado para transportar líquidos contendo partículas flutuantes por não arriscar ser obstruídas (MACINTYRE, 1997);

**Figura 2.12 – Exemplo de rotor aberto.**



Fonte: (MACINTYRE, 1997)

## 2. Trajetória do líquido no rotor

- Bomba centrífuga pura ou radial: nesta trajetória, o líquido adentra ao rotor de forma paralela ao eixo de rotação. Na qual, durante o seu giro, o líquido é encaminhado para a zona periférica, de acordo com as trajetórias estabelecidas nos planos normais ao eixo de rotação (MACINTYRE, 1997);
- Bomba de fluxo misto ou diagonal: nesta trajetória se enquadra as bombas hélico-centrífugas e as bombas helicoidais. As bombas hélico-centrífugas, o líquido adentra ao rotor de forma axial ao eixo de rotação. Na qual, ao atingir as pás, é direcionado paralelamente ao eixo de rotação por as pás obterem dupla curvatura. As bombas helicoidais também recebem o líquido de forma axial. Entretanto, a trajetória do líquido é realizada por uma hélice cônica, na qual, o bordo de saída das pás se torna uma curva bem inclinada em relação ao eixo de rotação (MACINTYRE, 1997);
- Bomba axial ou propulsora: nesta trajetória, o líquido adentra ao rotor de forma paralela à rotação do eixo. Porém, devido à configuração das pás e o escoamento axial, o líquido se desenvolve em uma hélice de vórtice forçado (MACINTYRE, 1997).

### 3. Número de rotores empregados

- Bomba de simples estágio: este modelo de bomba se caracteriza por conter apenas um rotor. Na qual, realiza a transmissão de energia mecânica pre fluido em apenas um estágio (MACINTYRE, 1997);
- Bombas de múltiplos estágios: já este modelo, pode obter dois ou mais rotores em sua composição. Assim, a transmissão de energia mecânica no fluido ocorre em múltiplos estágios (MACINTYRE, 1997).

### 4. Número de entradas para a aspiração

- Bomba de aspiração simples: este modelo de entrada é caracterizado por obter apenas uma entrada para o líquido (MACINTYRE, 1997);
- Bomba de aspiração dupla: este modelo de entrada é caracterizado por fornecer entrada para o líquido paralelamente ao eixo por dois sentidos opostos (MACINTYRE, 1997).

### 5. Modo de transformação de energia cinética em energia de pressão

- Bomba com coletor em forma de caracol ou voluta: este modelo de bomba auxilia na transformação de energia cinética em energia de pressão. Assim, ao atingir a saída da bomba, o líquido obtém o equilíbrio entre velocidade de escoamento e pressão (MACINTYRE, 1997);
- Bomba de difusor com pás guias: este modelo de difusor utiliza palhetas para efetuar o direcionamento do líquido proveniente do rotor. Assim, a transformação de energia cinética em energia de pressão, ocorre com o mínimo de perdas (MACINTYRE, 1997);
- Bomba com difusor axial troncônico: este difusor é aplicado para aumentar a transformação da alta energia cinética, proveniente do rotor axial (MACINTYRE, 1997).

#### ***2.1.5 Curvas características das bombas***

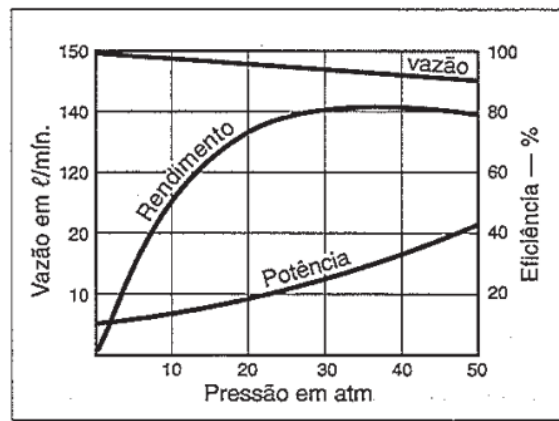
As curvas características, descrevem a relação entre a potência absorvida, vazão, eficiência e pressão das bombas considerando uma velocidade constante. Desta forma, a velocidade influencia diretamente a vazão e a potência da bomba durante a operação (NETTO et al., 1998).

Segundo (MACINTYRE, 1997), as bombas hidráulicas são produzidas para operar em seu máximo rendimento. Porém, existem grandezas prefixadas que devem atender à operação, sendo eles:

- $Q \rightarrow$  representa a vazão da bomba ( $m^3/s$ );
- $H_e \rightarrow$  representa a altura de elevação do líquido (m);
- $n \rightarrow$  representa o número de rotações do rotor (rpm);
- $\eta_{m\acute{a}x} \rightarrow$  representa a eficiência do conjunto motor bomba (%).

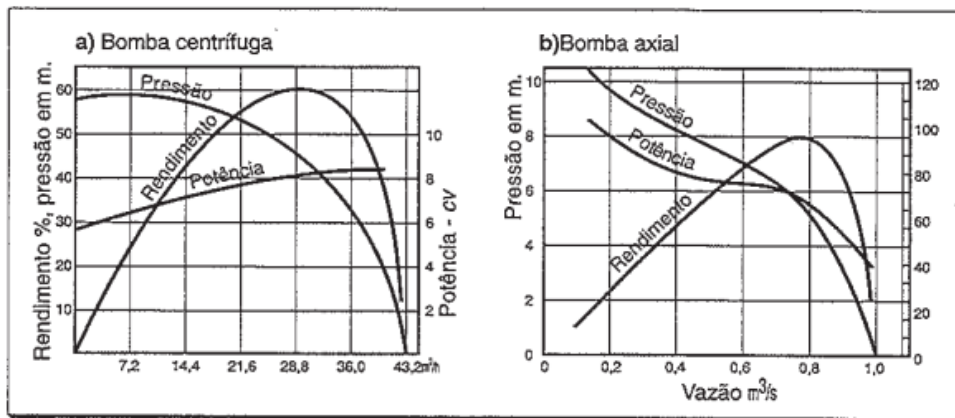
Com estas grandezas, e entrando com os dados de  $Q$  e  $H_e$ , pode ser encontrada a potência do motor da bomba (MACINTYRE, 1997). Na figura 2.13, pode ser retratada uma curva genérica para as bombas de deslocamento positivo, e na figura 2.14, podem ser retratadas curvas características genéricas de uma bomba centrífuga e uma bomba radial.

**Figura 2.13** – Curva característica genérica para bombas de deslocamento positivo.



Fonte: (NETTO et al., 1998)

**Figura 2.14** – Curva característica genérica para bomba centrífuga e axial.



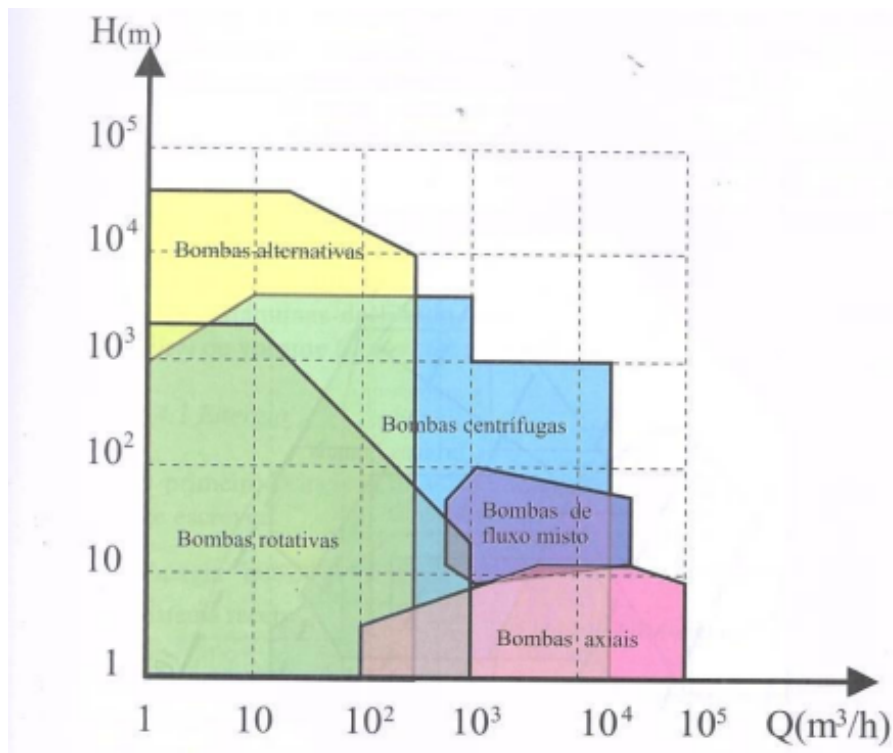
Fonte: (NETTO et al., 1998)

### 2.1.5.1 Campo de aplicação das bombas

Segundo o autor (HENN, 2006), existem diversos pontos de intersecção entre a aplicação das bombas. Desta forma, os critérios para a escolha da bomba ideal, além da altura de elevação, vazão e potência da bomba, será também a viscosidade do líquido, existência de partículas flutuantes e facilidade de manutenção.

Na figura 2.15, pode ser observado os campos de aplicação conforme a altura de elevação e a vazão do líquido.

Figura 2.15 – Campo de aplicação segundo (HENN, 2006).



Fonte: (HENN, 2006)

### 2.1.6 Categorias de motores elétricos

Para efetuar a partida das bombas hidráulicas, e assim realizar a transferência do fluido de um ponto ao outro, são utilizados os motores elétricos. Estes, são aplicados para realizar a transformação de energia elétrica em energia mecânica de eixo. Desta forma, pode ser transferido esta energia para o fluido (FEDRIZZI, 1997).

Para o desenvolvimento do presente trabalho de conclusão de curso, será utilizado sistemas fotovoltaicos, para realizar o bombeamento de água, são geralmente utilizados três modelos de motores elétricos, sendo eles os motores de corrente alternada (CA), os em corrente contínua (CC) com escovas e os motores em corrente contínua (CC) sem escovas

(FEDRIZZI, 1997).

#### **2.1.6.1 Modelos de motores em corrente alternada**

Estes modelos de motores obtém alta procura para esta aplicação, pois, seu custo de aquisição e manutenção são menores que os demais. Porém, este necessita de ser utilizado junto a um inversor de corrente, causando perda de eficiência no funcionamento do motor. Nos dias atuais, já se encontra disponíveis no mercado, conjuntos de motobombas e inversores capazes de gerar energia com eficiência próxima a 97%, sendo muito requisitados em sistemas de submersos (FEDRIZZI, 1997).

#### **2.1.6.2 Modelos de motores em corrente contínua com escovas**

Estes modelos de motores obtém grande vantagem sobre os modelos de corrente alternada devido a sua compatibilidade com tipo de corrente gerada pelo painel fotovoltaico. Entretanto, se faz necessário maior investimento inicial no projeto, devido a seu elevado preço de aquisição. Também necessita de reparos periódicos em suas escovas, reduzindo o custo benefício de sua aplicação (FEDRIZZI, 1997).

#### **2.1.6.3 Modelos de motores em corrente contínua sem escovas**

Já estes modelos de motores, conseguem conciliar a praticidade de manutenção, por não haver as escovas que encarecem tanto o custo de aquisição quanto o custo de manutenção, e a compatibilidade de corrente entre motor e gerador. Assim, sendo amplamente utilizado para a aplicação na área de bombeamento de fluidos, alimentados por energia fotovoltaica (FEDRIZZI, 1997).

## **2.2 Sistemas de irrigação**

Em relação aos sistemas de irrigação, podemos descrever quatro modelos, sendo eles o sistema de irrigação por superfície, o sistema de irrigação por aspersão, o sistema de irrigação localizada e o sistema de sub irrigação, nas quais deverá haver um estudo prévio sobre qual cultivo será cultivada, as condições de terreno e meteorológicas do local (EMBRAPA, 2001).

Vale salientar também o estudo prévio dos recursos hídricos da região onde será realizado o cultivo. Pois, alguns sistemas necessitarão de maior ou menor quantidade de água para a irrigação (EMBRAPA, 2001).

### 2.2.0.1 Irrigação por superfície

Amplamente utilizada para irrigar plantações, utiliza da topografia da região da plantação e sua distribuição se dá através da gravidade, como pode ser observado na figura 2.16. Tem vantagens como a não utilização de energia elétrica para fazer seu deslocamento da fonte hídrica para a plantação, fácil operação e se adapta a diversas culturas. Suas desvantagens são depender das condições de topografia da região, não é indicada para solos com impermeabilidade excessiva e seu dimensionamento sofre variações graças a erosão (EMBRAPA, 2001).

**Figura 2.16 – Exemplo de sistema de irrigação por superfície.**



Fonte: (TESTEZLAF, 2011)

### 2.2.0.2 Irrigação por aspersão

Os sistemas de irrigação por aspersão, são os mais utilizados em lavouras de grande porte e extensão, como, por exemplo, na cultura da soja, do milho e feijão, como pode ser observado na figura 2.17. São realizadas por pulverizadores fixos em locais estratégicos, onde seu raio de alcance cubra uma área suficiente para a umidificação correta do solo. A grande vantagem deste sistema de irrigação é sua eficácia no cultivo de plantas com maior altura, além de umedecer uma área maior com menos recursos hídricos se comparado aos outros sistemas. Porém, este umedece em maior parte as folhas e caules das plantas, sendo então destinada a suas raízes uma pequena parcela da água utilizada (EMBRAPA, 2001).

