

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

JOÃO VITOR DE SOUSA GOMES

**PROJETO DE SISTEMA DE IRRIGAÇÃO PARA UMA PROPRIEDADE RURAL
NA REGIÃO SUDOESTE DO MARANHÃO**

PATO BRANCO

2025

JOÃO VITOR DE SOUSA GOMES

**PROJETO DE SISTEMA DE IRRIGAÇÃO PARA UMA PROPRIEDADE RURAL
NA REGIÃO SUDOESTE DO MARANHÃO**

**Irrigation System Project for a Rural Property in the Southwest Region of
Maranhão**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica do Curso de Bacharelado em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Joviano Janjar Casarin

PATO BRANCO

2025



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

JOÃO VITOR DE SOUSA GOMES

**PROJETO DE SISTEMA DE IRRIGAÇÃO PARA UMA PROPRIEDADE RURAL
NA REGIÃO SUDOESTE DO MARANHÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Mecânica
do Curso de Bacharelado em Engenharia
Mecânica da Universidade Tecnológica Federal
do Paraná.

Data de aprovação: 10 de Fevereiro de 2025

Joviano Janjar Casarin
Doutor
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Luiz Carlos Martinelli Junior
Doutor
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Fabiano Ostapiv
Doutor
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

PATO BRANCO
2025

Dedico este trabalho a Deus e a minha mãe
que apesar dos momentos de ausência sempre
me apoiou.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) por proporcionar o ambiente e os recursos necessários para a realização deste trabalho. À minha mãe, Solange Gomes de Sousa, cuja dedicação e apoio incondicional foram fundamentais para a minha jornada acadêmica. Ao meu orientador, Professor Joviano Janja Casarin, que apesar das adversidades e desafios, esteve sempre ao meu lado, oferecendo orientação e encorajamento contínuos. E finalmente a Deus pela força e sabedoria concedidas ao longo deste percurso.

Como disse Albert Einstein, "O conhecimento vem da experiência. Todo o resto é apenas informação." Que esta experiência acadêmica possa contribuir para a construção de um conhecimento sólido e significativo.

Se escuto...
esqueço.

Se vejo...
recordo.

Se faço...
Sei!

Confúcio (552 a.C.)

RESUMO

SOUSA, João Vitor. Projeto de Irrigação de uma Propriedade Rural na região sudoeste do Maranhão. 2024. 19 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2024. Este trabalho explora um sistema de irrigação para uma propriedade rural em Imperatriz, Maranhão, enfrentando o desafio de abastecimento hídrico limitado. Através de um dimensionamento hidráulico cuidadoso, incluindo o cálculo de evapotranspiração e perdas de carga, foi possível selecionar e dispor adequadamente os componentes do sistema, como válvulas, aspersores e bombas, garantindo uma distribuição uniforme da água e maximização da eficiência energética. O estudo demonstra a importância de integrar conhecimento técnico com as especificidades locais para criar soluções sustentáveis e eficazes em áreas com restrições de recursos hídricos. Os resultados obtidos servem como base para futuros projetos de irrigação em condições similares, evidenciando a relevância de uma abordagem interdisciplinar na gestão hídrica agrícola.

Palavras-chave: sistema de irrigação; perda de carga; eficiência hídrica; irrigação por aspersão ; consumo de água.

ABSTRACT

SOUSA, João Vitor. Irrigation Project for a Rural Property in the Southwest Region of Maranhão. 2024. 19 f. Final Course Paper – Mechanical Engineering Course, Federal Technological University of Paraná. Pato Branco, 2024. This work developed an irrigation system for a rural property in Imperatriz, Maranhão, addressing the challenge of limited water supply. Through careful hydraulic design, including the calculation of evapotranspiration and pressure losses, it was possible to appropriately select and position the system components, such as valves, sprinklers, and pumps, ensuring uniform water distribution and maximizing energy efficiency. The study demonstrates the importance of integrating technical knowledge with local specificities to create sustainable and effective solutions in areas with limited water resources. The results serve as a basis for future irrigation projects under similar conditions, highlighting the relevance of an interdisciplinary approach to agricultural water management.

Keywords: irrigation system; pressure loss; water efficiency; sprinkler irrigation; water consumption.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Modelo de acoplamento e aspersor	23
Figura 2 – Aspersor	24
Figura 3 – Variação Mensal do Fluxo de Calor Sensível	30
Figura 4 – Fluxo de Radiação Solar	31
Figura 5 – Area do projeto	42
Figura 6 – Gráfico da Curva Vazão x Perda de Carga	50
Figura 7 – Gráfico Curva Característica do Sistema	51
Figura 8 – Curva do Sistema	53
Figura 9 – Gráfico Detalhado da Curva do Sistema	54
Figura 10 – ME-AL/BR-2250	55
Figura 11 – BLA-230/160-120	55
Figura 12 – VSE 32-5-200	56
Figura 13 – Esquema de Operação	66
Figura 14 – Diagrama esquemático do sistema de irrigação	68
Figura 15 – Desenho CAD do Sistema de Irrigação	70
Figura 16 – Etapas de um projeto de irrigacao	72
Figura 17 – Mapa Eolico	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados - Linhas de Aspersão Individuais	28
Tabela 2 – Perda de Carga - Linhas de Aspersão	28
Tabela 3 – Dados - Linhas Derivadas	28
Tabela 4 – Comparação de Tubulações entre Fornecedores	35
Tabela 5 – Comparação de Aspersores entre Modelos	36
Tabela 6 – Comparação de Bombas Centrífugas Consideradas no Trabalho	37
Tabela 7 – Custos de Materiais e Equipamentos do Sistema de Irrigação	38
Tabela 8 – Custo Total do Sistema de Irrigação	39
Tabela 9 – Perda de Carga na Linha de Aspersão - Área 1	47
Tabela 10 – Perda de Carga na Linha de Aspersão - Área 2	47
Tabela 11 – Perda de Carga na Linha de Aspersão - Área 3	47
Tabela 12 – Perda de Carga na Adutora	47
Tabela 13 – Curva Característica do Sistema	53
Tabela 14 – Pontos de Operação das Bombas	54
Tabela 15 – Comparação das Bombas Seleccionadas	56
Tabela 16 – Custo Total do Sistema de Irrigação	57

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Considerações iniciais	12
1.2	Objetivos	13
1.2.1	Objetivo Geral	13
1.2.2	Objetivos Específicos	13
1.3	Justificativa	14
2	REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1	Perda de Carga	16
2.1.1	Perda de Carga em Sistemas de Irrigação	17
2.2	Tipos de Aspersores e Emissores	18
2.3	Método de Irrigação por Aspersão	19
2.4	Dimensionamento de Sistemas de Irrigação por Aspersão	20
2.5	Bomba Centrífuga em Sistemas de Irrigação	20
2.6	Métodos para Otimizar o uso da água no sistema de irrigação da Grama Esmeralda	21
2.6.1	Método de Irrigação por Aspersão	22
2.6.2	Dimensionamento do Sistema de Aspersão	24
2.6.2.1	Cálculos de Perda de Carga	25
2.6.3	Dimensionamento das Tubulações e Seleção da Bomba	25
2.6.4	Perdas de Carga	25
2.7	Bomba Centrífuga	26
2.8	Curva do Sistema	29
2.8.1	Descoberta e Determinação do Fator K na Equação do Sistema	29
2.8.2	Demanda Hídrica	30
2.8.3	Coleta de Dados	31
2.8.4	Cálculos	31
3	MATERIAIS E MÉTODOS	34
3.1	Materiais e Equipamentos	34
3.1.1	Tubulações	35
3.1.2	Conexões e Acessórios	35

3.1.3	Aspersores	36
3.1.4	Medidores de Vazão	36
3.1.5	Válvulas Reguladoras	36
3.1.6	Sensores de Umidade	37
3.1.7	Bombas Centrífugas	37
3.2	Análise de Custo	38
3.2.1	Custos de Materiais e Equipamentos	38
3.2.2	Custos de Instalação	38
3.2.3	Custo Total do Sistema	39
3.2.4	Discussão e Justificativas	39
3.2.5	Viabilidade Econômica	39
<u>3.2.5.1</u>	<u>Cálculo do Aumento da Produtividade</u>	<u>40</u>
<u>3.2.5.2</u>	<u>Cálculo da Redução de Custos Operacionais</u>	<u>40</u>
<u>3.2.5.3</u>	<u>Retorno do Investimento (ROI)</u>	<u>41</u>
<u>3.2.5.4</u>	<u>Conclusão da Viabilidade Econômica</u>	<u>41</u>
3.3	Métodos	41
3.3.1	Área de Estudo	41
3.3.2	Condições de Escoamento	42
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
4.1	Análise das Perdas de Carga	46
4.1.1	Estratégias para Minimizar Perdas de Carga	49
4.2	Gráfico da Curva Vazão x Perda de Carga	49
4.3	Curva Característica	50
4.4	Análise dos Parâmetros Hidráulicos	52
4.5	Modelos de Bombas Selecionados	52
4.5.1	CURVA DO SISTEMA	53
4.5.2	PONTO DE OPERAÇÃO	54
4.5.3	ANÁLISE DA SELEÇÃO DAS BOMBAS	54
4.5.4	Benefícios da Escolha	56
4.6	Viabilidade Econômica	57
4.6.1	Custos Iniciais	57
4.6.2	Benefícios Esperados	57

4.6.3	Discussão	57
5	MANUTENÇÃO SUSTENTABILIDADE	58
5.0.1	Práticas de Manutenção Preventiva	58
5.0.2	Sustentabilidade	58
5.1	Impacto Ambiental	59
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	60
7	CONCLUSÕES	61
	REFERÊNCIAS	63
	APÊNDICE A ESQUEMA DE OPERACAO	66
	APÊNDICE B DIAGRAMA ESQUEMATICO DO SISTEMA DE IRRIGACAO	69
	APÊNDICE C DESENHO CAD DO SISTEMA DE IRRIGACAO	71
	APÊNDICE D ETAPAS DE UM PROJETO DE IRRIGACAO	73
	APÊNDICE E MAPA EOLICO	74

1 INTRODUÇÃO

Este trabalho tem como objetivo estabelecer um sistema de irrigação eficiente, capaz de suprir a demanda hídrica e atender às necessidades de uma propriedade rural localizada em Imperatriz, no estado do Maranhão. O estudo inclui o dimensionamento hidráulico do sistema, a análise dos melhores equipamentos a serem utilizados, a avaliação da área, a determinação da demanda hídrica do local e a disposição estratégica dos componentes do sistema, como válvulas, aspersores, curvas, entre outros.