**Figura 2.17 – Exemplo de sistema de irrigação por aspersão pivô central.**



Fonte: (TESTEZLAF, 2011)

### 2.2.0.3 Irrigação localizada

De longe, o sistema com maior eficiência para umedecer a terra e hidratar as raízes, este sistema utiliza de mangueiras ou tubos com pequenos furos em ao longo de sua extensão, como pode ser observado na figura 2.18. Os furos são posicionados ao pé das plantas, levando a água diretamente em suas raízes. Apesar de seu sistema gerar economia de água, o custo inicial para a aplicação deste sistema é alto em comparação com os demais. Porém, é um sistema que pode ser facilmente automatizado (EMBRAPA, 2001).

**Figura 2.18 – Exemplo de sistema de irrigação localizada por gotejamento.**



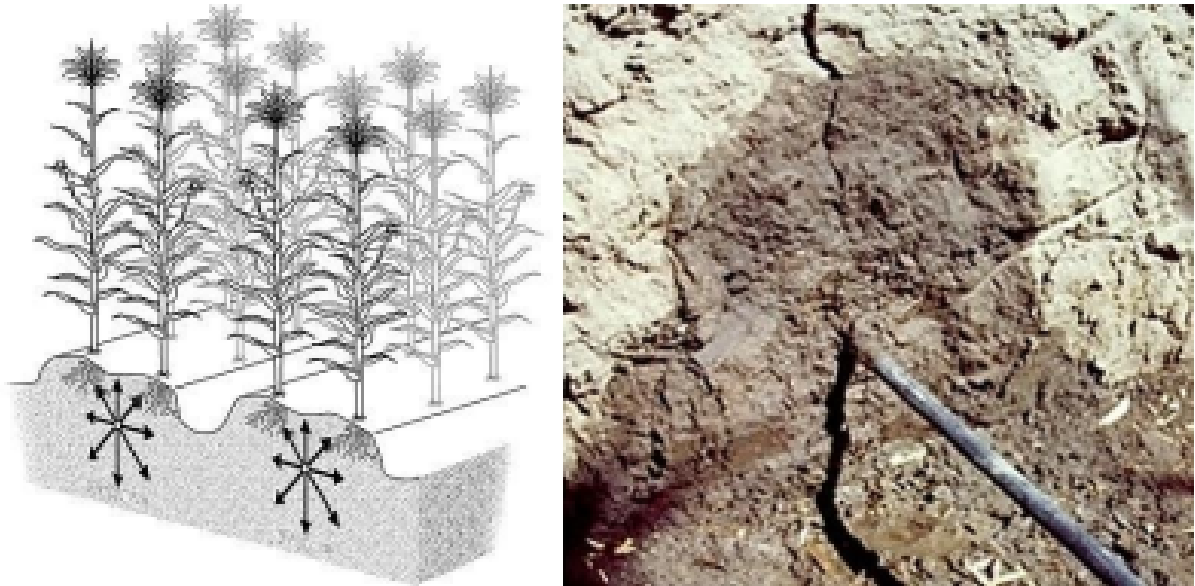
Fonte: (TESTEZLAF, 2011)

### 2.2.0.4 Irrigação subsuperficiais

Este sistema de irrigação se assemelha ao sistema de irrigação localizada. Porém, os tubos que antes eram distribuídos na superfície, neste sistema, os tubos são colocados no subsolo, para poder ser realizado a irrigação do solo, como pode ser observado na figura

2.19. Tem a vantagem de liberar o espaço dos corredores da lavoura para a passagem dos tratores e agricultores. Porém, sua manutenção se dificulta por estar debaixo do solo (EMBRAPA, 2001).

**Figura 2.19 – Exemplo de sistema de irrigação subsuperficiais.**



Fonte: (TESTEZLAF, 2011)

## 2.3 Energia solar fotovoltaica

Na natureza, a energia pode ser apresentada de diversas formas, e as que mais interessam à humanidade são as energias que podem ser transformadas em outras formas de energia e ser armazenadas. Estes conceitos são interpretados como o princípio da conservação de energia. Apesar de boa parte das fontes de geração de energia advir da queima de combustíveis fósseis e biomassa, os estudos nos campos das fontes de energia renováveis avançam a cada dia (GOLDEMBERG, 2011).

Antigamente, utilizando da queima dos combustíveis, as máquinas a vapor forneciam a energia mecânica para gerar rotação aos motores de indução. Atualmente, este método está sendo substituído pela força potencial da água, presente nas hidrelétricas, na força dos ventos para a geração de energia eólica, e não mais importante, a energia térmica e fotovoltaica do sol, no caso dos *boilers* e receptores fotovoltaicos (GOLDEMBERG, 2011).

### 2.3.1 Introdução à energia fotovoltaica

A energia emitida pelo sol sempre foi utilizada pelos seres vivos do planeta, como fonte para a fotossíntese para as plantas, ao fornecimento de energia solar (FLORES, 2019). Outro fato interessante é a sua ligação com outros meios de geração renováveis, como, por

exemplo, a geração hidrelétrica, participando ativamente no ciclo da água, e a energia eólica, causando as diferenças de temperaturas e criando correntes de ar (NUNES, 2021).

A energia solar fotovoltaica pode ser atribuída diversas vantagens, como, por exemplo a simultaneidade de utilização com outros métodos de geração de energia elétrica, a sua instalação em locais remotos, que ainda não recebem energia elétrica, além de causar impacto mínimo ao meio ambiente durante sua utilização. Porém, seu custo inicial de instalação ainda obtém valores altos, tanto pelo motivo da escassa mão de obra qualificada quanto dos custos de aquisição de seus materiais. Outra desvantagem deste sistema, se deve ao fato de sua produção ser exclusivamente durante o período diurno, e também da queda de sua eficiência em dias chuvosos, frios ou nublados (MEDEIROS, 2018).

### ***2.3.2 Painéis fotovoltaicos***

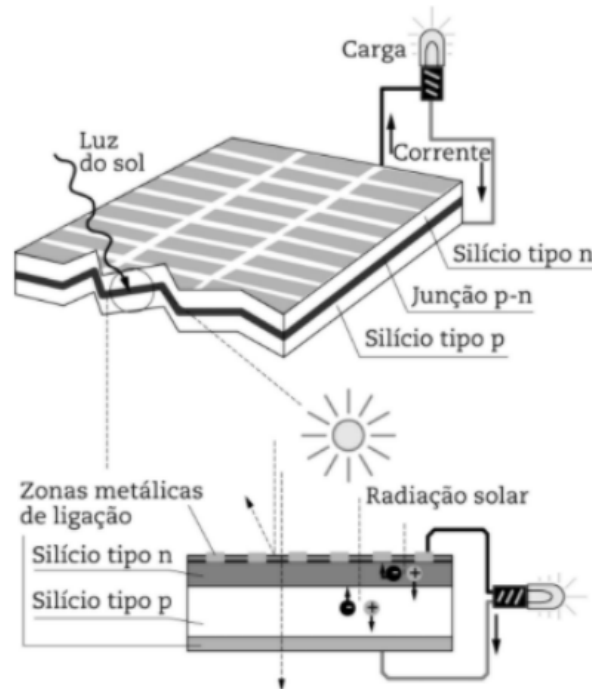
No decorrer dos anos, as pesquisas realizadas sobre os painéis fotovoltaicos, foi possível a otimização dos módulos e o aumento da eficiência de geração. Com isso, aumentou-se a capacidade de absorção de energia dos fótons, melhorando significativamente a eficiência de produção de energia (NUNES, 2021).

#### **2.3.2.1 Efeito fotovoltaico**

O efeito fotovoltaico, descoberto em 1839 pelo físico francês Edmond Becquerel, é a consequência da passagem da radiação solar em determinados semicondutores, ocorrendo uma reação química nestes que causa a quebra das ligações dos elétrons presentes na composição, o transferindo para fora da camada de valência do semicondutor. Isso ocorre devido à ligação química entre os átomos dos semicondutores ser fraca, que, com a incidência de energia solar fotovoltaica, transmite energia o suficiente para realizar esta quebra. Assim, o elétron se torna livre (ZILLES et al., 2016).

Após ocorrer a quebra das ligações entre os átomos dos semicondutores, os elétrons livres são enviados para um contato seletivo, onde os encaminha para o circuito externo. Em seguida, o elétron é devolvido à célula novamente por outro ponto de contato. Isso ocorre devido o elétron não obter perdas de carga durante o trabalho de condução da energia, permitindo seu retorno à célula com a mesma energia na qual saiu. Estes pontos causam um equilíbrio de energia ao semicondutor, pois, os pontos de entrada e saída do elétron formam uma região dipolo (positivo-negativo). Desta forma, provoca-se uma diferença de potencial no sistema, formando uma corrente elétrica (NUNES, 2021). Na figura 2.20, é ilustrado o efeito de diferença de potencial no semicondutor.

Figura 2.20 – Exemplo do efeito fotovoltaico.



Fonte: Adaptado de (NUNES, 2021)

### 2.3.2.2 Células fotovoltaicas

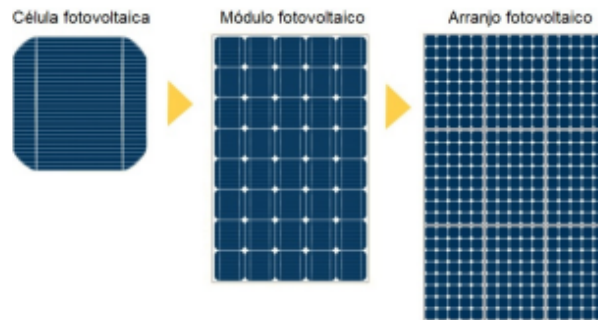
As células fotovoltaicas são os componentes responsáveis por realizar a transformação da radiação do sol em energia elétrica. Estas podem ser compostas tanto de silício quanto de outro material que atue como semicondutor (MEDEIROS, 2018). Devido ao avanço dos estudos da área avançar com a aplicação do Silício, ele é o material mais utilizado para atuar como semi condutor. Para a sua aplicação nesta área, o material pode ser obtido por meio de dois processos de fabricação, sendo um dele por meio de lingotamento, produzindo um lingote com grãos policristalinos; e por meio da fundição da matéria-prima, em que após o processo, o material se recristaliza e produz grãos monocristalinos (NUNES, 2021).

A preparação para a utilização do material, no caso do Silício, é iniciado o corte do material bruto em lâminas dopadas de boro, seguida da realização do reparo de sua superfície, retirando as imperfeições ocorridas durante o processo de fatiamento do material. Após o tratamento estético das lâminas, inicia-se o processo de tratamento químico das peças, efetuando uma difusão de fósforo no material. Posteriormente, retira-se material de suas extremidades, de modo a aumentar o contato do semicondutor com o condutor, permitindo o aumento da resistência elétrica entre os contatos superior e inferior. Por último, a célula recebe um revestimento antirreflexo e uma camada de pasta metálica, aumentando sua opacidade e seu coeficiente de condução elétrica (NUNES, 2021).

### 2.3.2.3 Módulos fotovoltaicos

Ao ser findada a produção da célula fotovoltaica, é realizado um tratamento térmico para que os contatos atinjam o Silício. Em seguida, elas são testadas em fontes de luz artificial e organizadas em módulos (NUNES, 2021). O agrupamento das células em módulos se faz necessária, pois, a tensão exercida na célula obtém valores baixos, necessitando agregá-las para obter uma tensão desejável (MEDEIROS, 2018).

**Figura 2.21 – Demonstração da formação das células, módulos e painéis.**



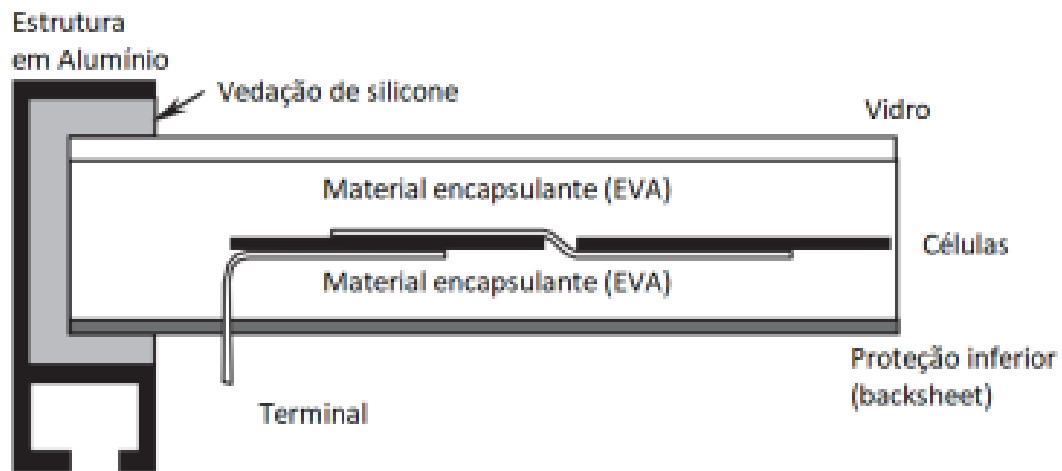
Fonte: Adaptado de (NUNES, 2021)

Como pode ser observado na figura 2.21, ao ter a intenção de gerar maior quantidade de energia elétrica, é realizado a junção dos módulos para obter um painel fotovoltaico. Este, com a soma dos módulos, é capaz de gerar maiores valores de tensão, pois, quanto maior a área de recepção de luz solar, maior será a tensão gerada nos painéis (MEDEIROS, 2018).

Devido à fragilidade do material quando exposto aos fatores climáticos, elétricos e de impacto, sua proteção é um fator extremamente relevante para sua vida útil. Devido a sua fragilidade, após formar o módulo, este é envolvido em uma cápsula composta de polímeros flexíveis, com propriedades permeáveis e amortecedora. Em seguida, sela-se o módulo com uma lâmina de vidro temperado em sua face superior, com o intuito de permitir a passagem da radiação solar, e em sua face inferior, é instalada uma placa polimérica dura, permitindo sua proteção. Para realizar sua instalação no local, o painel é acoplado a uma estrutura metálica utilizando de silicone, pois este material, contém propriedades vedantes e de amortecimento de vibrações mecânicas. Geralmente, a estrutura metálica na qual se instala o painel fotovoltaico é constituída de alumínio, por obter resistência mecânica suficiente para suportar o peso dos painéis e baixa oxidação quando exposta aos fatores climáticos (NUNES, 2021).

Na figura 2.22, pode ser observado como são dispostas camada a camada dos componentes protetores e de fixação dos painéis fotovoltaicos.

Figura 2.22 – Corte lateral de um módulo fotovoltaico.



Fonte: Adaptado de (NUNES, 2021)

## 2.4 Irradiação

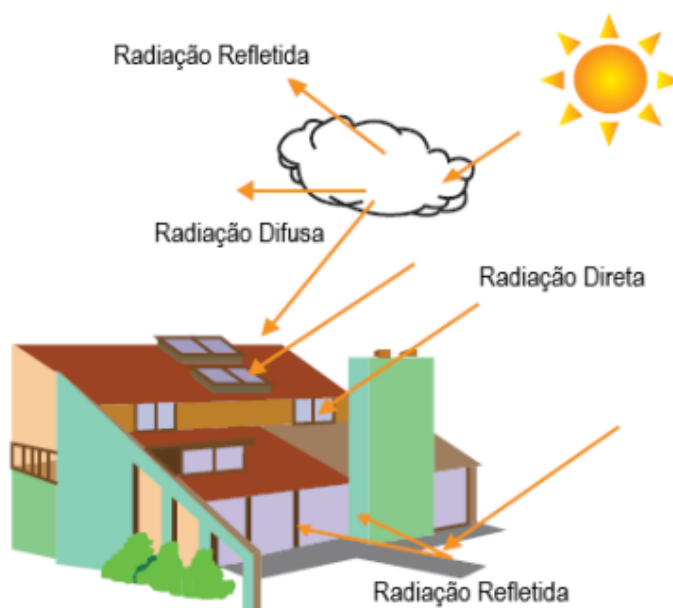
A radiação se denomina como a taxa de energia transferida de um corpo com o ambiente pelo ar ou pelo vácuo, trocando a energia térmica irradiada pela vizinhança do corpo com maior energia calórica. O principal exemplo que pode ser atribuído a este meio de transferência de calor é a irradiação da energia térmica e fotoluminescente do sol (BERGMAN et al., 2014).

### 2.4.1 Radiação solar

Quando refere-se a radiação solar, pode ser conceituado dois termos diferentes, sendo eles a irradiância solar e irradiação solar. Porém, segundo (FLORES, 2019), a irradiância solar refere-se ao fluxo de potência total em uma área específica, e a irradiação solar representa a irradiância solar ocorrida durante um determinado período.

Devido à camada atmosférica que circunda o planeta, parte da energia irradiada pelo sol é filtrada, chegando até o solo um valor aproximado de  $1.367W/m^2$ . Desta parcela que prossegue adentro do planeta, se forma duas componentes radiantes, sendo elas a radiação difusa, uma constante afetada pelas formações de nuvens, e a componente direta. Esta, é composta pela radiação que atinge diretamente o solo de forma perpendicular (FLORES, 2019).

Figura 2.23 – Atuação das componentes irradiadas.



Fonte: (FLORES, 2019)

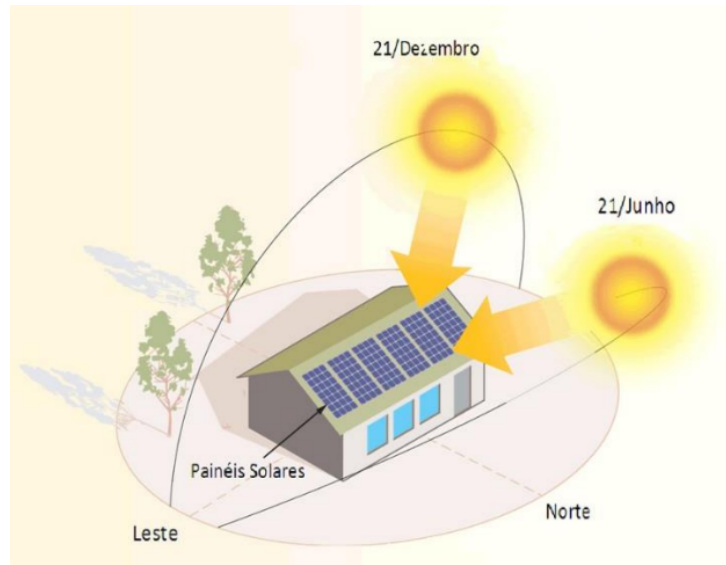
Quando se é analisado o planeta em um plano inclinado, ocorre-se uma terceira componente devido à reflexão da radiação quando atinge outros elementos presentes no ambiente, aumentando a repartição da radiação para outros elementos, nomeada por albedo (FLORES, 2019). Pode ser observado as três componentes na figura 2.23, ilustrando como cada componente atua na superfície da Terra.

### 2.4.2 Ângulo de incidência

Para a utilização dos painéis, é necessário o estudo prévio da incidência solar na região onde serão instalados. Vale salientar também a importância do mapeamento de incidência do sol na região, pois, para ocorrer o maior tempo de exposição do painel ao sol, este deve se encontrar orientado ao norte geográfico. Isso ocorre devido à mudança de rotação da Terra durante a sazonalidade das estações do ano, aliado à angulação de incidência do sol durante o dia devido à translação do planeta (MEDEIROS, 2018).

Estes parâmetros podem ser ilustrados na imagem 2.24, que caso não sejam satisfeitos, causará impacto negativo na geração de energia, reduzindo sua geração e eficiência (MEDEIROS, 2018).

Figura 2.24 – Alternância de posição do sol de acordo com as estações.



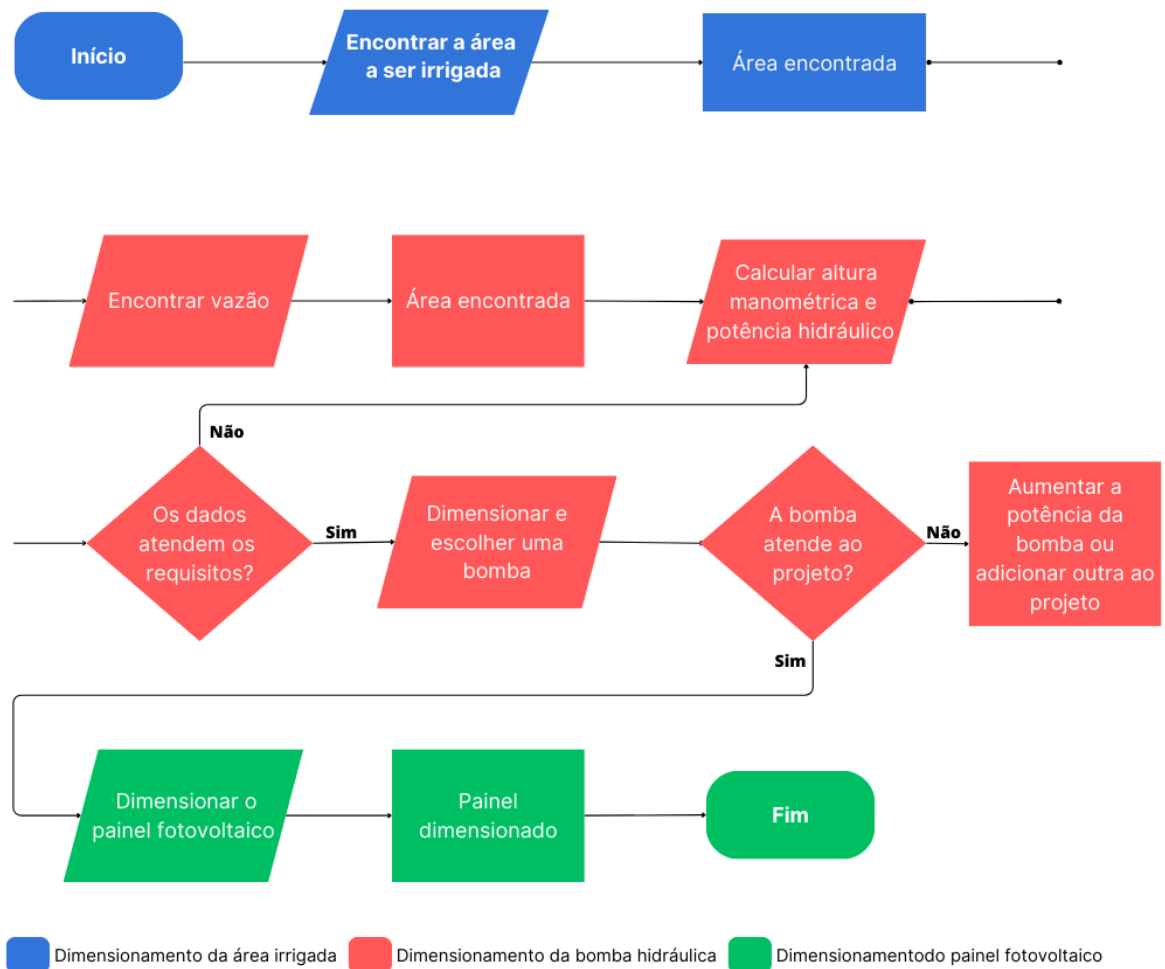
Fonte: (MEDEIROS, 2018)

### 3 METODOLOGIA

A metodologia empregada nesse trabalho de conclusão de curso, consiste no dimensionamento e uma bomba hidráulica para um sistema de irrigação. Onde, a alimentação de energia elétrica da bomba será através da energia fotovoltaica. Primeiramente será abordado as dimensões de canteiros utilizados pelos horticultores da cidade de Divinópolis, Minas Gerais. Em seguida será abordado a vazão de água necessária para realizar a umidificação do solo necessária para a horta e por seguinte, escolher o conjunto motobomba capaz de realizar tal vazão. Por último, dimensionar os painéis fotovoltaicos, na qual tenha êxito na geração de energia suficiente para alimentar o conjunto motobomba.

Na figura 3.1, pode ser observado o fluxograma a serem desenvolvidas.

**Figura 3.1 – Fluxograma das atividades desenvolvidas.**



### 3.1 Avaliando a área do canteiro

Como primeiro objetivo para iniciar o dimensionamento do sistema de irrigação, deve ser estimado a área produtiva da horta. Desta forma, pode ser avaliado a área para a irrigação e calcular a necessidade de água (EMBRAPA, 2006).

O primeiro procedimento a ser efetuado para calcular a área de uma horta é medir sua área total, utilizando equação 1. A partir de sua área total, pode ser então estipulado a largura dos canteiros (parte da horta utilizável) e a largura das ruas (parte da horta destinada para ao trânsito dos produtores), equação 2. Desta forma, encontrando a área efetiva de plantio, equação 5. Usualmente, para melhor manejo com o canteiro, são utilizadas como medidas os valores de  $0,90m$  e  $1,20m$ . No âmbito da largura das ruas, elas tendem a obter valores entre  $0,30m$  a  $0,50m$ . Desta forma, o usuário obtém maior liberdade para transitar entre os canteiros (EMBRAPA, 2006).

- Área total da horta (ATH);

$$ATH = L \cdot C \quad (1)$$

- ATH  $\rightarrow$  Área total da horta ( $m^2$ );
- L  $\rightarrow$  Largura do canteiro (m);
- C  $\rightarrow$  Comprimento da rua da horta (m);
- A largura efetiva do canteiro (LEC) é a soma da largura do canteiro (LC) com a largura da rua (LR);

$$LEC = LC + LR \quad (2)$$

- LEC  $\rightarrow$  Largura efetiva do canteiro (m);
- LC  $\rightarrow$  Largura do canteiro (m);
- LR  $\rightarrow$  Largura da rua (m);
- Calcular o percentual de área não utilizada (%ATSU);

$$\%ATSU = \left( \frac{LR}{LEC} \right) \cdot 100 \quad (3)$$

- %ATSU  $\rightarrow$  Percentual da área total não utilizada;
- LC  $\rightarrow$  Largura do canteiro (m);

- LR → Largura da rua (m);
- Cálculo da área total da horta ocupada (AOR);

$$AOR = \left(\frac{\%ATSU}{100}\right) \cdot ATH \quad (4)$$

- AOR → Área total da horta ocupada ( $m^2$ );
- %ATSU → Percentual da área total não utilizada;
- ATH → Área total da horta ( $m^2$ );
- Calcular a área efetiva para plantio da horta (AEPPH);

$$AEPPH = ATH - AOR \quad (5)$$

- AEPPH → Área efetiva para plantio da horta ( $m^2$ );
- ATH → Área total da horta ( $m^2$ );
- AOR → Área total da horta ocupada ( $m^2$ );

Segundo (EMBRAPA, 2001), para ocorrer a umidificação eficiente do solo, é necessário destinar no mínimo  $8L$  de água por metro quadrado ( $8 \cdot 10^{-3} \frac{m^3}{m^2}$ ). A partir desta informação, pode ser encontrado a demanda de água necessária para o sistema.