A propriedade, situada no bairro Santa Lúcia, enfrenta desafios significativos em relação à disponibilidade de água ao longo do ano, com um abastecimento racionado que ocorre, em média, por apenas seis horas diárias. Esta limitação prejudica a manutenção da vegetação local e impõe a necessidade de um sistema de irrigação eficiente que possa otimizar o uso da água disponível e garantir que as necessidades hídricas da propriedade sejam plenamente atendidas, respeitando, ao mesmo tempo, a economia desse recurso vital.

Uma característica importante do solo da região é sua capacidade de armazenamento de água, o que torna a irrigação uma alternativa viável e eficiente. A variação na capacidade de retenção hídrica do solo influencia diretamente a eficácia do aproveitamento da água aplicada por meio da irrigação LEMOS FILHO et al. (2016). Este é um fator crucial para a manutenção da produtividade agrícola e da saúde das culturas cultivadas. Considerando isso, foram realizados cálculos detalhados da evapotranspiração da área, determinando-se a quantidade de água necessária para a criação do melhor arranjo do sistema de irrigação.

O projeto iniciou-se com o levantamento topográfico do terreno, permitindo a determinação de variáveis críticas, como a diferença de altura e a distância entre os pontos de fornecimento de água. Com esses dados, a evapotranspiração foi calculada, e procedeu-se à análise dos dispositivos e acessórios utilizados, buscando identificar a melhor disposição desses elementos no sistema. As perdas de carga, decorrentes da diferença de altura, do comprimento das tubulações e dos acessórios, foram cuidadosamente analisadas. Com base nessas variáveis, a bomba mais adequada ao processo foi selecionada, garantindo a eficiência operacional do sistema.

1.1 Considerações iniciais

As considerações iniciais deste trabalho têm como objetivo apresentar uma visão geral sobre a importância da irrigação eficiente em propriedades rurais, especialmente em regiões com limitações hídricas, como é o caso do sudoeste do Maranhão. A agricultura, em especial a de pequena e média escala, depende fortemente de um manejo adequado dos recursos hídricos para garantir a produtividade e a vida útil das culturas. Nesse contexto, a otimização do uso da água torna-se essencial para a sustentabilidade econômica e ambiental das atividades agrícolas.

O objeto deste trabalho é o desenvolvimento de um sistema de irrigação por aspersão, projetado para atender às necessidades específicas de uma propriedade rural na região mencionada. A proposta é fundamentada em metodologias técnicas e conceitos teóricos consolidados, como o cálculo da evapotranspiração, o dimensionamento hidráulico e a análise de perdas de carga. Esses elementos são essenciais para a concepção de um sistema que, além de eficiente, seja adaptado às particularidades climáticas e topográficas da área de estudo.

Este trabalho se insere em um contexto de crescente preocupação com a eficiência no uso de recursos hídricos na agricultura, contribuindo com uma solução prática e aplicável para a região. A proposta é respaldada por estudos anteriores que apontam a eficácia da irrigação por aspersão em diferentes tipos de solo e topografias, além de suas vantagens em termos de controle e distribuição uniforme da água. A contribuição deste estudo está na adaptação e aplicação dessas técnicas a uma realidade específica, com o objetivo de promover a sustentabilidade e a eficiência produtiva da propriedade rural em questão.

Ao final do trabalho, espera-se que o sistema desenvolvido não apenas atenda às necessidades hídricas da propriedade, mas também sirva como referência para outras iniciativas similares na região, contribuindo para o avanço das práticas agrícolas sustentáveis.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Desenvolver um sistema de irrigação eficiente e sustentável, dimensionado para atender às necessidades hídricas da propriedade rural, contribuindo para a melhoria da produtividade agrícola na região e promovendo a economia de recursos hídricos.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Analisar a topografia do terreno e suas variações para determinar a melhor disposição dos equipamentos de irrigação, visando minimizar perdas de carga e garantir a eficiência do sistema.
- Calcular a evapotranspiração da área de estudo e determinar a demanda hídrica específica das culturas, garantindo o fornecimento adequado de água sem desperdícios.
- Selecionar e dimensionar a bomba de irrigação adequada, considerando as condições topográficas e a demanda hídrica, para assegurar a eficiência energética e hidráulica do sistema.

- Implementar um sistema de irrigação por aspersão que otimize a distribuição de água, promovendo a economia de recursos hídricos e melhorando a produtividade agrícola da propriedade.
- Avaliar o desempenho do sistema de irrigação em condições operacionais reais, verificando a eficiência na distribuição de água e a adequação às necessidades das culturas.

1.3 Justificativa

A justificativa para o desenvolvimento deste trabalho de conclusão de curso, centrado no projeto de irrigação para uma propriedade rural na região sudoeste do Maranhão, está fundamentada na necessidade de se enfrentar um problema prático e relevante na agricultura: a otimização do uso da água em regiões onde a disponibilidade hídrica é limitada e o abastecimento é irregular.

O trabalho propõe a criação de um sistema de irrigação que atenda às necessidades específicas de uma propriedade rural localizada em uma área com características climáticas desafiadoras, marcada por um clima tropical com grande variabilidade na pluviosidade entre as estações. A escolha da irrigação por aspersão, aliada ao uso de tecnologias de monitoramento e controle, justifica-se pela sua capacidade de promover uma distribuição uniforme da água, reduzindo desperdícios e garantindo a manutenção das culturas, especialmente em períodos de seca.

A justificativa também se baseia na aplicação de conceitos teóricos e metodologias aprendidas ao longo do curso de Engenharia Mecânica, como o dimensionamento de sistemas hidráulicos, a análise de perdas de carga, e a seleção de equipamentos adequados. O uso de equações de evapotranspiração, cálculos de demanda hídrica, e a escolha criteriosa dos dispositivos de irrigação são elementos que demonstram o emprego de conhecimentos técnicos adquiridos durante a formação acadêmica, aplicando-os em um contexto real e específico.

Além disso, o desenvolvimento deste projeto contribui para o aprendizado do aluno ao exigir a integração de diferentes áreas do conhecimento, como mecânica dos fluidos, termodinâmica, e engenharia de sistemas, resultando em um trabalho que alia teoria e prática. A aplicabilidade do sistema de irrigação projetado pode servir como um modelo para outras propriedades na região, oferecendo uma solução prática e eficiente para um problema recorrente na agricultura local.

Assim, a justificativa deste trabalho reside na combinação entre a resolução de um problema prático, a aplicação de conhecimentos adquiridos ao longo do curso, e a contribuição para o desenvolvimento de soluções tecnológicas que possam ser replicadas em contextos similares, beneficiando tanto a comunidade acadêmica quanto o setor agrícola regional.

Este trabalho está organizado em cinco capítulos. No Capítulo 1, são apresentados a introdução e os objetivos do projeto. O Capítulo 2 trata da revisão bibliográfica, abordando os conceitos teóricos fundamentais e estudos anteriores relacionados ao tema. No Capítulo 3, são detalhados os materiais e métodos utilizados na pesquisa, incluindo a descrição do levantamento topográfico e dos cálculos realizados. O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos e a análise dos dados. Finalmente, no Capítulo 5, são discutidas as conclusões do estudo, destacando as principais contribuições e sugerindo direções para futuros trabalhos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A irrigação por aspersão envolve a aplicação de água na forma de chuva artificial, por meio de aspersores que podem ser estacionários ou móveis. Esse método permite uma distribuição uniforme da água, facilitando a cobertura de áreas extensas e irregulares Mantovani e Souza (2011). Os aspersores são projetados para emitir água em padrões específicos, controlando tanto o escoamento quanto a pressão, o que é crucial para garantir a eficiência do sistema.

Além disso, a irrigação por aspersão oferece várias vantagens em comparação com outros métodos, como a irrigação por sulcos e a irrigação por gotejamento. Uma das principais vantagens é sua adaptabilidade a diferentes tipos de solo e topografias, permitindo uma aplicação mais uniforme da água Hillel (2004). Sistemas de aspersão também podem ser automatizados, o que facilita a gestão e a manutenção, proporcionando uma aplicação controlada e precisa da água Keller e Bliesner (1990).

A perda de carga em um sistema de irrigação é um aspecto crítico do projeto, que afeta a distribuição uniforme da água e a eficiência do sistema. A metodologia de Hazen-Williams é amplamente utilizada para calcular a perda de carga em tubulações devido à sua simplicidade e precisão. Este método considera fatores como o diâmetro da tubulação, a rugosidade do material e a velocidade do escoamento Merriam, Keller e Olson (2007).

A grama esmeralda (*Zoysia japonica*), cultura predominante com maior demanda hídrica na área escolhida para este projeto, destaca-se por sua resistência ao pisoteio e por exigir pouca manutenção. Para a irrigação dessa espécie, o sistema de aspersão é particularmente adequado devido à sua capacidade de distribuir água de maneira uniforme e eficiente, promovendo um crescimento saudável e homogêneo do gramado Patton e Reicher (2007). Além disso, a utilização de aspersores ajustáveis, que podem reduzir significativamente a aplicação excessiva de água conforme a necessidade diária, contribui para a preservação dos recursos hídricos.

Dessa forma, é preciso garantir a eficiência hídrica do projeto, sendo ela um fator determinante para a escolha do sistema de irrigação. Segundo Fereres e Soriano (2007), práticas como a irrigação deficitária e o uso de tecnologias avançadas, como sensores de umidade, podem otimizar o uso da água, reduzindo desperdícios e aumentando a produtividade das culturas. A irrigação por aspersão, quando bem projetada e gerenciada, pode atingir altos níveis de eficiência, minimizando perdas por evaporação e escoamento superficial.

2.1 Perda de Carga

A perda de carga em sistemas de irrigação é um fator crítico que influencia diretamente a eficiência e o desempenho do sistema como um todo. Em termos simples, a perda de carga refere-se à redução da pressão da água à medida que ela flui através das tubulações, válvulas,

conexões e outros componentes do sistema. Essa redução de pressão pode afetar a uniformidade da distribuição de água, resultando em áreas de irrigação insuficiente ou excessiva, o que compromete a eficácia do sistema.

A metodologia de Hazen-Williams é amplamente utilizada para o cálculo da perda de carga em tubulações de sistemas de irrigação, sendo valorizada por sua simplicidade e precisão. Este método leva em consideração fatores como o diâmetro da tubulação, a rugosidade do material e a velocidade do escoamento da água. De acordo com Merriam, Keller e Olson (2007), a fórmula de Hazen-Williams é uma das mais utilizadas em projetos de irrigação devido à sua capacidade de fornecer estimativas confiáveis para a perda de carga em sistemas complexos.