## 3.2 Dimensionamento da bomba

Para realizar o dimensionamento da bomba, será necessário utilizar duas etapas. Estas etapas são:

- Encontrar as perdas por carga da tubulação ao percorrer o caminho entre a fonte de água (açudes, rios, poços artesianos), até o sistema de irrigação;
- A partir das perdas, dimensionar uma bomba capaz de bombear o volume de água necessário para o sistema de irrigação com o máximo de eficiência.

### 3.2.1 Determinação da vazão

Para escolher a bomba correta e eficiente para o sistema de irrigação, se faz necessário encontrar a vazão que, ao final do dia, tenha fornecido a quantidade de água suficiente para irrigar a horta. Para encontrar esta vazão, utiliza-se da equação 6, resultado

do produto entre a velocidade de escoamento do fluido, e a área de saída do fluido (KLEINPAUL, 2015).

$$Q = V \cdot A \quad (6)$$

- $Q \rightarrow$  Vazão ( $m^3/s$ );
- $V \rightarrow$  Velocidade de escoamento ( $m/s$ );
- $A \rightarrow$  Área de saída da bomba ( $m^2$ );

De acordo com (KLEINPAUL, 2015), no contexto de aplicação prática do sistema é utilizado o conceito de velocidade econômica, na qual, este dado permite validar o diâmetro de saída da bomba, e deve ser  $\leq 1,5m/s$  com limite de velocidade de escoamento máximo de  $2m/s$  em casos de sucção. Para casos de recalque, este dado deve obter valores  $\leq 2,5m/s$ , com limite de velocidade de escoamento máximo de  $3m/s$ .

### 3.2.2 Determinação do diâmetro hidráulico

Ao iniciar um projeto que utilize sistemas hidráulicos, uma das questões com maior relevância para um bom abastecimento de água se deve ao dimensionamento do diâmetro da tubulação a ser utilizada. Para auxiliar a execução do projeto da tubulação hidráulica, pode ser utilizada a fórmula de *Bresse*. Na qual, determina o diâmetro de um projeto hidráulico em condições de operação contínua, apresentada na equação 7. Na qual,  $D$  representa o diâmetro da tubulação,  $K$  o coeficiente de custos e  $Q$  a vazão (FLORES, 2019).

$$D = K \cdot \sqrt{Q} \quad (7)$$

- $D \rightarrow$  diâmetro da tubulação ( $m$ );
- $K \rightarrow$  coeficiente de custos (adimensional);
- $Q \rightarrow$  vazão ( $m^3/s$ );

Partindo da premissa em que a variável  $K$  equivale aos custos de operação e investimento, podendo obter diversos valores, este é pré-determinado pelo autor do projeto. Para a concepção do sistema hidráulico utilizando uma bomba alimentada por energia

fotovoltaica, deve ser considerado a variação do período de exposição solar. Desta forma, pode ser utilizado a fórmula definida na ABNT NBR 5626, que utiliza da fórmula de *Bresser* considerando a constante  $K$  como o período de insolação, sendo descrita na equação 8 (FLORES, 2019).

$$D = 1,3 \cdot \sqrt[4]{\frac{T}{24}} \cdot \sqrt{Q} \quad (8)$$

- $D \rightarrow$  diâmetro comercial da tubulação (m);
- $T \rightarrow$  período de tempo (h);
- $Q \rightarrow$  vazão ( $m^3/s$ );

Após encontrar o diâmetro dos tubos hidráulicos, na hipótese do diâmetro hidráulico não ser encontrado nos pontos de venda de materiais de construção, assume-se o diâmetro comercial nominal mais próximo acima do valor encontrado ( $D$ ). Por seguinte, é necessário realizar sua validação por meio da equação da velocidade. Na qual, demonstrará se o seu diâmetro proporciona uma velocidade tal que não prejudique a estrutura do sistema (FLORES, 2019). Esta validação pode ser observada na equação 9.

$$v = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D^2} \quad (9)$$

- $v \rightarrow$  velocidade (m/s);
- $Q \rightarrow$  vazão ( $m^3/s$ )
- $D \rightarrow$  diâmetro da tubulação (m);

### **3.2.3 Altura manométrica do sistema de bombeamento**

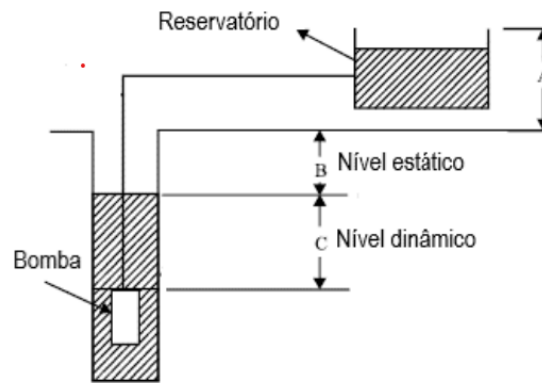
Para realizar a extração da água da sua fonte, deve ser efetuado um estudo prévio de determinadas questões. Os dados a serem observados antecipadamente, vão variar conforme o modelo de bomba a ser escolhido. Dentre eles estão o volume de água do poço, a velocidade de reposição do volume de água e altura do poço (FLORES, 2019).

Continuando com a determinação da altura manométrica ( $H_m$ ), ela pode ser encontrada utilizando a equação 10, realizando o somatório da altura estática ( $H_{ST}$ ), altura dinâmica ( $H_{DT}$ ), altura do reservatório ( $H_g$ ) e a perda de carga ao longo da tubulação ( $h_p$ ). Sendo representada na figura 3.2 (FEDRIZZI, 1997).

$$H_m = H_{ST} + H_{DT} + H_g + h_p \quad (10)$$

- $H_m$  → altura manométrica (m);
- $H_{ST}$  → altura estática (m);
- $H_{DT}$  → altura dinâmica (m);
- $H_g$  → altura do reservatório (m);
- $h_p$  → perda de carga (m);

**Figura 3.2 – Representação do cálculo da altura manométrica.**



Fonte: (FLORES, 2019)

Com a passagem da água pela tubulação, devido ao atrito, ocorrerão as perdas de carga do fluido. Este fenômeno interfere diretamente no fluxo de água na tubulação, influenciando também na potência a ser escolhida para a bomba. E para encontrar as perdas, é utilizada a equação 11 (JIMÉNEZ, 2017).

$$h_p = f \cdot \frac{L \cdot V^2}{D \cdot 2g} + K_L \cdot \frac{V^2}{2g} \quad (11)$$

Na qual:

- $f$  → fator de atrito;
- $L$  → comprimento do tubo (m);
- $V$  → velocidade do fluxo (m/s);

- $D \rightarrow$  diâmetro do tubo (mm);
- $g \rightarrow$  aceleração da gravidade ( $m/s^2$ );
- $K_L \rightarrow$  coeficiente de perda de carga;

Entretanto, é raramente disposto pelos fabricantes de tubos o coeficiente de perda de carga, e por isso, pode ser utilizado a longitude equivalente de tubulação ( $L_{eq}$ ). Esta variável permite avaliar as perdas de carga ao longo do comprimento do tubo, aproximando o resultado que seria obtido através da utilização do coeficiente  $K_L$ . Então, é realizado a substituição deste pelo  $L_{eq}$  na equação 11, gerando a equação 12.

$$h_p = f \cdot \frac{L \cdot V^2}{D \cdot 2g} + L_{eq} \cdot \frac{V^2}{2g} \quad (12)$$

- $f \rightarrow$  fator de atrito;
- $L \rightarrow$  comprimento do tubo (m);
- $V \rightarrow$  velocidade do fluxo (m/s);
- $D \rightarrow$  diâmetro do tubo (mm);
- $g \rightarrow$  aceleração da gravidade ( $m/s^2$ );
- $L_{eq} \rightarrow$  longitude equivalente de tubulação;

O fator de atrito  $f$ , pode ser obtido através da equação 13. Em função do número de *Reynolds* equação 14 (FLORES, 2019).

$$R_e = \frac{v \cdot D}{\nu} \quad (13)$$

- $R_e \rightarrow$  número de *Reynolds*;
- $V \rightarrow$  velocidade do fluxo (m/s);
- $D \rightarrow$  diâmetro do tubo (m);
- $\nu \rightarrow$  viscosidade cinemática ( $m^2/s$ );

$$f = 0,0055 \cdot \left( 1 + \left( 2000 \cdot \frac{\epsilon}{D} + \frac{10^6}{Re} \right)^{\frac{1}{3}} \right) \quad (14)$$

Os dados de altura manométrica e vazão, são necessários para ser possível efetuar o cálculo de potência hidráulica  $P_h$ . Pois, este será o ponto de partida para encontrar o conjunto motobomba ideal para o sistema. Portanto, ao encontrar a potência hidráulica, será possível associar uma bomba com potência suficiente para extrair a água da fonte, e o cálculo para encontrá-lo ocorrerá através da equação 15 (FLORES, 2019).

$$P_h = \frac{Q \cdot \rho \cdot g \cdot H_m}{3600 \cdot 1000} \quad (15)$$

- $P_h$  → Potência hidráulica da bomba (kW);
- $Q$  → vazão (m/s);
- $\rho$  → densidade da água (kg/m<sup>3</sup>);
- $H_m$  → altura manométrica (m);

### 3.3 Dimensionamento da bomba

Ao ser realizada a etapa de estabelecimento da demanda de água, a vazão necessária para o projeto e a determinação a altura manométrica do sistema, a seguinte etapa é a escolha da bomba hidráulica. Esta etapa é de extrema importância para o projeto, devido a este componente ser responsável pela sucção da água em sua fonte. Para tal, se faz necessário utilizar dos dados encontrados para a potência hidráulica, na qual, a faixa de potência da bomba, deve corresponder à potência hidráulica.

Após estabelecer a bomba hidráulica compatível com o requerido pelo projeto, é necessário encontrar a potência elétrica do conjunto. Para esta finalidade, pode ser utilizado a equação 16 utilizando a eficiência do conjunto escolhido. Outro ponto de referência que pode ser utilizado, consta na tabela 3.1, com as faixas de eficiência dos tipos de motobomba (FLORES, 2019).

$$P_{el} = \frac{P_h}{\eta_m} \quad (16)$$

- $P_{el}$  → Potência elétrica da bomba (W);
- $P_h$  → Potência hidráulica da bomba (W);

- $\eta_m \rightarrow$  Eficiência da bomba (%);

**Tabela 3.1 – Faixa de eficiências de acordo com a categoria de cada bomba.**

Categoria de bombas	Faixa de eficiência %
bomba centrífuga de superfície	15-25
bomba submersa	25-35
bomba de deslocamento positivo	35-45

Fonte: Adaptado de (FLORES, 2019)

Ao realizar a escolha de uma bomba, também deve ser considerado o fenômeno físico que influenciará diretamente no funcionamento e vida útil do equipamento, este sendo a cavitação. Segundo (JUSTINO; NOGUEIRA, 2012), este fenômeno se assemelha à ebulição, ocorrendo devido à formação de bolhas de ar em regiões de baixa pressão, que ao ser transportada para a região de alta pressão, ocorre o rompimento desta bolha, liberando grande energia à hélice da bomba. Este fenômeno pode ser identificado por meio de vibração da bomba ou por meio de ruídos.

A título de evitar este fenômeno, pode ser analisado o NPSH (balanço no topo de sucção positiva) da operação. Este, representa a diferença de energia na sucção do fluido, sendo o NPSH disponível a energia de sucção do sistema hidráulico e o NPSH requerido a energia de sucção referente à bomba (JUSTINO; NOGUEIRA, 2012).

Para uma boa operação, se prevenindo com a ocorrência da cavitação durante a sucção, o NPSH disponível deve ser maior que o NPSH requerido. Desta forma, o fluido chega ao rotor com energia e pressão suficiente para evitar a cavitação (JUSTINO; NOGUEIRA, 2012).

O NPSH disponível pode ser encontrado a partir da equação 17. Devido ao processo para conseguir encontrar o NPSH requerido mediante ensaios da bomba, ele é fornecido pelos fabricantes através dos catálogos de seleção.

$$NPSH_{disp} = H_{atm} - \left( \pm H_s + H_v + \Delta H + \frac{v^2}{2 \cdot g} \right) \quad (17)$$

Na qual:

- $NPSH_{disp} \rightarrow$  balanço no topo de sucção positiva (m);
- $H_{atm} \rightarrow$  pressão atmosférica local (m);

- $H_s$  → altura de sucção (m);
- $H_v$  → pressão de vapor do fluido em função da temperatura (m);
- $\Delta H$  → perda de sucção (m);

### 3.4 Definição do painel fotovoltaico

Para encontrar o tamanho ideal do painel fotovoltaico, pertinente para a alimentação ideal da bomba, primeiramente encontra-se a energia consumida pelo sistema. Devido ao sistema a ser dimensionado consiste em um sistema autônomo (*off-grid*), a energia necessária para alimentar o conjunto pode ser encontrada a partir da equação 18. Na qual, será o produto do tempo de seu funcionamento ( $T$ ), com a potência elétrica da bomba ( $P_{el}$ ).

$$E = P_{el} \cdot T \quad (18)$$

- $E$  → energia consumida pelo sistema ( $W \cdot h$ );
- $P_{el}$  → potência elétrica da bomba (W);
- $T$  → período de funcionamento (h);

Após quantificar a energia necessária para alimentar o conjunto, pode ser encontrada a energia que será gerada pelo painel  $E_{ger}$ , equação 19. Na qual, será provida através do produto da insolação diária  $HSP$ , área de superfície do módulo  $A_m$  e a eficiência do módulo  $\eta_m$ . Para determinar a quantidade de módulos necessários para a geração de energia  $N^\circ$ , será utilizada a equação 20. Na qual, será a razão da energia necessária para a alimentação da bomba sobre a energia de geração do painel fotovoltaico.

$$E_{ger} = HSP \cdot A_m \cdot \eta_m \quad (19)$$

- $E_{ger}$  → energia gerada pelo painel (W);
- $HSP$  → insolação do local ( $kWh/m^2$ );
- $A_m$  → área do superfície do módulo ( $m^2$ );
- $\eta_m$  → eficiência do módulo (%);

$$N^\circ = \frac{E}{E_{ger}} \quad (20)$$

- $N^\circ \rightarrow$  módulos necessários para geração de energia (unidade);
- $E_{ger} \rightarrow$  energia gerada pelo painel (W);
- $E_{ger} \rightarrow$  energia gerada pelo painel (W);

### 3.5 Construção do programa no *software Python*

Com o intuito de efetuar o dimensionamento da bomba hidráulica a ser utilizada, foi elaborado um programa (Apêndice A) na ferramenta *Jupyter Notebook*, da linguagem de programação *Python*. Na qual, utilizando os dados de entrada adequados à necessidade do usuário representados na tabela 3.2, será possível encontrar a vazão necessária para o sistema, as perdas de carga da tubulação e bomba, o modelo e potência da bomba a ser utilizado no recalque da água e a quantidade de módulos necessários para gerar energia pertinente ao sistema desejado.

**Tabela 3.2 – Tabela de entrada de dados.**

Dado	Descrição	Unidade
L	Largura da horta	(m)
C	Comprimento da horta	(m)
$L_c$	Largura do canteiro	(m)
$L_r$	Largura da rua	(m)
T	Período de funcionamento da bomba	(horas)
$D_{comer}$	Diâmetro comercial do tubo	(m)
$H_{st}$	Altura de sucção da boma	(m)
$H_{dt}$	Altura dinâmica	(m)
$H_g$	Altura da bomba ao reservatório	(m)
$\epsilon$	Rugosidade do tubo	(m)
$L_{eq}$	Distância longitudinal da bomba ao reservatório	(m)
$NPSH_{req}$	Capacidade de sucção da bomba (quando uma bomba centrífuga)	(m)
$\eta_m$	Eficiência da bomba escolhida	(%)
$H_{atm}$	Altura do local de instalação em relação ao nível do mar	(m)
$H_v$	Pressão de vapor da água	(m)
$H_{suc}$	Altura de sucção (para bombas submersas o valor é negativo)	(m)
$HSP_{med}$	Insolação média diária do local	( $kWh/mm^2$ )
$A_{mod}$	Área de captação solar do módulo	( $m^2$ )
$\eta_{mod}$	Eficiência do módulo	(%)

Fonte: Próprio autor

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Coleta de dados

Após concluir a elaboração do código de dimensionamento da bomba hidráulica na ferramenta de programação *Jupyter Notebook*, foi realizada uma pesquisa nas feiras livres da cidade de Divinópolis, MG, com o intuito de entender a demanda dos produtores locais.

Durante a pesquisa, foram obtidos os dados iniciais para o dimensionamento, presentes na tabela 4.1, na qual, serão inseridos no código de modo a realizar o dimensionamento da bomba hidráulica pertinente para o canteiro. A propriedade escolhida para efetuar o estudo de caso se localiza na cidade de Divinópolis, MG, onde se situa em uma comunidade rural chamada de Buritis.

**Tabela 4.1 – Tabela de dados iniciais para estudo de caso.**

Dado	Valor	Unidade
L	55	(m)
C	100	(m)
$L_c$	0,9	(m)
$L_r$	0,35	(m)
T	8	(horas)
$H_{st}$	30	(m)
$H_{dt}$	1	(m)
$H_g$	4	(m)
$L_{eq}$	15	(m)

Fonte: Próprio autor

### 4.2 Cálculo da demanda de água

O primeiro passo para iniciar o dimensionamento da bomba, é encontrar a vazão necessária para umedecer o solo. Desta forma, são utilizadas as equações 1, 2, 3, 4, 5 apresentadas no capítulo 6, na qual, fornecerá a área efetiva da horta para plantio. A demanda de água necessária para a irrigação ideal, é encontrada multiplicando a área efetiva para o plantio com a quantidade mínima de água (8 litros).

Assim, utilizando-as encontraremos os resultados descritos na tabela 4.2:

**Tabela 4.2 – Dados para área efetiva da horta.**

Dado	Valor	Unidade
Área total da horta (ATH)	5500	( $m^2$ )
Largura efetiva do canteiro (LEC)	1,25	( $m^2$ )
Percentual da área total não utilizada (%ATSU)	28	(%)
Área total da horta ocupada (AOR)	1540	( $m^2$ )
Área efetiva para plantio da horta (AEPPH)	3960	( $m^2$ )
Demanda diária de água para a irrigação ideal ( $V_{agua}$ )	31,68	( $m^3$ )

Fonte: Próprio autor

### 4.3 Calculando a vazão

Com a demanda de água diária sendo equivalente a  $31,68 m^3$  ao dia, a vazão é calculada conforme o tempo de funcionamento da bomba. Pelo fato da bomba ser alimentada por um sistema fotovoltaico, o tempo de funcionamento dela é determinado pelo tempo médio de insolação da localização.

Na cidade de Divinópolis, MG, o tempo médio de duração do dia é igual a 8 horas. Desta forma, pode ser considerado este dado como período de funcionamento da bomba, encontrando assim a vazão para o sistema:

Onde:

- $Q = 3,96 (m^3/h)$ ;
- $V_{agua} = 31,68 (m^3)$ ;
- $T = 8 (h)$ ;

### 4.4 Cálculo do diâmetro hidráulico e da velocidade

Seguindo o roteiro de cálculos, o próximo dado a ser calculado são o diâmetro hidráulico, por meio da equação de *Bresse*, e a velocidade econômica do fluido, utilizando as equações 9 e 8 apresentadas na metodologia capítulo 6. Os dados obtidos após os cálculos estão presentes na tabela 4.3.

**Tabela 4.3 – Dados para o diâmetro hidráulico (m) e a velocidade econômica (m/s).**

Dado	Valor	Unidade
Período de atividade (T)	8	(h)
Vazão em segundos (Q)	$1,1 \times 10^{-3}$	( $m^3/s$ )
Diâmetro hidráulico ( $D_r$ )	0,033	(m)
Diâmetro nominal de tubulação comercial ( $D_n$ )	0,0352	(m)
Velocidade do fluido (v)	1,13	(m/s)

Fonte: Próprio autor

Devido ao diâmetro calculado não estar acessível nas lojas de materiais de construção, é utilizado então o diâmetro nominal mais próximo do tubo disponível no mercado. Para este caso, o diâmetro com valor mais aproximado é o tubo com diâmetro externo de 40 (mm), e diâmetro nominal de 35,2 (mm). Desta forma, foi possível obter a velocidade econômica equivalente a 1,13 (m/s). A velocidade encontrada satisfaz a faixa de velocidade econômica.

$$0,5 \leq 1,13 \leq 4 \quad (21)$$

Com o diâmetro hidráulico calculado e a velocidade do fluido satisfazendo os parâmetros, parte-se para o próximo passo.

## 4.5 Cálculo da altura manométrica

A altura manométrica do sistema em questão, utilizará os dados de alturas presentes na tabela 4.5, sendo aplicadas na equação 10. Porém, primeiro será calculada a perda de carga do sistema, equação 11, para poder ser somada a equação da altura manométrica.

### 4.5.1 Cálculo da perda de carga

Para calcular as perdas de cargas, o primeiro passo foi encontrar o coeficiente de perdas de carga  $K_L$ , utilizando do Anexo B, as perdas que cada dispositivo impõem ao sistema. Na tabela 4.4, dispositivos utilizados para este dimensionamento, a quantidade, o coeficiente de cada elemento e a altura que deverá ser acrescida por cada um.

**Tabela 4.4 – Dados coeficiente da perda de carga pelos acessórios (m).**

Elemento	Quantidade (unid)	Coeficiente K	Altura (m)
Joelho 90°	3	2	6

Fonte: Próprio autor

Para encontrar as perdas de carga da tubulação, foram utilizadas as equações 13 e 14 apresentadas no capítulo 6, com os dados de densidade da água, viscosidade da água, rugosidade dos condutos e a aceleração da gravidade ( $9,81m^2/s$ ), presentes no anexo B, gerando os dados descritos na tabela 4.5.

**Tabela 4.5 – Resultados para a perda de carga pelos acessórios (m).**

Dado	Valor	Unidade
Número de <i>Reynolds</i> ( $R_e$ )	37.031,9	Adimensional
Fator de atrito $f$	0,03	(m)
Distância longitudinal da bomba ao reservatório $L_{eq}$	15	(m)
Perdas de cargas nos elementos	0,39	(m)
Perdas de cargas na tubulação	0,81	(m)

Fonte: Próprio autor

Com os resultados obtidos, foi possível perceber que o valor do número de *Reynolds* indica um escoamento turbulento para o sistema. Solucionando a equação 11, foi somado o valor de 1,20 metros à altura manométrica. Ao efetuar o cálculo da altura manométrica, assume-se um fator de segurança de 50%, assegurando o planejamento do sistema.

Utilizando a equação 10, adicionando o fator de segurança, foi obtido o valor de 38 metros, e utilizando a equação 15, foi encontrado o valor de potência equivalente a 410,17 (W).

## 4.6 Escolha da bomba

Após determinar a vazão necessária para a horta, calcular a altura manométrica do sistema e encontrar a potência hidráulica gerada pela bomba, pode ser escolhida uma bomba pertinente para a operação.

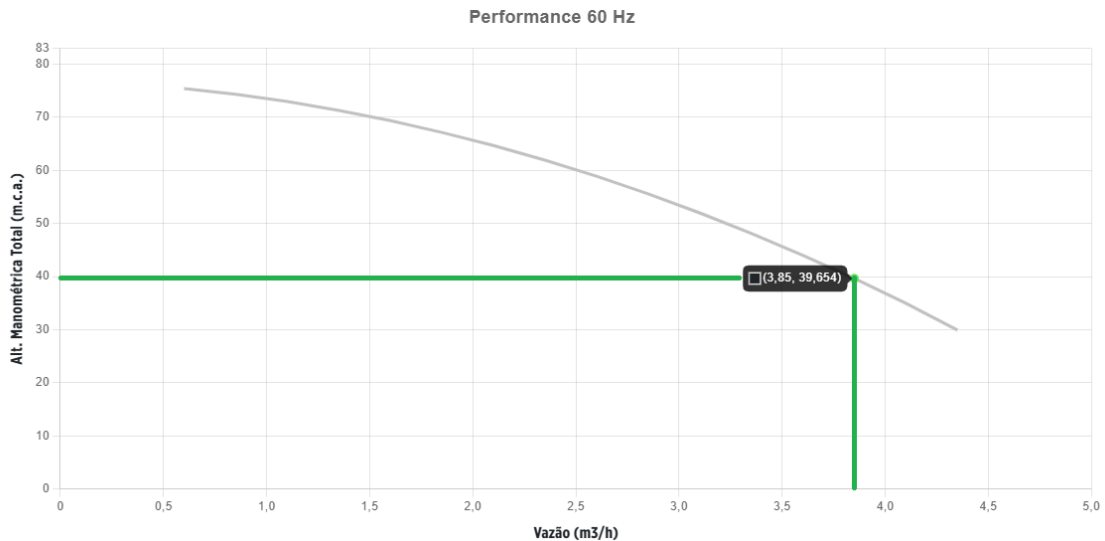
Para escolher a bomba ideal para operar na localidade em questão, o primeiro passo foi avaliar a altura de sucção ( $H_{DT}$ ) do poço. Este fator é determinante para o modelo de bomba a ser escolhido. Na qual os parâmetros para a sua seleção são:

- A altura de sucção  $0,1 \leq H_{DT} \leq 8$  metros  $\rightarrow$  modelo de bomba centrífuga;
- A altura de sucção  $8 \leq H_{DT}$  metros  $\rightarrow$  modelo de bomba submersa;

Como a altura de sucção do poço ( $H_{DT}$ ) é equivalente a 30 metros, o modelo de bomba a ser considerado para o dimensionamento será a bomba submersa.

Utilizando o catálogo de bombas da (SCHNEIDER BOMBAS, 2023), procurando na seção de bombas submersas com os valores de vazão, altura manométrica, potência e diâmetro de recalque, foi possível encontrar o modelo ideal para o sistema, sendo esta a bomba submersa modelo SUB15-07NY4E6, de 6 estágios com potência de 0,55 W e diâmetro de rotor igual a 79 mm. Na qual, suas informações estão descritas no Anexo B. Seu ponto de operação pode ser observado na figura 4.1.

**Figura 4.1 – Ponto de operação da bomba SUB15-07NY4E6.**



Fonte: Adaptado de:(ELETRIC, 2019)

Como mostrado na figura 4.1, sua curva de rendimento permite a aplicação para esta operação, restando apenas calcular o  $NPSH_{disp}$ . Como informado anteriormente, o  $NPSH_{req}$  deve obter valor abaixo do  $NPSH_{disp}$ , mas, devido à altura de sucção ( $H_{DT}$ ) ser superior a 8 metros, ela opera abaixo da linha da água. Neste modelo, sua altura de sucção tem valor negativo, na qual, considera-se apenas sua altura de recalque.