Um dos aspectos mais desafiadores no gerenciamento da perda de carga é a manutenção de uma pressão adequada em todas as partes do sistema de irrigação. Conforme a água flui através das tubulações, a resistência encontrada ao longo do percurso, causada pela fricção entre a água e as paredes internas dos tubos, provoca uma queda de pressão. Quanto maior a distância percorrida pela água ou maior a quantidade de curvas e conexões no sistema, maior será a perda de carga. Isso pode resultar em uma pressão insuficiente nos aspersores localizados nas extremidades do sistema, o que compromete a uniformidade da irrigação Bernardo (2019).

Além disso, a perda de carga também pode ser influenciada por fatores externos, como o tipo de solo, a topografia do terreno e a qualidade da instalação do sistema. Em terrenos com desníveis acentuados, por exemplo, a diferença de altura entre os pontos de entrada e saída da água pode aumentar significativamente a perda de carga. Nesses casos, é essencial que o projeto do sistema de irrigação leve em consideração essas variáveis para garantir que a água alcance todas as áreas com a pressão adequada Keller e Bliesner (1990).

A escolha dos materiais utilizados nas tubulações e acessórios do sistema também desempenha um papel crucial na perda de carga. Tubulações com superfícies internas mais lisas, por exemplo, tendem a oferecer menos resistência ao escoamento da água, reduzindo assim a perda de carga. Por outro lado, materiais com maior rugosidade interna podem aumentar a fricção e, conseqüentemente, a perda de pressão ao longo do sistema Hillel (2004).

A perda de carga é um fator determinante na eficiência dos sistemas de irrigação, afetando tanto a distribuição uniforme da água quanto o consumo energético necessário para manter o sistema em funcionamento. A aplicação correta dos métodos de cálculo, como a fórmula de Hazen-Williams, aliada à escolha adequada dos materiais e ao planejamento cuidadoso do layout do sistema, é fundamental para minimizar as perdas e garantir uma irrigação eficiente e sustentável.

2.1.1 Perda de Carga em Sistemas de Irrigação

As perdas de carga em tubulações são um fator determinante na eficiência dos sistemas de irrigação por aspersão. Lima e Silva (2020) ressaltam que o cálculo adequado dessas perdas

é essencial para garantir que a pressão nos emissores seja suficiente para distribuir a água de maneira uniforme. As equações de Hazen-Williams são frequentemente empregadas para estimar as perdas de carga, permitindo um planejamento eficiente do sistema.

Além disso, Souza et al. (2019) afirmam que a rugosidade interna dos materiais das tubulações deve ser considerada no dimensionamento. Tubulações com alta rugosidade podem aumentar significativamente as perdas de carga, resultando em menor eficiência do sistema e maior consumo de energia, o que sublinha a importância de escolher materiais adequados para a construção do sistema.

2.2 Tipos de Aspersores e Emissores

Os aspersores e emissores são componentes essenciais em sistemas de irrigação por aspersão, sendo responsáveis pela distribuição eficiente da água sobre as áreas cultivadas. A escolha adequada desses dispositivos é crucial para garantir que a água seja aplicada de maneira uniforme e controlada, atendendo às necessidades específicas de cada cultura e tipo de solo. Aspersores e emissores diferem em suas características, capacidade de cobertura, e métodos de operação, e a seleção desses dispositivos deve considerar fatores como a topografia do terreno, o tipo de cultivo e as condições climáticas da região.

Aspersores são dispositivos que pulverizam a água em gotículas finas, simulando a chuva, e são amplamente utilizados em sistemas de irrigação agrícola e paisagística. Eles podem ser classificados em dois tipos principais: aspersores estacionários e aspersores móveis. Aspersores estacionários, como o próprio nome sugere, permanecem fixos em uma posição durante a operação, enquanto os aspersores móveis podem ser deslocados ao longo do terreno para cobrir áreas maiores. Segundo Bernardo (2019), os aspersores estacionários são mais indicados para áreas menores ou com plantas sensíveis à movimentação, enquanto os móveis são ideais para grandes extensões de terra e culturas que demandam uma cobertura uniforme em grandes áreas.

Além da distinção entre estacionários e móveis, os aspersores também variam em termos de alcance e padrão de distribuição. Alguns aspersores são projetados para cobrir áreas circulares, enquanto outros são configurados para áreas retangulares ou outras formas específicas. Essa flexibilidade permite que o sistema de irrigação seja adaptado às necessidades específicas da área cultivada. Segundo Keller e Blierner (1990) destacam que a escolha do padrão de distribuição é fundamental para garantir que a água seja aplicada de maneira eficiente, minimizando áreas de sobreposição ou falta de cobertura.

Em contraste com os aspersores, os emissores são dispositivos usados principalmente em sistemas de microirrigação, onde a água é aplicada diretamente na base das plantas em pequenas quantidades. Esse tipo de sistema é altamente eficiente em termos de economia de água, pois reduz significativamente as perdas por evaporação e escoamento superficial. Emissores incluem gotejadores e microaspersores, que podem ser configurados para liberar

água em taxas muito baixas, atendendo às necessidades específicas de culturas que requerem irrigação constante, mas em volumes reduzidos Hillel (2004).

Os gotejadores são os emissores mais comuns em sistemas de irrigação localizada. Eles liberam a água lentamente, diretamente na zona radicular das plantas, permitindo que a água penetre profundamente no solo sem causar saturação superficial. Essa abordagem é particularmente eficaz em áreas com solos arenosos, que têm alta permeabilidade, ou em regiões onde a água é escassa e precisa ser usada de maneira extremamente eficiente. Patton e Reicher (2007) observam que a irrigação por gotejamento, ao proporcionar uma aplicação precisa e localizada da água, não apenas economiza recursos hídricos, mas também promove um crescimento mais saudável das plantas, minimizando a ocorrência de doenças relacionadas ao excesso de umidade.

Microaspersores, por sua vez, são semelhantes aos aspersores convencionais, mas operam em uma escala menor, aplicando água em áreas restritas ao redor das plantas. Eles são frequentemente utilizados em culturas que requerem irrigação mais delicada ou em estufas, onde o controle preciso das condições ambientais é crucial. Segundo Bernardo (2019), os microaspersores são ideais para plantas que não toleram a aplicação direta de grandes volumes de água, permitindo uma rega mais suave e controlada.

A seleção de aspersores e emissores deve ser feita com base nas características específicas do terreno, do solo e das culturas. A compreensão das diferentes funcionalidades desses dispositivos é essencial para otimizar a eficiência do sistema de irrigação, garantindo uma aplicação uniforme e adequada da água. Aspersores e emissores bem escolhidos não apenas melhoram a eficiência hídrica, mas também contribuem para a saúde das plantas e a sustentabilidade da produção agrícola.

2.3 Método de Irrigação por Aspersão

A irrigação por aspersão é uma técnica amplamente adotada na agricultura devido à sua capacidade de aplicar água de maneira uniforme e eficiente. Segundo Alves e Santos (2018), esse sistema não só simula a precipitação natural, como também minimiza as perdas de água por evaporação e escoamento superficial, o que é crucial para a conservação hídrica. A escolha adequada dos aspersores, juntamente com um controle preciso da pressão e do diâmetro da área irrigada, contribui significativamente para a eficiência do sistema.

A pesquisa de Ribeiro e Almeida (2020) complementa que a eficiência hídrica em sistemas de aspersão depende fortemente do controle de variáveis climáticas, como a velocidade do vento apresentada visualizada no mapa presente no Apêndice E, que pode dispersar a água e comprometer a uniformidade. Para mitigar esses efeitos, recomenda-se o uso de aspersores de baixa pressão e a aplicação de água em períodos de baixa velocidade do vento.

Além disso, a uniformidade de distribuição é um parâmetro crítico que deve ser monitorado. Mateos (1998) destaca que a uniformidade de distribuição de água influencia diretamente

a produtividade das culturas irrigadas. O Coeficiente de Uniformidade de Christiansen, proposto por Christiansen (1941), é uma medida comum para avaliar essa uniformidade, sendo recomendado que atinja valores de pelo menos 80 Bernardo (1997). Vários fatores, como a velocidade do vento, o espaçamento dos aspersores e a pressão de operação, afetam a uniformidade, como evidenciado por Ribeiro et al. (2020).

2.4 Dimensionamento de Sistemas de Irrigação por Aspersão

O dimensionamento eficaz dos sistemas de irrigação por aspersão é fundamental para a maximização da eficiência hídrica e da produtividade agrícola. Bernardo (2019) enfatiza que o cálculo da lâmina d'água deve ser realizado com precisão para assegurar que a quantidade de água aplicada atenda às necessidades hídricas das culturas. O uso de tecnologias modernas, como sensores de umidade do solo, pode otimizar o processo de irrigação, prevenindo desperdícios e aumentando a eficiência energética do sistema.

Além disso, o dimensionamento deve considerar a interação entre os diferentes componentes do sistema, como a pressão de operação dos aspersores e a evapotranspiração das culturas Prado (2008). A evapotranspiração é a soma da água que se perde do solo e das plantas para o ar, sendo um fator importante para entender a quantidade de água que as culturas necessitam. Necessária para se realizar a análise econômica, que envolve o custo da água e o preço do produto, também é crítica, pois sistemas de irrigação com maior uniformidade tendem a oferecer melhores resultados financeiros Paz et al.(1997).

2.5 Bomba Centrífuga em Sistemas de Irrigação

Nos sistemas de irrigação, a bomba centrífuga desempenha um papel muito importante no transporte de água, sendo essencial que seu dimensionamento leve em conta as demandas hidráulicas do projeto, como altura manométrica e vazão. Macintyre (2013) ressalta que operar dentro dos parâmetros adequados aumenta a eficiência do sistema e reduz o desgaste do equipamento, minimizando custos operacionais.

Além disso, Ferreira et al. (2018) enfatizam que a utilização de variadores de frequência pode otimizar a eficiência das bombas centrífugas, permitindo que a velocidade da bomba se ajuste à demanda de irrigação, o que resulta em economia de energia. A seleção da bomba deve ser feita com base nas condições operacionais específicas do sistema, como a vazão necessária e a altura de bombeamento Almeida et al.(2019).