Ao procurar o valor de  $NPSH_{req}$  no site da fabricante e no catálogo de escolha de bombas, foi observado que em nenhuma de suas fontes demonstravam os valores de NPSH, apenas suas curvas de rendimento e operação. Desta forma, foi realizado o contato com a fabricante do produto para o esclarecimento da falta deste dado nas fontes. Foi recomendado o contato com o setor de engenharia da empresa, na qual foi esclarecido que o valor de  $NPSH_{req}$  de bombas submersas é extremamente baixo devido a seu trabalho ser abaixo da linha da água. Assim, sendo possível considerar o  $NPSH_{disp}$  maior que o  $NPSH_{req}$ .

## 4.7 Cálculo dos módulos fotovoltaicos

Após escolher a bomba, foi possível calcular a energia requerida pela bomba, permitindo encontrar a quantidade de módulos necessários para gerar a energia.

Primeiramente, realizou-se o cálculo da potência elétrica da bomba, equação 16 apresentada na metodologia, capítulo 6, utilizando da potência hidráulica dividida pela sua eficiência. Após o cálculo, foi encontrado o valor de 773,9 W.

Com a potência elétrica requerida calculada, o próximo passo é encontrar a média de insolação diária da localidade a ser instalada a bomba e os painéis. Para encontrar estes dados, foi utilizado o programa *Sun-Data*, disponível no site (CRESEB, 1974), onde foi inserido as coordenadas de latitude e longitude da propriedade e forneceu os dados descritos na tabela 4.6.

**Tabela 4.6 – Dados e resultados para o cálculo do painel fotovoltaico.**

Estação	Latitude (°)	Longitude (°)	Distância (km)	Média ( $kW/m^2.dia$ )
Divinópolis, MG	20,201° S	44,849° O	2,3	5,14
Divinópolis, MG	20,201° S	44,849° O	8,3	5,12
Divinópolis, MG	20,201° S	44,849° O	10,7	5,17

Fonte: Adaptado de (CRESEB, 1974)

O módulo fotovoltaico escolhido para o dimensionamento da bomba hidráulica foi o modelo CS6W-535 da empresa *Canadian Solar*, na qual possui uma eficiência de 20,7 % e potência nominal de 535 W (SOLAR, 2023). Na tabela 4.7, é possível observar os dados aplicando os valores às equações 18, 19 20 apresentados na metodologia, capítulo 6, e os resultados obtidos após os cálculos das equações.

**Tabela 4.7 – Dados e resultados para o cálculo do painel fotovoltaico.**

Dado	Valor	Unidade
Potência elétrica da bomba ( $P_{el}$ )	773,9	(W)
Insolação média diária ( $HSP_{med}$ )	5140	( $Wh/m^2.dia$ )
Área do módulo ( $A_m$ )	2,53	( $m^2$ )
Eficiência do módulo ( $\eta_m$ )	0,207	(%)
Período de insolação (T)	8	(h)
Energia gerada ( $E_{ger}$ )	2690	(W)
Energia requerida (E)	6190	(W)
Número de módulos ( $N^\circ$ )	2	(unidade)

Fonte: Próprio autor

## 4.8 Resultados ferramenta *Jupyter Notebook*

Após finalizar a entrada dos dados necessários presentes na tabela 4.8, a ferramenta retornará os dados do dimensionamento da bomba hidráulica, presentes na tabela 4.9.

**Tabela 4.8 – Tabela de entrada para o dimensionamento na ferramenta *Jupyter Notebook*.**

Dado	Valor	Unidade
Largura da horta L	55	(m)
Comprimento da horta C	100	(m)
Largura do canteiro $L_c$	0,9	(m)
Largura da rua $L_r$	0,35	(m)
Período de funcionamento da bomba T	8	(horas)
Diâmetro comercial do tubo $D_{comer}$	35,2	(m)
Altura de sucção da boma $H_{st}$	30	(m)
Altura dinâmica (para o NPSH o valor será negativo) $H_{dt}$	1	(m)
Altura da bomba ao reservatório $H_g$	4	(m)
Rugosidade do tubo $\epsilon$	0,0015	(m)
Distância longitudinal da bomba ao reservatório $L_{eq}$	15	(m)
Eficiência da bomba escolhida $\eta_m$	0,53	(%)
Insolação média diária do local $HSP_{med}$	5,14	( $kWh/mm^2$ )
Área de captação solar do módulo $A_{mod}$	2,526	( $m^2$ )
Eficiência do módulo $\eta_{mod}$	0,207	(%)

Fonte: Próprio autor

**Tabela 4.9 – Dados de saída para o dimensionamento na ferramenta *Jupyter Notebook*.**

Dado	Valor	Unidade
Área da horta a ser irrigada (AEPPH)	3.960	( $m^2$ )
Vazão (Q)	3,96	( $m^3/s$ )
Diâmetro da tubulação (D)	0,033	(m)
Altura manométrica ( $H_m$ )	38,8	(m)
Potência hidráulica ( $P_h$ )	410,17	(W)
NPSH	$NPSH_{req} \leq NPSH_{disp}$	adimensional
Modelo de bomba	Submersa	adimensional
Energia gerada ( $E_{ger}$ )	2690	(W)
Energia requerida (E)	6190	(W)
Número de módulos ( $N^\circ$ )	2	(unidade)

Fonte: Próprio autor

Os dados de retorno fornece ao usuário os dados para tomadas de decisões e os materiais necessários para realizar a instalação da bomba hidráulica. São eles a vazão necessária para umidificar os canteiros, o diâmetro da tubulação a ser utilizada para o dimensionamento, a altura manométrica para a escolha da bomba hidráulica a ser

implementada no sistema e a quantidade de módulos a ser empregados para a alimentação da bomba.

O programa pode ser utilizado para o dimensionamento de bombas centrífugas, tomando os devidos pontos de atenção como a altura de sucção da bomba ( $H_{DT}$ ) e o valor de  $NPSH_{req}$ , disponibilizado pela fabricante da bomba.

## 5 CONCLUSÃO

Para este trabalho de conclusão de curso, foram realizados os estudos bibliográficos pertinentes para o dimensionamento de bombas hidráulicas e sistemas de recalque, utilizando de uma fonte energética limpa e sustentável, a energia fotovoltaica. Também foi construído um programa na linguagem de programação *Python*, utilizando da ferramenta *Jupyter Notebook*, na qual, é possível utilizá-la para o dimensionamento de dois modelos de bombas de deslocamento não positivo: as centrífugas e as submersas.

Vale ressaltar que, a partir da altura de sucção da bomba (altura dinâmica  $H_{DT}$ ), é possível eliminar uma gama de bombas a ser escolhida no catálogo do fabricante, além da atenção a ser disponibilizada para escolher o modelo ideal e eficiente para a operação. Na qual, caso ocorra a escolha errada do componente, conseqüentemente acarretará danos à bomba, ocorrendo cavitação para as situações de  $NPSH_{disp} \leq NPSH_{req}$ , aumento de pressão no rotor e na tubulação, causado pela sucção de ar ao invés de água, além dos prejuízos financeiros propiciados pela má operação.

A utilização da linguagem de programação para este trabalho foi de extrema importância para realizar o dimensionamento da bomba hidráulica. Visto que, após a montagem do código de programação, o dimensionamento pode ser realizado com as simples entradas dos dados requisitados durante a execução do programa. Desta forma, usuários com pouco conhecimento teórico em hidráulica e mecânica dos fluidos, conseguem dimensionar uma bomba hidráulica para elevar o recurso hídrico disponível não só de poços artesianos, mas também de cisternas rasas, lagos, açudes e rios.

Para o êxito do dimensionamento, foi necessário obter, além dos conhecimentos em hidráulica, mecânica dos fluidos, radiação solar e técnicas de preparo de hortas, a linguagem de programação *Python*. Este, quando construído com as especificações e restrições necessárias para os cálculos e tomadas de decisões, permite que o usuário insira os dados de entrada nos campos de preenchimento de dados, efetuando os cálculos de forma simples e fornecendo após a compilação do programa as respostas para a tomada de decisões. Em contrapartida, sua estrutura pode ser complexa para um usuário sem os prévios conhecimentos na linguagem de programação.

A metodologia empregada no trabalho, se seguida corretamente, retornará as informações necessárias para a tomada de decisões e dimensionamento da bomba hidráulica. Assim, partindo do cálculo de área a ser irrigada, apresentando por consequência a demanda de água (utilizando a demanda de água ótima de 8 litros de água por metro quadrado

irrigado), até o dimensionamento do painel fotovoltaico que alimentará a bomba. Entretanto, a metodologia se limita a apenas os tipos de bomba, sendo elas a centrífuga e a submersa. Porém, estes são os mais utilizados para a operação proposta para o estudo de caso.

Ao aplicar os critérios adotados pela metodologia a um estudo de caso, foi possível dimensionar a bomba hidráulica para ser aplicada em uma propriedade rural, na cidade de Divinópolis, MG, sendo ela o tipo de bomba submersa modelo SUB15-07NY4E6. Esta, atende os parâmetros de 8 litros de água por metro quadrado, obtendo uma potência hidráulica de 410,17 W e altura manométrica equivalente a 38,8 metros. Também foi calculado o número de painéis fotovoltaicos necessários para a geração de energia para alimentar a bomba, partindo da energia requerida de 6,190 kW para alimentar a bomba no período de 8 horas utilizando dois módulos do modelo CS6W-535 da empresa *Canadian Solar*.

Devido ao trabalho ter o objetivo de dimensionar uma bomba hidráulica para ser aplicada em um sistema de irrigação, sendo alimentada por um sistema de geração de energia fotovoltaica, os resultados obtidos para o estudo de caso aplicado a esta metodologia são considerados satisfatórios. Vale salientar que, a utilização do estudo de caso para ser aplicado à metodologia, cumpriu com os objetivos propostos de dimensionamento da bomba hidráulica e do sistema fotovoltaico propostos no início deste trabalho de conclusão de curso.

## 5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Durante as pesquisas bibliográficas realizadas para fundamentar o presente trabalho de conclusão de curso, foi observado os diversos níveis de estudos e aprimoramentos do programa em linguagem *Python* pertinentes para este projeto. Na qual podem ser listados:

- Realizar o dimensionamento de um rotor específico para a bomba hidráulica;
- Ampliar o código de programação para a sua utilização em dimensionamento de outros tipos de bombas.

## REFERÊNCIAS

BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S.; INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. **Mecânica dos fluidos, Fundamentos e Aplicações**. Porto Alegre: AMGH, 2012.

CERQUEIRA, G. D. d. **Modelagem dinâmica não linear de turbina *Francis* a partir de dados de ensaio de modelo reduzido**. 2018.

CRESEB, C. d. R. p. a. E. S. e. E. S. d. S. B. ***Sun-Data***. 1974. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata&>>.

DIAS, L. C. **Avaliação do efeito do volume da câmara de ar combinado com a frequência de bombeamento em um carneiro hidráulico**. 2020.

ELETRIC, F. **Case**. 2019. Disponível em: <<https://fe-case.com.br/search/share/87207605-00>>.

EPE. **Balanco Energético Nacional:Relatório síntese: ano base 2022**. Brasília, DF: Empresa de pesquisa energética, 2023.

FEDRIZZI, M. C. **Fornecimento de água com sistemas de bombeamento fotovoltaicos: Dimensionamento simplificado e análise de competitividade para sistemas de pequeno porte**. 1997.

FLORES, A. A. B. **Dimensionamento de bombeamento hidráulico para elevação de água alimentado por energia solar fotovoltaico**. 2019.

FRANKLIN ELETRIC. **Tabela de seleção de bombas**. Joinville, 2023. Disponível em: <[https://schneidermotobombas.blob.core.windows.net/media/321009/schneider\\_tabela\\_selecao\\_2023-05\\_web.pdf](https://schneidermotobombas.blob.core.windows.net/media/321009/schneider_tabela_selecao_2023-05_web.pdf)>. Acesso em: 18 jun. 2023.

GOLDEMBERG, J. **Energia e desenvolvimento sustentável. São Paulo: Blucher, 2010. Série Sustentabilidade Vol. 4. Gestão & Regionalidade**, v. 27, n. 79, 2011.

GUEDES, H. A. S. **Hidr'aulica**. 2018.

HENN, É. A. L. **Máquinas de Fluido**. 2. ed. Santa Maria, publisher=editora ufsm: [s.n.], 2006.

JIMÉNEZ, J. P. V. **Projeto e dimensionamento de um sistema fotovoltaico isolado/conectado à rede para atender a demanda de irrigação de uva**. 2017.

JUSTINO, D.; NOGUEIRA, É. **Dimensionamento do Sistema de Recalque para abastecimento de água da comunidade de Macundí, distrito de São Marcos, município de Rio Claro, Rio de Janeiro. Cadernos UniFOA. BR, SciELO Brasil**, v. 18, p. 11–25, 2012.