2.6 Métodos para Otimizar o uso da água no sistema de irrigação da Grama Esmeralda

A eficiência hídrica é um fator crucial em qualquer sistema de irrigação, especialmente em regiões onde a disponibilidade de água é limitada ou o custo de obtenção desse recurso é elevado. A otimização do uso da água na agricultura não só garante a sustentabilidade da produção, mas também contribui para a preservação dos recursos naturais e a redução de custos operacionais. Diversas práticas e tecnologias têm sido desenvolvidas para aumentar a eficiência hídrica em sistemas de irrigação, com destaque para a irrigação deficitária, o uso de sensores de umidade e a automação dos sistemas de irrigação.

A irrigação deficitária é uma técnica que visa aplicar água em quantidades menores do que as requeridas pela planta em condições de máxima evapotranspiração. Segundo Fereres e Soriano (2007), essa prática pode ser altamente eficaz em aumentar a eficiência do uso da água, desde que aplicada com base em um entendimento preciso das necessidades hídricas das culturas e das condições climáticas. Ao limitar a quantidade de água aplicada, a irrigação deficitária força as plantas a desenvolver sistemas radiculares mais profundos, aumentando sua resistência à seca e melhorando a utilização da água disponível no solo. No entanto, para que essa prática seja bem sucedida, é essencial monitorar constantemente as condições das plantas e ajustar a quantidade de água fornecida em resposta às mudanças nas condições ambientais.

Outra tecnologia importante para melhorar a eficiência hídrica que pode ser implementada em projetos futuros é o uso de sensores de umidade do solo. Esses dispositivos permitem um monitoramento contínuo e preciso do teor de umidade no solo, fornecendo dados em tempo real que podem ser usados para ajustar automaticamente o sistema de irrigação. De acordo com Hiellet (2004), os sensores de umidade são particularmente úteis em sistemas automatizados, onde podem ser integrados a controladores que ativam ou desativam a irrigação com base nos níveis de umidade do solo. Isso evita tanto o desperdício de água devido à irrigação excessiva quanto o estresse hídrico das plantas devido à falta de água. A precisão oferecida por esses sensores não só melhora a eficiência do uso da água, mas também contribui para o aumento da produtividade agrícola, garantindo que as plantas recebam a quantidade ideal de água em cada estágio de seu desenvolvimento.

A automação dos sistemas de irrigação é outro avanço significativo no esforço para otimizar o uso da água na agricultura. Sistemas automatizados podem ser programados para operar em horários específicos ou em resposta a determinados sinais, como a umidade do solo ou as condições climáticas. Keller e Bliesner (1990) destacam que a automação permite uma maior flexibilidade na gestão da irrigação, reduzindo a necessidade de intervenção manual e permitindo uma aplicação mais precisa e eficiente da água. Além disso, sistemas automatizados podem ser integrados a tecnologias de monitoramento remoto, permitindo que os agricultores ajustem os parâmetros de irrigação a partir de qualquer lugar, o que é especialmente útil em grandes propriedades ou em operações agrícolas com múltiplas áreas de cultivo.

Além dessas tecnologias, práticas de manejo integrado da água também desempenham um papel vital na eficiência hídrica. Isso inclui o uso de culturas de cobertura para melhorar a retenção de água no solo, a manutenção de uma cobertura vegetal adequada para reduzir a evaporação e a implementação de práticas de conservação do solo que melhoram a infiltração e reduzem o escoamento superficial. Bernardo (2019) enfatiza que a combinação de práticas de manejo com tecnologias modernas de irrigação pode resultar em ganhos substanciais na eficiência do uso da água, contribuindo para a sustentabilidade a longo prazo das operações agrícolas.

A eficiência hídrica é uma meta central em qualquer sistema de irrigação moderno. A adoção de práticas como a irrigação deficitária, o uso de sensores de umidade e a automação dos sistemas de irrigação, aliada a práticas de manejo integrado, pode levar a uma redução significativa no consumo de água, ao mesmo tempo em que melhora a produtividade e a sustentabilidade das operações agrícolas. À medida que as pressões sobre os recursos hídricos aumentam, a busca por métodos cada vez mais eficientes de uso da água se torna não apenas desejável, mas essencial para a viabilidade da agricultura em um futuro onde a água pode se tornar um recurso ainda mais escasso.

2.6.1 Método de Irrigação por Aspersão

O método de irrigação por aspersão consiste em fornecer água de forma artificial por meio de dispositivos e equipamentos especializados. De acordo com Bernardo (2019), esse método apresenta diversas vantagens, incluindo a fácil mecanização do trabalho, o que permite um aproveitamento integral da área. Além disso, esse método reduz a suscetibilidade do solo à erosão, tornando-o particularmente eficaz em áreas que necessitam de proteção contra processos erosivos.

No desenvolvimento deste projeto, o cálculo da perda de carga foi essencial para determinar o tamanho das tubulações. Foi utilizada a equação de Hazen-Williams, que é expressa da seguinte maneira:

$$H_f = 10,65 \cdot \left(\frac{Q^{-1,85}}{C^{1,85} \cdot D^{4,87}} \right) \cdot L \quad (1)$$

onde H_f é a perda de carga (m), $Q^{-1,85}$ é a vazão do escoamento (m^3/s), $C^{1,85}$ é o coeficiente de rugosidade de Hazen-Williams (para tubulações de PVC, aproximadamente 150), $D^{4,87}$ é o diâmetro interno da tubulação (m), e L é o comprimento da tubulação (m).

Isso está em conformidade com os princípios de eficiência e uniformidade de distribuição de água mencionados por Bernardo (2019). O acoplamento utilizado nas tubulações foi cuidadosamente selecionado para garantir uma vedação eficiente e evitar desperdícios de água, o que é fundamental para a eficiência do sistema de irrigação. A Figura 1 ilustra o tipo de acoplamento utilizado no sistema.

Figura 1 – Modelo de acoplamento e aspersor



Fonte: Rain Bird Corporation (2022).

A Figura 1 apresenta as especificações técnicas de um aspersor da série 3500, utilizado para irrigação. Na lateral direita, há quatro ícones que representam suas principais características. O primeiro ícone, em formato de gota d'água, indica a taxa de precipitação do aspersor, que varia entre 9 a 18 mm/h, sendo essa a quantidade de água aplicada ao solo ao longo do tempo. O segundo ícone, representado por um manômetro, informa a faixa de pressão operacional ideal para o funcionamento do aspersor, que está entre 1,7 a 3,8 bar, garantindo que a distribuição da água ocorra de maneira eficiente e uniforme. O terceiro ícone mostra o fluxo de água do equipamento, destacando que a vazão varia de 2,0 a 17,4 (l/min), ou 0,12 a 1,04 (m³/h), dependendo da configuração utilizada. O último ícone exibe as dimensões físicas do aspersor, informando que ele está disponível em diferentes alturas conforme a aplicação: 4 polegadas (10 cm), 7 (pol)(17.8 cm) para uso em arbustos e 6 (pol)(16.8 cm), além da conexão padrão de ½" NPT.

Na parte inferior da imagem, a tabela de desempenho apresenta os dados técnicos do aspersor considerando diferentes pressões de operação. A primeira coluna indica a pressão de trabalho em bar, enquanto a segunda especifica o tamanho do bocal utilizado. O raio de alcance do jato d'água é mostrado na terceira coluna, determinando a área de cobertura do aspersor. Em seguida, a tabela apresenta a vazão de água em litros por minuto e metros cúbicos por hora, evidenciando a quantidade de água liberada conforme a pressão aplicada. Por fim, as

últimas colunas fornecem a precipitação em milímetros por hora, permitindo a avaliação da uniformidade de irrigação para diferentes configurações.

Para este projeto, foram determinados três aspersores específicos, conforme ilustrado na Figura 2. A seleção desses aspersores foi realizada com base na lâmina d'água e na vazão específica de cada um, critérios essenciais para garantir a eficiência do sistema de irrigação. A lâmina d'água, que representa a quantidade de água aplicada por unidade de área, é uma medida crucial para assegurar que a distribuição de água atenda às necessidades hídricas das plantas sem causar desperdícios ou escoamento superficial. A disposição dos aspersores foi projetada conforme o croqui do projeto, considerando a topografia e as características do solo, para garantir a máxima eficiência e uniformidade na irrigação.

Figura 2 – Aspersor

Série HE-VAN 8							Série HE-VAN 12						
24°							23°						
Bocal	Pressão bar	Raio m	Vazão m ³ /h	Vazão l/s	Precip mm/h	Precip mm/h	Bocal	Pressão bar	Raio m	Vazão m ³ /h	Vazão l/s	Precip mm/h	Precip mm/h
360° Arco 	1.0	1.5	0.19	0.05	82	95	360° Arco 	1.0	2.7	0.38	0.10	50.5	58.3
	1.4	1.8	0.22	0.06	66	76		1.4	3.0	0.44	0.12	47.3	54.6
	1.7	2.1	0.25	0.06	54	62		1.7	3.4	0.49	0.13	43.7	50.4
	2.1	2.4	0.27	0.07	45	52		2.1	3.7	0.54	0.14	40.2	46.4

Fonte: Rain Bird Corporation (2022).

2.6.2 Dimensionamento do Sistema de Aspersão

Segundo Hernandez (1999), o desenvolvimento de um projeto de irrigação necessita de alguns passos para seu correto dimensionamento, dentre os quais pode-se citar:

1. Seleção e estudo da área utilizada, bem como suas medidas e desníveis.
2. Definição da cultura a ser utilizada, bem como espaçamento entre plantas e fileiras, além do levantamento da evapotranspiração das plantas, diferente para cada cultura, afetando seu consumo de água.
3. Cálculos para definição da lâmina aplicada em função dos tópicos anteriores, bem como da subdivisão da área.
4. Desenho de um croqui, que deve constar as linhas principais, de derivação, linha de captação de água, acessórios, cabeçal de controle e motobomba.
5. Dimensionamento das tubulações, com suas respectivas vazões, pressões de serviço e perdas de carga.

O detalhamento de cada um destes passos foi realizado seguindo o fluxograma representado no Apêndice A.

2.6.2.1 Cálculos de Perda de Carga

Os cálculos de perda de carga foram realizados utilizando a equação de Hazen-Williams, utilizada para estimar a perda de pressão ao longo de tubulações. O cálculo considerou fatores como o diâmetro da tubulação, a rugosidade do material e a velocidade do escoamento de água. O uso do Microsoft Excel^r (2024) foi fundamental para automatizar esses cálculos e garantir a precisão dos resultados. Além disso, a equação de Hazen-Williams foi utilizada para determinar as perdas de carga nas válvulas e acessórios do sistema, assegurando que o projeto atendesse aos requisitos de pressão e vazão em todos os pontos do sistema.

2.6.3 Dimensionamento das Tubulações e Seleção da Bomba

Com base nos cálculos de perda de carga, foi realizado o dimensionamento das tubulações, seguindo a metodologia demonstrada na Figura 3, selecionando-se o diâmetro adequado para minimizar as perdas de carga e garantir que a água chegasse aos emissores com a pressão necessária. O AutoCAD^r (2024) foi utilizado para desenhar o layout das tubulações, permitindo uma visualização precisa da disposição dos componentes no sistema. Além disso, foi realizada a seleção da bomba centrífuga, levando em consideração a altura manométrica total necessária, que inclui a soma das perdas de carga e a altura estática do sistema. A escolha da bomba foi baseada em catálogos de fabricantes, considerando a eficiência energética e a adequação às condições específicas do sistema.

2.6.4 Perdas de Carga

Neste sistema, os cálculos das perdas de carga nos sistemas hidráulicos ocorrem em todos os acessórios, na bomba e nas tubulações, influenciando a velocidade que altera diversos outros fatores, como turbulência e aumento do atrito.

As perdas de carga nas válvulas e acessórios são definidas de acordo com a Eq. (8), já que têm uma importante função no sistema, como garantir o escoamento, controle de vazão e segurança do sistema. A escolha adequada de uma válvula evita problemas com manutenções e garante melhor desempenho, sendo divididas em: direcionais, de medição e auxiliares Phocaides (2007).

$$h_f = k_f \cdot V^2 \cdot \frac{1}{2g} \quad (8)$$

onde k_f é a constante de perda de carga para o acessório, V é a velocidade média do escoamento (m/s) e g a aceleração da gravidade (m/s²).

Como dispositivos acoplados às tubulações, representam também uma perda de carga localizada, logo a necessidade de calcular. Phocaides (2007) apresenta essa relação para que se possa definir essa perda gerada pelos gotejadores.

A Equação 2 descreve a perda de carga em válvulas e acessórios devido ao atrito no escoamento. Como dispositivos acoplados às tubulações, representam também uma perda de carga localizada, logo a necessidade de calcular. Phocaides (2007) apresenta essa relação para que se possa definir essa perda gerada pelos gotejadores.

Os emissores são considerados como acessórios, pois são acoplados nas tubulações (mangueiras), representando perdas de carga localizadas. Abaixo é apresentada essa relação utilizada para analisar a perda gerada pelos gotejadores, em específico. A Equação 3 descreve a relação utilizada para calcular a perda de carga em gotejadores.

$$L_f = 3,5 \cdot D_b \cdot D_t^{-1,86} \quad (3)$$

onde L_f (mca) é a perda de carga, D_b é o diâmetro da tubulação de alimentação do gotejador (m), e D_t é o diâmetro do tubo do gotejador(m).

2.7 Bomba Centrífuga

Segundo Macintyre (2013), as bombas são utilizadas para bombeamento de fluidos incompressíveis, transformando energia mecânica em energia cinética e também em energia de pressão, possibilitando assim o transporte do fluido, superando as forças e atritos das tubulações, resistência do fluido e desnível energético.

Apresentando um custo de manutenção e operação baixos, as bombas centrífugas têm uma aplicação industrial e agrícola notável, além de apresentarem uma boa dissipação de fluido com pressão uniforme e larga escala de aplicação, porém apresentam uma baixa eficiência.

No dimensionamento do sistema de bombeamento para irrigação são esperados alguns desafios, como os desníveis topográficos apresentados na região irrigada, provocando assim uma diferença de altura entre a sucção e a fixação da bomba, e entre a fixação e o recalque, assim denominadas como alturas estáticas do sistema para Phocaides (2007). A Equação 4 representa a altura manométrica total em um sistema de bombeamento. A instalação de uma bomba centrífuga é normalmente feita de forma simples, atendendo a algumas condições básicas para a instalação, como: instalação em um lugar acessível para inspeções e manutenções; utilização de uma base sólida a fim de diminuir os efeitos de vibrações; alinhamento entre entrada e saída; instalação próxima a lugares de aspiração, reduzindo riscos com cavitação no sistema Menon e Menon (2010).

Segundo Ferreira e Oliveira (2018), a eficiência de uma bomba centrífuga pode ser melhorada com o uso de variadores de frequência, que permitem ajustar a velocidade da bomba conforme a demanda de água. Isso reduz o consumo energético e garante que o sistema opere

dentro de sua faixa de eficiência máxima. Além disso, Almeida e Ribeiro (2019) destacam que a seleção correta da bomba deve ser baseada nas condições operacionais específicas do sistema de irrigação, como a vazão requerida e a altura de bombeamento. .

$$H_m = h_e + h_f + h_{min} \quad (4)$$

onde H_m é a altura total(mca), h_e é a elevação total (diferença de altura entre a saída e a entrada da bomba)(mca), h_f é a perda de carga devido ao atrito no sistema(mca), e h_{min} representa outras perdas menores(mca).

A instalação de uma bomba centrífuga é normalmente feita de forma simples, atendendo a algumas condições básicas para a instalação, como: instalação em um lugar acessível para inspeções e manutenções; utilização de uma base sólida a fim de diminuir os efeitos de vibrações; alinhamento entre entrada e saída; instalação próxima a lugares de aspiração, reduzindo riscos com cavitação no sistema HERAS (2011).

Outra análise importante durante o processo de instalação da bomba é a altura útil de elevação, que está relacionada à energia do líquido à medida que ele passa pela bomba. Para calcular essa altura, utiliza-se a equação de Bernoulli, que expressa a conservação de energia entre a entrada e a saída da bomba Macintyre (1997). A Eq. (5) representa a equação da perda de carga total em um sistema de bombeamento:

$$H_f = \left(\frac{P_1}{\gamma} \right) + \left(\frac{v_1^2}{2g} \right) + z_1 + h_b = \left(\frac{P_2}{\gamma} \right) + \left(\frac{v_2^2}{2g} \right) + z_2 + h_p \quad (5)$$

onde H_f é a perda de carga total, P_1 e P_2 são as pressões nos pontos de entrada e saída da bomba, respectivamente (Pa), γ é o peso específico do fluido (N/m³), v_1 e v_2 são as velocidades do fluido na entrada e saída (m/s), g é a aceleração da gravidade (m/s²), z_1 e z_2 são as alturas de entrada e saída do fluido, respectivamente (m), h_b é a altura de bombeamento fornecida pela bomba (m) e h_p são as perdas de energia por atrito e outras resistências (m).

Considera-se o regime permanente nas análises de cálculo que serão feitas em projetos, devido ao motor normalmente operar com velocidades constantes Menon e Menon (2010).

Para complementar os cálculos realizados e facilitar a visualização dos dados, foram geradas tabelas que apresentam os resultados das perdas de carga nas diferentes seções do sistema de irrigação. Na Tabela 2, estão detalhadas as perdas de carga nas linhas que contêm os aspersores. A Tabela 3 ilustra as perdas de carga nas tubulações derivadas, enquanto as Tabelas 1 e 3 apresentam os dados referentes às perdas em cada linha. Essas tabelas permitem uma análise detalhada e comparativa dos pontos críticos do sistema, assegurando que as especificações de pressão e vazão foram adequadamente atendidas em todas as seções do sistema de irrigação.

Além disso, as informações obtidas a partir dessas tabelas são essenciais para a identificação de potenciais áreas de melhoria no sistema, garantindo um desempenho eficiente. A comparação entre as diferentes seções permite verificar se há discrepâncias significativas que

possam afetar o funcionamento global do sistema. Esse tipo de análise é fundamental para a tomada de decisões técnicas e para a otimização dos recursos, especialmente em projetos de grande escala.

A fim de determinar as curvas características de funcionamento das bombas e visualizar o comportamento do sistema, nota-se que existem basicamente três variáveis (vazão, altura manométrica e eficiência). As curvas características das bombas representam as relações entre as alturas manométricas em função da vazão do sistema, sendo também possível, a partir delas, determinar a potência de acionamento necessária, verificadas em catálogos de fabricantes de bombas.

Tabela 1 – Dados - Linhas de Aspersão Individuais

Áreas	Vazão (m ³ /h)	Comprimento (m)	Diâmetro Interno (mm)	Velocidade (m/s)	Saídas
Campo	0,51	20	22,6	0,353	3
Área 1	1,19	51	22,6	0,824	7
Área 2	1,02	44	22,6	0,706	6
Área 2.1	0,51	18	22,6	0,353	3
Área 2.2	0,51	20	22,6	0,353	3
Área 3	0,68	30	22,6	0,471	4

Fonte: Autoria própria (2025).

Tabela 2 – Perda de Carga - Linhas de Aspersão

Áreas	Perda de Carga (mca)	Quantidade de Saídas	Saídas
Campo	0,192	3	0,102
Área 1	2,344	7	0,988
Área 2	1,520	6	0,659
Área 2.1	0,173	3	0,089
Área 2.2	0,192	3	0,099
Área 3	0,490	4	0,232

Fonte: Autoria própria (2025).

Tabela 3 – Dados - Linhas Derivadas

Derivadas	Vazão (m ³ /h)	Comprimento (m)	Diâmetro Interno (mm)	Velocidade (m/s)	Saídas
1	1,19	50	29	0,7	2
2	2,04	50	46,7	0,524	4
3	1,36	8	29	0,572	2
Campo	4,58	50	46,7	0,74	9

Fonte: Autoria própria (2025).