- KLEINPAUL, É. H. **Dimensionamento de um sistema de recalque de água através de energia solar**. 2015.
- KRAULICH, C. V.; OST, A. P.; MICHELS ADEMAR, j. v. y. **Dimensionamento emodelagem computacional das pás de uma turbina *Pelton* para ser aplicada a uma bancada didática**.
- MACINTYRE, A. J. **Bombas e instalações de bombeamento**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1997.
- MEDEIROS, P. H. S. **Dimensionamento e análise de viabilidade econômica de um sistema solar fotovoltaico residencial conectado à rede elétrica em Arcos - MG**. 2018.
- MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **CIRCULAR TÉCNICA 14**. Sete Lagoas, 2001. Disponível em: <[http://docsagencia.cnptia.embrapa.br/milho/circular\\_14-selecao\\_do\\_sistema\\_de\\_irrigacao.pdf](http://docsagencia.cnptia.embrapa.br/milho/circular_14-selecao_do_sistema_de_irrigacao.pdf)>. Acesso em: 27 abr. 2022.
- MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Comunicado TÉCNICO 39**. Brasília, 2006. Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/780884/1/cot39.pdf>>. Acesso em: 16 set. 2022.
- NASCIMENTO, T. C.; MENDONÇA, A. T. B. B. d.; CUNHA, S. K. d. **Inovação e sustentabilidade na produção de energia: o caso do sistema setorial de energia eólica no Brasil**. **Cadernos EBAPE. BR**, SciELO Brasil, v. 10, p. 630–651, 2012.
- NETTO, A.; FERNANDEZ, M. F. y.; ARAUJO, R. d.; ITO, A. E. **Manual de hidráulica**. 8. ed. São Paulo: Edgar Blücher LTDA, 1998.
- NUNES, V. S. **Eficiência de módulos fotovoltaicos na superfície da água e submersos: Avaliação por meio de modelos térmicos computacionais**. 2021.
- SANTOS, R. C. L. d. **Análise de cavitação em uma turbina hidráulica do tipo *Kaplan***. 2013.
- SANTOS, S. L. d. **Bombas & instalações hidráulicas**. Única. São Paulo: LCTE Editora, 2007.
- SOLAR, C. **HiKu6 Mono PERC CS6W-535**. 2023. Disponível em: <[https://static.csisolar.com/wp-content/uploads/sites/9/2023/09/26103742/CS-Datasheet-HiKu6\\_CS6W-MS\\_v2.8\\_EN-2278mm-1.pdf](https://static.csisolar.com/wp-content/uploads/sites/9/2023/09/26103742/CS-Datasheet-HiKu6_CS6W-MS_v2.8_EN-2278mm-1.pdf)>.
- SOUZA, J. C. d. **Desenvolvimento de aplicativo de análise técnica e econômica para adaptação de uma roda d'água acionada por cima para geração de energia elétrica no meio rural**. 2011.
- TESTEZLAF, R. **Irrigação: métodos, sistemas e aplicações**. Faculdade de Engenharia Agrícola Unicamp-FEAGRI, 2011.
- TIGRE TUBOS E CONEXÕES. **Orientações de instalações de Água Fria**. Joinvile, 2016. Disponível em: <<https://tigresite.s3.amazonaws.com/2021/10/ct-agua-fria.pdf>>. Acesso em: 23 jun. 2023.

ZILLES, R.; MACÊDO, W. N.; GALHARDO, M. A. B.; OLIVEIRA, S. H. F. de.  
**Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica.** 1. ed. São Paulo: Oficina de  
textos, 2016.

# APÊNDICE A – CÓDIGO DE DIMENSIONAMENTO DA BOMBA

## DIMENSIONAMENTO DE BOMBA PARA IRRIGAÇÃO UTILIZANDO UM SISTEMA FOTOVOLTAICO

Cálculo da área a ser irrigada e da demanda de água:

Cálculo da área total da horta;

$$ATH = L \cdot C$$

Cálculo da área total utilizada na horta;

$$\%ATSU = \left(\frac{LR}{LEC}\right) \cdot 100$$

Cálculo da largura do canteiro (entre 0,9 m e 1,2 m)

$$AOR = \left(\frac{\%ATSU}{100}\right) \cdot ATH$$

Cálculo da área efetiva da horta;

$$AEPPH = ATH - AOR$$

```

•[1]: import math
      #Dados de entrada
      L=float(input("Digite a largura da horta (m): ")) #Largura da horta (m)
      C=float(input("Digite o comprimento da horta (m): ")) #Comprimento da horta (m)
      Lc=float(input("Digite a largura do canteiro entre 0,9 m e 1,2 (m): ")) #Largura do canteiro (m)
      Lr=float(input("Digite a largura da rua 0,3 m a 0,5 m (m): ")) #Largura da rua (m)
      Agua=float(input("Digite o volume de água (m^3): ")) #Volume de água (m^3)

      #Determinando a área a ser irrigada no canteiro

      ATH=L*C #Área total da horta (m^2)
      LEC=Lc+Lr #Largura efetiva do canteiro (m)
      ATSU=(Lr/LEC)*100 #Percentual da área não utilizada
      AOR=(ATSU/100)*ATH #Área da horta ocupada (m^2)
      AEPPH=ATH-AOR

      print("Área da horta a ser irrigada: AEPPH = ", "{0:0.2f}" .format(AEPPH), '(m^2)')

      Au=AEPPH*Agua #Volume de água para umidificação correta (m^3)

      print("Volume de água necessário para irrigação: Au = ", "{0:0.2f}" .format(Au), '(m^3)')

      Digite a largura da horta (m): 55
      Digite o comprimento da horta (m): 100
      Digite a largura do canteiro entre 0,9 m e 1,2 (m): 0.9
      Digite a largura da rua 0,3 m a 0,5 m (m): 0.35
      Digite o volume de água (m^3): 0.008
      Área da horta a ser irrigada: AEPPH = 3960.00 (m^2)
      Volume de água necessário para irrigação: Au = 31.68 (m^3)

```

### Cálculo da vazão

Calculando a vazão necessária para irrigar a presente no trabalho;

$$Q = V \cdot A$$

```

[2]: #Determinando a vazão da água

      #Será o volume diário por m^3 dividido pelo período de insolação

      T=float(input("Digite Período de insolação em horas (h): ")) #Período de insolação em horas (h)
      Q=Au/T #Vazão em m^3/h

      print("Vazão de água necessária: Q = ", "{0:0.2f}" .format(Q), '(m^3/h)')

      Digite Período de insolação em horas (h): 8
      Vazão de água necessária: Q = 3.96 (m^3/h)

```

### Determinação do diâmetro da tubulação

Calculando o diâmetro da tubulação a ser utilizada no sistema.

$$D = 1,3 \cdot \sqrt[4]{\frac{T}{24}} \cdot \sqrt{Q}$$

```
[3]: #Determinação do diâmetro da tubulação (m)
Dr=1.3*((T/24)**(1/4))*((Q/3600)**(1/2)) #(m)
print("Diâmetro da tubulação: Dr = ", "{0:0.3f}".format(Dr), '(m)')
Diâmetro da tubulação: Dr = 0.033 (m)
```

Determinação da velocidade

Calculando a velocidade do fluido na tubulação.

$$v = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D^2}$$

```
•[4]: #Determinando a velocidade para atestar se será compatível o diâmetro do tubo (m/s)
#Tubo comercial mais próximo é de 40 mm (diâmetro nominal de 35,2 mm e diâmetro externo compatível
#com 1.1/2"
Dcomer=float(input("Digite o diâmetro comercial do encanamento disponível '(m)': ")) #Diâmetro
#comercial disponívelno mercado (m)
veco=(4*(Q/3600))/(math.pi*((Dcomer)**2))
print("Velocidade econômica: veco = ", "{0:0.2f}".format(veco), '(m/s)')
Digite o diâmetro comercial do encanamento disponível '(m)': 0.0352
Velocidade econômica: veco = 1.13 (m/s)
```

Cálculo da altura manométrica do sistema

Cálculo da altura do sistema, exceto as perdas.

$$H_m = H_{ST} + H_{DT} + H_g + h_p$$

```

•[5]: #Determinando a altura do sistema
#A altura do sistema será de acordo com os dados obtidos durante a pesquisa realizada com os
#produtores feirantes
Hst=float(input("Digite a altura estática (m): ")) #Altura estática do poço (m)
HDT=float(input("Digite a altura dinâmica (m): ")) #Altura dinâmica do poço (m)
Hg=float(input("Digite a altura do reservatório (m): ")) #Altura da bomba ao reservatório (m)
Hsist=Hst+HDT+Hg #Altura do sistema (m)
print("Altura do sistema: Hsist = ", "{0:0.2f}" .format(Hsist), '(m)')

Digite a altura estática (m): 30
Digite a altura dinâmica (m): 1
Digite a altura do reservatório (m): 4
Altura do sistema: Hsist = 35.00 (m)

```

Calculando a perda de carga causada pelos elementos da tubulação.

$$h_p = f \cdot \frac{L \cdot V^2}{D \cdot 2g} + K_L \cdot \frac{V^2}{2g}$$

```

•[6]: #Cálculo das perdas de carga a partir dos elementos
rho=1000 #Densidade da água (kg/m^3)
vag=1*(10**(-6)) #Viscosidade cinemática da água
g=9.81 #Aceleração da gravidade (m/s^2)
Pcelm=float(input("Digite a Perda de carga por elemento (m): ")) #Perda de carga por elemento (m)
Qelementos=float(input("Digite a Quantidade de elementos (Unidade): ")) #Quantidade de elementos
#(Unidade)
K=Pcelm*Qelementos #Coeficiente de perda de cargas (m)
epsilon=float(input("Digite a rugosidade dos tubos de PVC comerciais (mm): ")) #Rugosidade dos tubos
#de PVC comerciais (mm)
hpel=K*(((veco)**2)/(2*g)) #Perda de carga dos elementos (m)
print("Perdas elementos: hpel = ", "{0:0.3f}" .format(hpel), '(m)')

Digite a Perda de carga por elemento (m): 2
Digite a Quantidade de elementos (Unidade): 3
Digite a rugosidade dos tubos de PVC comerciais (mm): 0.0015
Perdas elementos: hpel = 0.391 (m)

```

Cálculo do número de *Reynolds*.

$$Re = \frac{v \cdot D}{\nu}$$

```

[7]: #Calculando o número de Reynolds para o escoamento
Re=(veco*Dr)/vag #Número de reynolds
print("Número de Reynolds: Re = ", "{0:0.2f}" .format(Re), '(Admensional)')

Número de Reynolds: Re = 37031.97 (Admensional)

```

Cálculo do fator de atrito.

$$f = 0,0055 \cdot \left( 1 + \left( 2000 \cdot \frac{\epsilon}{D} + \frac{10^6}{Re} \right)^{\frac{1}{3}} \right)$$

```
[8]: #Cálculo do fator de atrito
f=(0.0055)*(1+((20000*(epsilon/32))+((1*(10**6))/Re)**(1/3))) #Fator de atrito (adimensional)
print("Fator de atrito: f = ", "{0:0.2f}".format(f), '(m)')

Fator de atrito: f = 0.03 (m)
```

Cálculo das perdas de carga da tubulação.

$$h_p = f \cdot \frac{L \cdot V^2}{D \cdot 2g} + K_L \cdot \frac{V^2}{2g}$$

```
[9]: #Calculando as perdas de carga da tubulação
Leq=float(input("Digite a distância longitudinal da bomba ao reservatório (m): ")) #Distância
#Longitudinal da bomba ao reservatório (m)
hptub=f*((Leq*(veco**2))/(Dr*2*g)) #Perdas de carga na tubulação (m)
print("Perdas de cargas da tubulação: hptub = ", "{0:0.2f}".format(hptub), '(m)')

Digite a distância longitudinal da bomba ao reservatório (m): 15
Perdas de cargas da tubulação: hptub = 0.81 (m)
```

Cálculo das perdas do sistema

```
[10]: #Cálculo da perda de carga total do sistema (m)
Hp=hpel+hptub #Perda de carga total do sistema (m)
print("Perda total do sistema: Hp = ", "{0:0.2f}".format(Hp), '(m)')
#Altura manométrica do sistema (adicionado um fator de segurança de 5%)
Hm=(Hsist+Hp)*1.05
print("Altura manométrica: Hm = ", "{0:0.2f}".format(Hm), '(m)')

Perda total do sistema: Hp = 1.20 (m)
Altura manométrica: Hm = 38.01 (m)
```

Cálculo da potência hidráulica

Calculando a potência hidráulica para determinar a bomba hidráulica.

$$P_h = \frac{Q \cdot \rho \cdot g \cdot H_m}{3600 \cdot 1000}$$

```
[11]: #Encontrando a potência hidráulica da bomba
Ph=(Q*rho*g*Hm)/(3600*1000) #Potência hidráulica kW
print("Potência hidráulica: Ph = ", "{0:0.5f}" .format(Ph), '(kW)')

Potência hidráulica: Ph = 0.41017 (kW)
```

## Dimensionamento da bomba

Determinando o tipo de bomba a ser utilizado.

```
•[12]: #Determinando a bomba a ser utilizada
#A bomba a ser escolhida deve atender aos critérios encontrados anteriormente como vazão, altura
#manométrica e diâmetro hidráulico
if HDT+Hst<8: #Hdt<=8 m será uma bomba centrífuga
    print("Modelo de bomba centrífuga")
else:
    print("Modelo de bomba submersa")
#Hdt>8 m será uma bomba submersa

Modelo de bomba submersa
```

Calculando a potência elétrica da bomba

$$P_{el} = \frac{P_h}{\eta_m}$$

```
•[13]: #Calculando a potência elétrica da bomba
eta=float(input("Digite a eficiência da bomba em números decimais (%): ")) #Eficiência da bomba
#com vazão de 3.96 m/s (%)
Pel=Ph/eta #Potência elétrica (kW)
print("Potência elétrica: Pel = ", "{0:0.5f}" .format(Pel), '(kW)')

Digite a eficiência da bomba em números decimais (%): 0.53
Potência elétrica: Pel = 0.77391 (kW)
```

Calculando o NPSH disponível da bomba e comparando ao NPSH requerido. (OBS: para as bombas submersas, o NPSH disponível é considerado maior que o NPSH requerido). No estudo de caso, o tipo de bomba pertinente ao projeto é o tipo submersa ( $NPSH_{req} \leq NPSH_{disp}$ ).

$$NPSH_{disp} = H_{atm} - \left( \pm H_s + H_v + \Delta H + \frac{v^2}{2 \cdot g} \right)$$

```

•[14]: #Determinando o NPSH quando o modelo de bombas atende aos parâmetros de 0.1<Hst<=8
Hsuc=-1 #Altura entre a bomba e a boca e entrada da água (m)
if 0.1<Hsuc<8:
    deltaH=Hp #Perdas de sucção (m)
    Hatm=float(input("Digite o valor da pressão atmosférica do local (m): ")) #Pressão atmosférica
    #do ar de acordo com a altura (m);
    Hv=float(input("Digite o valor de pressão de vapor em função da temperatura (m): ")) #Pressão
    #de vapor da água (m);
    Hreq=float(input("Digite a altura de sucção total (m): "))
    NPSHdisp=(Hatm-(Hst+Hv+deltaH+(((veco)**2)/(2*g))))*(-1)
    print("NPSHdisp: NPSHdisp = ", "{0:0.2f}" .format(NPSHdisp),)
if Hsuc<0:
    NPSHreq=0
    NPSHdisp=1
    print("Valor baixo de NPSHreq: NPSHreq < NPSHdisp")
#O NPSH requerido é fornecido pela fabricante da bomba
if 0.1<Hsuc<8:
    if NPSHreq<NPSHdisp:
        print("Operação satisfatória: não ocorrerá cavitação.")
    if NPSHreq>NPSHdisp:
        print("Operação não satisfatória: ocorrerá cavitação. Escolher outro modelo de bomba!")
if Hsuc<0:
    print("Operação satisfatória: não ocorrerá cavitação.")

Valor baixo de NPSHreq: NPSHreq < NPSHdisp
Operação satisfatória: não ocorrerá cavitação.