Finalmente, a eficiência hídrica do sistema foi avaliada para garantir que o projeto atendesse às necessidades hídricas da cultura sem desperdícios. A grama esmeralda, principal cultura do projeto, requer uma aplicação uniforme de água para promover um crescimento saudável. A eficiência hídrica foi verificada considerando a evapotranspiração calculada e a de-

manda hídrica da cultura, com ajustes realizados no layout do sistema para otimizar o uso da água. Conforme ilustrado no Apêndice A

2.8 Curva do Sistema

A curva do sistema é determinada a parti da equação do sistema derivada do teorema de Bernoulli, incorporando perdas de carga e altura estática. A energia total no sistema pode ser expressa como:

$$\text{Energia Total} = \frac{P}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} + z \quad (6)$$

Ao incluir os efeitos de dispositivos como bombas e perdas de carga, a equação é adaptada para:

$$H(Q) = H_e + H_{\min} + H_f(Q) \quad (7)$$

As perdas de carga em função da vazão são calculadas pela fórmula de Hazen-Williams

$$H_f = K \cdot Q^{1,85} \quad (8)$$

Substituindo os valores adotados no projeto, a equação final do sistema utilizada neste trabalho é:

$$H(Q) = 10 + 18 + K \cdot Q^{1,85} \quad (9)$$

2.8.1 Descoberta e Determinação do Fator K na Equação do Sistema

Para determinar o fator K , foram consideradas as características hidráulicas do sistema, como o comprimento total da tubulação (L), o diâmetro interno da tubulação (D), e o coeficiente de rugosidade de Hazen-Williams (C). O comprimento total L reflete a soma das extensões das linhas principais e secundárias que compõem o sistema. O diâmetro interno D corresponde ao tamanho efetivo das tubulações utilizadas no projeto, enquanto o coeficiente de rugosidade C mede a resistência ao escoamento interno, sendo típico para PVC o valor de 150. Essas variáveis foram relacionadas pela seguinte fórmula:

$$K = \frac{10,67 \cdot L}{C^{1,85} \cdot D^{4,87}} \quad (10)$$

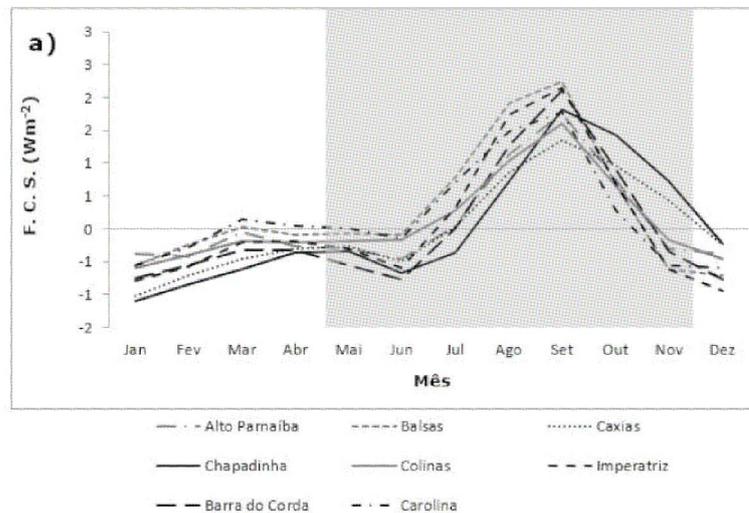
Após a substituição dos valores médios das linhas e da adutora principal, obteve-se $K = 2,78$, refletindo as perdas de carga acumuladas no sistema de irrigação projetado. Substituindo K na equação do sistema, tem-se a expressão final:

$$H(Q) = 10 + 18 + 2,5 \cdot Q^{1,85} \quad (11)$$

2.8.2 Demanda Hídrica

Além das condições de escoamento, foi realizado um estudo detalhado da demanda hídrica da área. A primeira etapa do projeto envolveu a coleta de dados climáticos relevantes, necessários para o cálculo da evapotranspiração (ET_o) e da demanda hídrica da área de estudo. Foram coletados dados de radiação solar, umidade relativa do ar, velocidade do vento e temperatura média, fornecidos pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e complementados por informações de outros sites meteorológicos confiáveis, como mostrado na Figura 7 e Figura 8. Esses dados foram essenciais para o cálculo da evapotranspiração de referência, que determinou a quantidade de água necessária para o sistema de irrigação.

Figura 3 – Variação Mensal do Fluxo de Calor Sensível

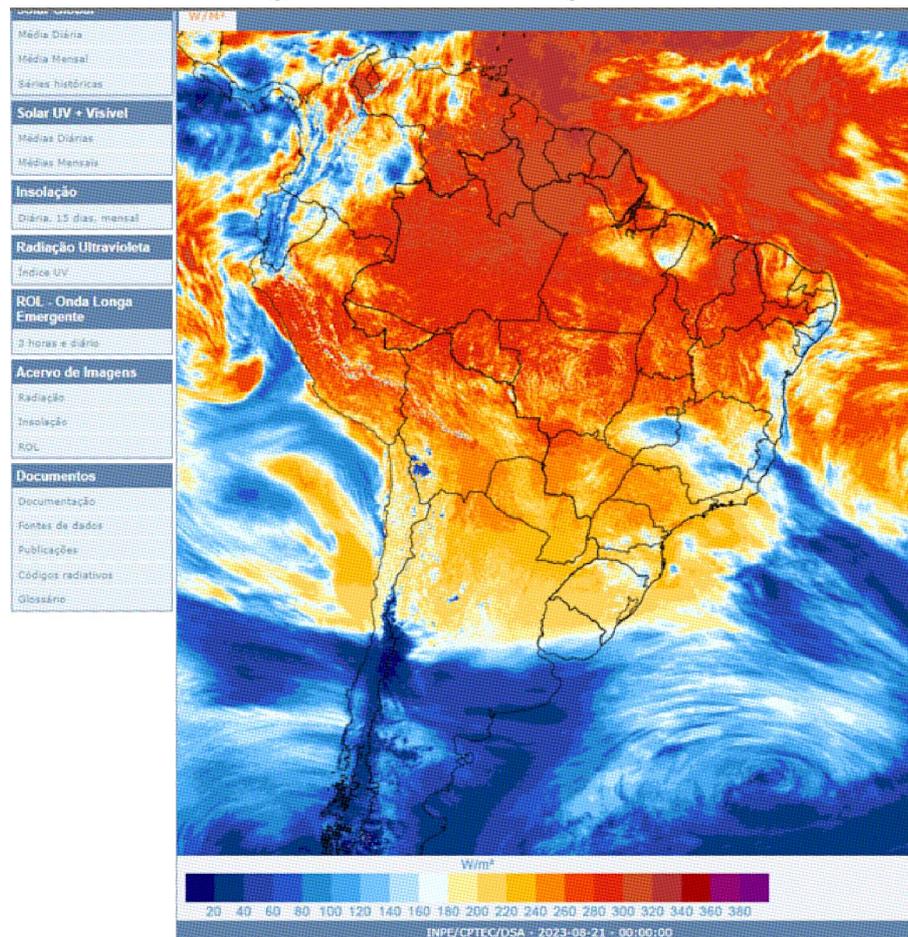


Fonte: INPE (2023).

Para determinar a evapotranspiração da área e, conseqüentemente, o volume de água necessário para o sistema de irrigação, foram utilizados dados obtidos por satélite e de sites meteorológicos atualizados, incluindo informações sobre radiação solar diária e radiação do solo, fornecidas pelo INPE (2023). Dados adicionais de latitude, longitude, altitude e velocidade do vento foram obtidos de sites meteorológicos BRITO (2023) e Spark (2023), e a umidade relativa média foi baseada em estudos realizados pela Universidade Federal do Paraná (UFPR) Martins (2000). Esses dados juntamente com um estudo topográfico detalhado da área, consideraram declives, aclives e aspectos de cultivo, como espaçamento do plantio, número de plantas, número de emissores por ramal e comprimentos dos ramais.

Esses fatores, combinados com a análise das condições de escoamento e a demanda hídrica, permitiram a concepção de um sistema de irrigação que atende às necessidades específicas da área de estudo, garantindo a eficiência e a sustentabilidade no uso dos recursos hídricos.

Figura 4 – Fluxo de Radiação Solar



Fonte: INPE (2023).

2.8.3 Coleta de Dados

Os dados meteorológicos essenciais para o cálculo da evapotranspiração de referência (ET_o) e para o dimensionamento do sistema de irrigação incluem a radiação solar (R_s), medida em megajoules por metro quadrado por dia (MJ/m²/dia), a temperatura do ar (T), expressa em graus Celsius (°C), a umidade relativa do ar (RH), indicada em porcentagem (%), e a velocidade do vento (u₂), medida em metros por segundo (m/s). Esses parâmetros são fundamentais para a determinação precisa da demanda hídrica da área de estudo.

2.8.4 Cálculos

1. Pressão de Vapor Saturado (e_s):

$$e_s = 0,6108 \times \exp\left(\frac{17,27 \times T}{T + 237,3}\right) \quad (12)$$

onde e_s é a pressão de vapor saturado (kPa), 0,6108 é uma constante derivada de experimentos empíricos, \exp é a função exponencial, T é a temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$), 17,27 é uma constante empírica, e 237,3 é uma constante empírica que ajusta a fórmula para condições atmosféricas típicas.

A Pressão de Vapor Saturado (e_s) é uma equação utilizada para determinar a quantidade máxima de vapor de água que o ar pode conter em uma determinada temperatura. Esse valor é essencial para o cálculo da evapotranspiração, pois fornece a base para estimar o teor de vapor no ar, condição fundamental para entender o comportamento da água na atmosfera e sua disponibilidade para as plantas.

2. Pressão de Vapor Atual (e_a):

A Eq. (7) determina a Pressão de Vapor Atual (e_a) representa a quantidade real de vapor de água presente no ar, sendo calculada a partir da umidade relativa (RH) e da Pressão de Vapor Saturado (e_s). Esta equação é essencial para determinar a diferença entre a quantidade de água que o ar pode reter e a quantidade real de vapor de água presente, sendo crucial para o cálculo da evapotranspiração.

$$e_a = \frac{RH}{100} \times e_s \quad (13)$$

3. Diferença de Temperatura (ΔT):

A Diferença de Temperatura (ΔT) é utilizada para calcular a taxa de mudança de temperatura com a pressão de vapor

$$\Delta T = 4098 \times \frac{0.6108 \times \exp\left(\frac{17,27 \times T}{T+237,3}\right)}{(T + 237,3)^2} \quad (14)$$

onde ΔT é a pressão de vapor saturado (kPa/ $^{\circ}\text{C}$), 0,6108 é uma constante derivada de experimentos empírico, T é a temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$), 17,27 é uma constante empírica, e 237,3 é uma constante empírica que ajusta a fórmula para condições atmosféricas típicas.

4. Pressão Psicrométrica (γ):

A Eq. (15) representa a fórmula para a pressão psicrométrica:

$$\gamma = \frac{0,665 \times 10^{-3} \times P}{\lambda} \quad (15)$$

onde γ é a pressão psicrométrica (kPa / $^{\circ}\text{C}$), $0,665 \times 10^3$ é uma constante empírica, P é a pressão atmosférica (kPa), e λ é o calor latente da vaporização (MJ/kg).

A Pressão Psicrométrica (γ) é uma constante usada para relacionar a pressão atmosférica com a pressão de vapor e a energia necessária para a evaporação da água. Este termo é particularmente importante no cálculo da evapotranspiração, pois ajuda a entender a resistência ao fluxo de vapor de água na atmosfera

5. Radiação Líquida (R_n):

A Radiação Líquida (R_n) é o saldo entre a radiação solar incidente (R_s) e a radiação refletida pelo solo, levando em consideração o albedo. Esta equação é importante para calcular a quantidade de energia disponível para a evaporação e transpiração das plantas, sendo um componente-chave no balanço de energia em superfícies agrícolas.

$$R_n = R_s - (R_{so} \times (1 - \text{albedo})) \quad (16)$$

onde a radiação líquida R_n é definida como a diferença entre a radiação recebida e a radiação emitida pela superfície (MJ/m^2), representando a energia disponível para processos de evaporação e aquecimento da superfície. A radiação solar incidente R_s , refere-se à radiação solar que atinge diretamente a superfície antes de ser absorvida ou refletida, sendo a fonte inicial de energia do sistema (MJ/m^2). Já a radiação solar à superfície R_{so} representa a radiação máxima que atinge a superfície sob condições ideais, sem obstruções atmosféricas (MJ/m^2). O albedo, por sua vez, expressa a fração de radiação solar refletida pela superfície, ajustando a quantidade de energia efetivamente absorvida e sendo essencial para estimativas precisas de radiação.

6. Evapotranspiração de Referência (ET_o):

A Evapotranspiração de Referência (ET_o) é uma equação que combina vários fatores, como a radiação líquida, a pressão de vapor e a velocidade do vento (u_2), para determinar a quantidade de água que uma cultura padrão transpira e evapora. Este cálculo é essencial para o dimensionamento de sistemas de irrigação, pois permite estimar a quantidade de água que deve ser reposta para garantir o crescimento saudável das plantas.

$$ET_o = \frac{0,408 \times \Delta T \times (R_n - G) + \gamma \times \frac{900}{T+273} \times u_2 \times (e_s - e_a)}{\Delta T + \gamma \times (1 + 0,34 \times u_2)} \quad (17)$$

onde ET é a evapotranspiração de referência (mm/dia), 0,408 é uma constante de conversão, T é a diferença de temperatura ($\text{kPa}/^\circ\text{C}$), R é a radiação líquida ($\text{MJ m}^2/\text{dia}$), G é o fluxo de calor no solo ($\text{MJ m}^2/\text{dia}$), γ é a pressão psicrométrica ($\text{kPa}/^\circ\text{C}$), T é a temperatura do ar ($^\circ\text{C}$), 2 representa a velocidade do vento a 2 metros (m/s), e e_s e e_a são, respectivamente, a pressão de vapor saturado e a pressão de vapor atual (kPa).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta os materiais e métodos utilizados para alcançar os objetivos do projeto de irrigação de uma propriedade rural localizada na região sudoeste do Maranhão. A metodologia adotada foi estruturada para garantir a eficiência e a sustentabilidade do sistema de irrigação, considerando as particularidades da área de estudo e as melhores práticas recomendadas na literatura.

3.1 Materiais e Equipamentos

Os materiais utilizados neste trabalho foram selecionados com base na necessidade de obter dados precisos para o dimensionamento do sistema de irrigação e para garantir a eficiência hídrica. Entre os principais materiais utilizados estão:

- Microsoft Excel: Os dados foram organizados e analisados utilizando-se o Microsoft Excel (2024), uma ferramenta comum para gerenciamento de planilhas eletrônicas MICROSOFT (2024). Utilizado para a realização dos cálculos de perdas de carga ao longo das tubulações e para a organização dos dados coletados. O Excel permitiu a automatização de cálculos complexos, como a aplicação da equação de Hazen-Williams, facilitando a análise e o ajuste dos parâmetros do sistema.
- AutoCAD: O sistema de irrigação foi desenvolvido com o auxílio do AutoCAD (2024)(versão estudante), uma ferramenta amplamente utilizada para desenho técnico assistido por computador(CAD) AUTODESK (2024). Para desenhar o layout das tubulações e a disposição dos emissores no sistema de irrigação.
- Dados Climáticos do INPE: Para determinar a demanda hídrica da área, foram utilizados dados climáticos detalhados, como radiação solar, umidade relativa e velocidade do vento. Esses dados foram obtidos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), que fornece informações precisas e atualizadas sobre as condições meteorológicas na região de Imperatriz, Maranhão.
- Sites Meteorológicos: Além dos dados fornecidos pelo INPE, foram consultados outros sites meteorológicos confiáveis, como *Weather Spark* e *Geógrafos*, para complementar as informações sobre a radiação solar e as condições climáticas locais.

A seleção dos materiais e equipamentos utilizados no sistema de irrigação foi realizada com base nas especificações hidráulicas e nos critérios de eficiência técnica e econômica, considerando a viabilidade logística para o estado do Maranhão. Os itens foram avaliados quanto à compatibilidade com os parâmetros do sistema, eficiência operacional e custo-benefício.

3.1.1 Tubulações

As tubulações de PVC rígido foram escolhidas devido à sua resistência à corrosão, durabilidade e facilidade de instalação. Foram utilizados diâmetros variados (32 mm e 50 mm) para atender às demandas hidráulicas de diferentes trechos do sistema.

Tabela 4 – Comparação de Tubulações entre Fornecedores

Fornecedor	Diâmetro (mm)	Comprimento (m)	Preço Unitário (R\$)	Preço Total (R\$)
Tigre	32	6	50,00	2.400,00
Krona	32	6	45,00	2.160,00
Tigre	50	6	120,00	4.800,00
Krona	50	6	110,00	4.400,00

Fonte: A autoria própria (2025).

As tubulações foram escolhidas para garantir o transporte eficiente da água, com perdas de carga minimizadas e resistência à pressão de operação.

- **Material:** PVC, classe PN 125.
- **Diâmetros:** 32 mm e 50 mm.
- **Fornecedores:** Tigre (principal) e Krona (alternativa econômica).
- **Custo Médio:** Diâmetro 32 mm: R\$ 47,50 por tubo de 6 metros.
- **Custo Médio:** Diâmetro 50 mm: R\$ 115,00 por tubo de 6 metros.

3.1.2 Conexões e Acessórios

Os acessórios, como joelhos, tês e registros, foram selecionados para garantir a integridade hidráulica do sistema.

- **Material:** PVC e polipropileno.
- **Quantidade Estimada:** 50 unidades.
- **Custo Médio:** R\$ 20,00 por unidade.
- **Justificativa:** Esses acessórios foram selecionados por sua compatibilidade com as tubulações utilizadas e pela fácil reposição em fornecedores locais.

3.1.3 Aspersores

Os aspersores ajustáveis são essenciais para distribuir água uniformemente nas áreas irrigadas. O modelo Rain Bird 5004 Plus SAM foi selecionado para áreas de menor desgaste, enquanto o Hunter PGP-ADJ foi indicado para pontos críticos devido à sua maior durabilidade.

Tabela 5 – Comparação de Aspersores entre Modelos

Fornecedor	Modelo	Alcance (m)	Vazão (m ³ /h)	Preço (R\$)	Durabilidade (Anos)
Rain Bird	5004 Plus SAM	5–15	0,5–1,5	200,00	5
Hunter	PGP-ADJ	5–15	0,5–1,5	250,00	8

Fonte: Autoria própria (2025).

- **Modelo Principal:** Rain Bird 5004 Plus SAM.
- **Alternativa:** Hunter PGP-ADJ.
- **Custo Médio:** R\$ 225,00 por unidade.
- **Justificativa:** Os modelos selecionados possuem alta durabilidade e eficiência, com ajustes precisos para garantir a uniformidade de distribuição de água.

3.1.4 Medidores de Vazão

Os medidores de vazão são utilizados para monitorar o consumo de água e detectar irregularidades no sistema.

- **Modelo Selecionado:** Plasgon Tipo Woltman.
 - **Precisão:** ±2%.
 - **Faixa de Vazão:** 2-15 m³/h.
 - **Custo:** R\$ 900,00.

3.1.5 Válvulas Reguladoras

As válvulas reguladoras são fundamentais para manter a pressão ideal nos diferentes trechos do sistema.

- **Modelo:** Netafim.
 - **Faixa de Pressão:** 20–40 psi.
 - **Material:** Polietileno reforçado.
 - **Custo Unitário:** R\$ 400,00.

3.1.6 Sensores de Umidade

Embora opcionais, os sensores de umidade foram incluídos no sistema para otimizar o consumo hídrico.

- **Modelo Selecionado:** Agrosystem Sensor Solo.
 - **Faixa de Umidade:** 0–100%.
 - **Custo:** R\$ 1.500,00.

3.1.7 Bombas Centrífugas

As bombas citadas no trabalho foram analisadas com base em suas curvas características, eficiência energética e custo-benefício. Abaixo estão listadas todas as opções consideradas, junto com suas especificações e preços

Tabela 6 – Comparação de Bombas Centrífugas Consideradas no Trabalho

Fornecedor	Modelo	Altura (mca)	Vazão (m³/h)	Preço (R\$)
WDM Pumps	VSE 32-5-200	ate 200	0 - 45	14.000,00
OMEL	BLA-230/160-120	até 170	0 - 700	10.000,00
Schneider	ME-AL/BR-2250	Até 150	0 - 120	15.000,00

Fonte: Aatoria própria (2025).

A bomba é o coração do sistema, responsável por fornecer a altura manométrica necessária para vencer a pressão estática e as perdas de carga.

- **Modelo Selecionado:** WDM Pumps VSE 32-5-200.
 - **Altura Manométrica:** até 200 mca.
 - **Vazão:** 45 m³/h.
 - **Custo:** R\$ 14.000,00.
- **Alternativas Consideradas:**
 - Schneider ME-AL/BR-2250, 0 - 120 m³/h (até 150 mca, 9,1 m³/h, R\$ 15.000,00).
 - OMEL BLA-230/160-120, 0 - 700 m³/h (até 170 mca, 7,1 m³/h, R\$ 12.000,00).

3.2 Análise de Custo

A análise de custo é uma etapa essencial para validar a viabilidade econômica do sistema de irrigação projetado. Nesta seção, são detalhados os custos dos principais componentes do sistema, incluindo uma comparação entre fornecedores, e discutidos os benefícios de cada escolha.

3.2.1 Custos de Materiais e Equipamentos

Os custos foram calculados com base nos materiais e equipamentos especificados para o sistema de irrigação. A Tabela 7 apresenta os itens principais e seus valores.