```

### Definição do painel fotovoltaico

Inserir-se a latitude e longitude no site da Cresesbe acessando o seguinte link:

<<http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata&>>

Encontre a média de insolação diária e aplique na seguinte equação

$$E_{ger} = HSP \cdot A_m \cdot \eta_m$$

$$E = P_{el} \cdot T$$

$$N^{\circ} = \frac{E}{E_{ger}}$$

```

•[15]: #Determinando o recurso solar
#Insere-se a Latitude e Longitude no site da Cresesbe acessando o seguinte link:
print("Inserir latitude e longitude do local em http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata&")
#Encontre a média de insolação diária e aplique na seguinte equação
HSPmed=float(input("Digite a irradiação média diária do local (kWh/m^2) : ")) #Insolação média
#diária do Local (kWh/m^2)
Amod=float(input("Digite a área do módulo fotovoltaico (m^2) : ")) #Área do módulo fotovoltaico
#(m^2)
eficmod=float(input("Digite a eficiência do módulo fotovoltaico em número decimal (%) : "))
#Eficiência do módulo fotovoltaico (%)
Eg=(HSPmed*Amod*eficmod)/1000 # energia gerada pela placa fotovoltaica (kW)
print("Energia gerada: Eg = ", "{0:0.2f}".format(Eg), '(kW)')
#Calculando a quantidade energia requerida para o sistema
E=Pel*T #Energia requerida pela bomba hidráulica (kW)
print("Eenergia requerida: E = ", "{0:0.2f}".format(E), '(kW)')
#Determinando a quantidade de módulos
Nmod=E/Eg #Número de módulos necessários
print("Número de módulos: Nmod = ", "{0:0.0f}".format(Nmod), '(módulos)')

```

```

Inserir latitude e longitude do local em http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata&
Digite a irradiação média diária do local (kWh/m^2) : 5140
Digite a área do módulo fotovoltaico (m^2) : 2.526
Digite a eficiência do módulo fotovoltaico em número decimal (%) : 0.207
Energia gerada: Eg = 2.69 (kW)
Eenergia requerida: E = 6.19 (kW)
Número de módulos: Nmod = 2 (módulos)

```

# ANEXO A – DADOS COMPLEMENTARES

**Perdas de carga localizadas - Sua equivalência em metros de tubulação de PVC rígido**

DE (mm)	D. ref. (pol.)	Joelho 90°	Joelho 45°	Curva 90°	Curva 45°	Tê 90° Passagem Direita	Tê 90° Saída de lado	Tê 90° Saída Bilateral	Entrada Normal	Entrada de Borda	Saída de Canalização	Válvula de Pé e Crivo	Válvula de Retenção Tipo Leve	Válvula de Retenção Tipo Pesado	Registro de Globo Aberto	Registro de Gaveta Aberto	Registro de Ângulo Aberto
20	½"	1,1	0,4	0,4	0,2	0,7	2,3	2,3	0,3	0,9	0,8	8,1	2,5	3,6	11,1	0,1	5,9
25	¾"	1,2	0,5	0,5	0,3	0,8	2,4	2,4	0,4	1,0	0,9	9,5	2,7	4,1	11,4	0,2	6,1
32	1"	1,5	0,7	0,6	0,4	0,9	3,1	3,1	0,5	1,2	1,3	13,3	3,8	5,8	15,0	0,3	8,4
40	1¼"	2,0	1,0	0,7	0,5	1,5	4,6	4,6	0,6	1,8	1,4	15,5	4,9	7,4	22,0	0,4	10,5
50	1½"	3,2	1,3	1,2	0,6	2,2	7,3	7,3	1,0	2,3	3,2	18,3	6,8	9,1	35,8	0,7	17,0
60	2"	3,4	1,5	1,3	0,7	2,3	7,6	7,6	1,5	2,8	3,3	23,7	7,1	10,8	37,9	0,8	18,5
75	2½"	3,7	1,7	1,4	0,8	2,4	7,8	7,8	1,6	3,3	3,5	25,0	8,2	12,5	38,0	0,9	19,0
85	3"	3,9	1,8	1,5	0,9	2,5	8,0	8,0	2,0	3,7	3,7	26,8	9,3	14,2	40,0	0,9	20,0
110	4"	4,3	1,9	1,6	1,0	2,6	8,3	8,3	2,2	4,0	3,9	28,6	10,4	16,0	42,3	1,0	22,1

Fonte: (TIGRE, 2016)

## A.1 Valores para os condutos e propriedades da água

Dado	Valor	Unidade
Densidade da água ( $\rho$ )	10000	( $kg/m^3$ )
Viscosidade cinemática da água $\nu$	$1 \times 10^{-6}$	(mm)
Rugosidade dos condutos de PVC ( $\epsilon$ )	0,0015	(mm)

Fonte: Adaptado de: (FLORES, 2019)


Figura A.1 – Disponibilidade de insolação local ( $HSP_{med}$ ).

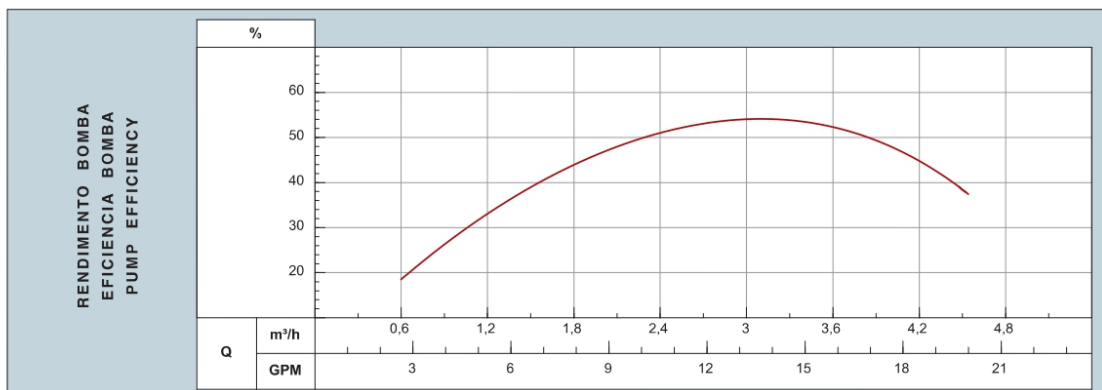
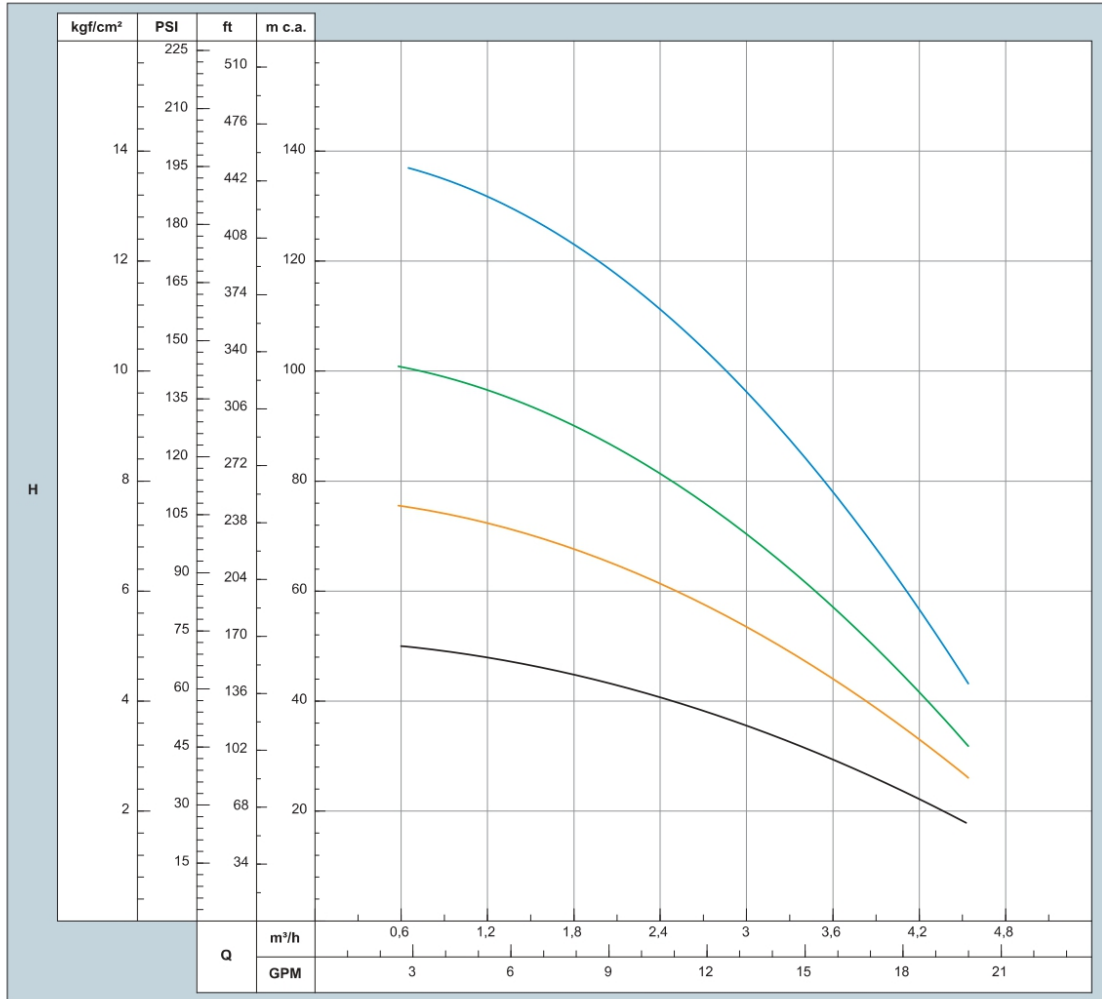
Latitude: 20,195463° S  
Longitude: 44,870224° O

#	Estação	Município	UF	País	Irradiação solar diária média [kWh/m <sup>2</sup> .dia]													Média	Delta		
					Latitude [°]	Longitude [°]	Distância [km]	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out			Nov	Dez
✓	Divinópolis	Divinópolis	MG	BRASIL	20,201° S	44,849° O	2,3	5,84	6,00	5,11	4,87	4,26	4,08	4,32	5,20	5,46	5,61	5,32	5,64	5,14	1,92
✓	Divinópolis	Divinópolis	MG	BRASIL	20,201° S	44,949° O	8,3	5,75	5,94	5,08	4,88	4,30	4,09	4,36	5,19	5,45	5,56	5,28	5,62	5,12	1,86
✓	Divinópolis	Divinópolis	MG	BRASIL	20,101° S	44,849° O	10,7	5,88	6,03	5,14	4,92	4,28	4,11	4,34	5,25	5,48	5,58	5,33	5,65	5,17	1,92

Fonte: (CRESEB, 1974)

# ANEXO B – DADOS DA BOMBA

	MODELO	SUB 15 NY	76016	60 Hz		
	MODEL			II polos/poles		
Sucção / Succión / Suction	-	Potência / Potencia / Power [kW(cv)]	0,37 (1/2)	0,55 (3/4)	0,75 (1)	1,1 (1,5)
Recalque / Descarga / Discharge	1 1/4"	Rotor / Impulsor / Impeller [mm]	79	79	79	79
		Estágios / Etapas / Stages	4	6	8	11



Obs.: - Curvas características conforme ISO 9906 anexo "A".  
 - Desempenho hidráulico de acuerdo a la ISO 9906 anexo "A".  
 - Hydraulic performance according to ISO 9906 annex-A.

Revisão 00 - Abril/2010