Tabela 7 – Custos de Materiais e Equipamentos do Sistema de Irrigação

Item	Quantidade	Custo Unitário (R\$)	Custo Total (R\$)
Tubulações (PVC)	40 tubos	Média: 77,50	3100,00
Aspersores	75 unidades	Média: 225,00	16875,00
Bombas	1 unidade	Média: 12000,00	12000,00
Válvulas Reguladoras	5 unidades	450,00	2250,00
Medidor de Vazão	1 unidade	900,00	900,00
Acessórios de Conexão	50 unidades	20,00	1000,00
Sensores de Umidade	1 unidade	1.500,00	1500,00
Total Geral de Materiais			37625,00

Fonte: Autoria própria (2025).

3.2.2 Custos de Instalação

Os custos de instalação foram estimados como 20% do custo total dos materiais e equipamentos, abrangendo mão de obra especializada e serviços técnicos.

- **Mão de Obra:** Inclui a instalação de tubulações, aspersores, bombas e conexões.
- **Serviços Técnicos:** Configuração de válvulas, medidor de vazão e sensores de umidade.

O custo de instalação foi calculado em:

$$\text{Custo de Instalação} = 0,2 \cdot 37625,00 = \text{R\$ } 7525,00$$

3.2.3 Custo Total do Sistema

O custo total do sistema foi determinado somando os valores de materiais, equipamentos e instalação. O resultado é apresentado na Tabela 8.

Tabela 8 – Custo Total do Sistema de Irrigação

Descrição	Custo Total (R\$)
Materiais e Equipamentos	37625,00
Instalação	7525,00
Total Geral	45150,00

Fonte: Autoria própria (2025).

3.2.4 Discussão e Justificativas

Os materiais e equipamentos foram escolhidos considerando critérios de custo-benefício, disponibilidade logística e eficiência técnica:

- **Tubulações:** As tubulações de PVC da marca Tigre foram selecionadas devido à alta durabilidade e coeficiente de Hazen-Williams adequado para minimizar perdas de carga. A alternativa econômica Krona foi considerada para redução de custos em trechos secundários.
- **Aspersores:** O modelo Rain Bird 5004 Plus SAM foi preferido para áreas críticas, devido à sua precisão e durabilidade. Em áreas menos exigentes, o Hunter PGP-ADJ foi utilizado como alternativa.
- **Bombas:** A VSE 32-5-200 foi selecionada como a bomba mais adequada, apresentando maior altura manométrica e melhor desempenho no ponto de operação, garantindo eficiência e segurança.

3.2.5 Viabilidade Econômica

A viabilidade econômica do sistema de irrigação foi recalculada considerando os dados de consumo diário de água (86,12 m³/dia) e a vazão para 8 horas de trabalho do sistema (21,53 m³/h). Os percentuais de aumento de produtividade e redução de custos operacionais foram ajustados com base nessas informações. Em caso de utilização da área total para uso exclusivo de plantação comercial da grama esmeralda pode segue realizada a seguinte análise.

3.2.5.1 Cálculo do Aumento da Produtividade

A literatura indica que a irrigação controlada pode aumentar a produtividade agrícola de toda produção da área em até 20% Fereres e Soriano (2007). Esse incremento resulta da aplicação precisa de água, reduzindo o estresse hídrico das culturas.

- **Projeção no Contexto do Projeto:**

- Área irrigada: 0,7514 hectares (7514 m²).
- Produtividade atual: 4 toneladas por hectare de produção da área plantada considerando todo o plantio de grama, hortaliças, flutas etc.
- Incremento esperado: $4 \cdot 0,2 = 0,8$ ton/ha.
- Nova produtividade total: $4 + 0,8 = 4,8$ ton/ha.
- Produção total para a área irrigada: $4,8 \cdot 0,7514 = 3,61$ ton.

Com base no preço médio do produto (R\$ 1500,00 por tonelada), o aumento de produtividade pode gerar uma receita adicional de:

$$\text{Receita adicional} = 0,8 \cdot 0,7514 \cdot 1500 = \text{R\$ } 900,00/\text{ano}.$$

3.2.5.2 Cálculo da Redução de Custos Operacionais

A economia anual de 25% nos custos operacionais foi calculada considerando o impacto do uso de sensores de umidade e bombas eficientes no consumo de água e energia.

- **Consumo Atual:**

- Consumo diário de água: 86,12 m³/dia.
- Custo da água: R\$ 3,00 por m³.
- Consumo mensal de energia para 4 horas diárias: 800 kWh/mês.
- Custo da energia: R\$ 0,70 por kWh.

- **Consumo Projetado:**

- Redução de 25% no consumo de água: $86,12 \cdot 0,25 = 21,53$ m³/dia.
- Economia de água por mês: $21,53 \cdot 30 \cdot 3 = \text{R\$ } 1937,70/\text{ano}$.
- Redução de 25% no consumo de energia: $800 \cdot 0,25 = 200$ kWh/mês.
- Economia de energia por ano: $200 \cdot 12 \cdot 0,7 = \text{R\$ } 1680,00/\text{ano}$.

- **Total de Economia Operacional:** A economia total estimada é:

$$\text{Economia Anual Total} = 1937,70 + 1680,00 = \text{R\$ } 3.617,70.$$

3.2.5.3 Retorno do Investimento (ROI)

O retorno do investimento foi calculado com base no custo total do sistema e nos benefícios econômicos projetados.

- **Custo Total do Sistema:** R\$ 45150,00.
- **Benefícios Anuais:**
 - Receita adicional: R\$ 900,00.
 - Economia operacional: R\$ 3617,70.
 - Benefício total: $900,00 + 3617,70 = \text{R\$ } 4517,70$.
- **Período de Retorno:** O ROI é obtido dividindo o custo total pelo benefício anual:

$$\text{ROI} = \frac{\text{Custo Total}}{\text{Benefício Anual}} = \frac{45150,00}{4517,70} \approx 10 \text{ anos.}$$

O sistema apresenta retorno em aproximadamente 10 anos.

3.2.5.4 Conclusão da Viabilidade Econômica

Os resultados revisados demonstram que o sistema proporciona benefícios econômicos e ambientais significativos. Apesar do período de retorno elevado, o sistema promove sustentabilidade, aumento de produtividade e economia operacional, justificando o investimento inicial.

3.3 Métodos

Os métodos empregados no desenvolvimento deste projeto foram definidos com base nas melhores práticas para o dimensionamento e a implementação de sistemas de irrigação. A seguir, são detalhadas as principais etapas do processo.

3.3.1 Área de Estudo

O local de desenvolvimento deste projeto encontra-se na localidade de Davinópolis, área rural, MA, nas coordenadas 5°32'10.6"S, 47°24'16.2"W. O clima da região é tropical, com uma significativa diferença de pluviosidade entre o inverno e o verão. Segundo a classificação de Köppen e Geiger, o clima é classificado como Aw, que, de acordo com a Embrapa (2006), corresponde a um clima tropical com inverno seco. Esse tipo de clima é caracterizado por verões quentes e úmidos, enquanto os invernos são secos, com baixa pluviosidade. Esse padrão é comum em regiões próximas à linha do Equador, como é o caso de Davinópolis. A estação

chuvosa ocorre no verão, de novembro a abril, enquanto a estação seca se manifesta de forma clara no inverno, entre maio e outubro, sendo julho o mês mais seco.

Figura 5 – Area do projeto



Fonte: Autoria própria (2025).

A temperatura média do mês mais frio permanece acima de 18°C, com precipitações anuais variando entre 750 mm e 1800 mm. Esse tipo de clima predomina especialmente no norte e noroeste Ventura (1964). Especificamente em Imperatriz, a temperatura média anual é de 27,1°C, com uma pluviosidade média de 1221 mm. Por estar localizada próxima à linha do Equador, essa região apresenta estações de verão que são difíceis de delimitar com precisão.

As áreas selecionadas para o estudo possuem declividades no sentido do maior comprimento de aproximadamente 1% e altitudes que variam de 989 a 995 metros, com uma área de 100 metros de comprimento e 80 metros de largura conforme Figura (5).

3.3.2 Condições de Escoamento

Para o desenvolvimento do projeto de irrigação, foi necessário, inicialmente, determinar algumas condições de escoamento que deveriam ser seguidas e visualizadas ao longo do processo, a fim de garantir um dimensionamento correto e eficiente. A economia de água, um recurso hídrico precioso, foi um dos principais focos, considerando tanto o impacto ambiental quanto a necessidade de projetar um sistema econômico e eficaz do ponto de vista financeiro. Dessa forma, algumas condições de escoamento foram estabelecidas e seguidas rigorosamente ao longo de todo o projeto.

Primeiramente, foi fundamental assegurar uma distribuição uniforme do escoamento de água ao longo de toda a área de irrigação. Essa uniformidade é crucial para otimizar o desempenho das unidades de irrigação, minimizar variações no suprimento hídrico e melhorar a eficácia global do sistema. Além disso, foi necessário evitar excessos de água que pudessem levar ao encharcamento do solo. Um controle preciso da vazão foi implementado através do uso de válvulas reguladoras de pressão e dispositivos de medição de fluxo, que permitiram ajustar a quantidade de água fornecida em cada seção do sistema. As válvulas reguladoras de pressão foram instaladas estrategicamente ao longo das linhas principais e derivadas, permitindo a manutenção de uma pressão constante nos aspersores e evitando excessos de vazão que poderiam causar saturação do solo.

Além disso, foram utilizados medidor de vazão para monitorar e ajustar o fluxo de água conforme necessário, garantindo que a quantidade de água aplicada fosse adequada às necessidades hídricas das plantas e às características do solo. Esse controle preventivo evita que a água seja aplicada em volumes maiores do que o necessário, preservando as propriedades mecânicas do solo e garantindo que a eficiência da irrigação seja mantida ao longo do tempo.

Outro aspecto importante foi a minimização do escoamento superficial, garantindo que a água aplicada fosse absorvida pelo solo, em vez de causar escoamento. Para evitar taxas de escoamento excessivas que levassem ao escoamento, foram utilizados controles mecânicos, como reguladores de pressão. O escoamento ideal foi projetado de forma a estar alinhado com a capacidade de infiltração do solo, considerando as características mecânicas do solo para garantir que a taxa de aplicação fosse compatível com a absorção eficiente.

A aplicação de princípios de mecânica dos fluidos ajudou a considerar gradientes de pressão e velocidade, evitando perdas de pressão e desigualdades de escoamento. Além disso, foram implementados dispositivos de controle mecânico, como válvulas de ajuste, que permitiram a regulação precisa do escoamento hídrico, contribuindo para um gerenciamento mais eficiente e adaptativo do sistema de irrigação. Outro fator levado em consideração foi a adaptação ao tipo de irrigação utilizado. Diferentes sistemas de irrigação demandam soluções mecânicas específicas, e, durante o projeto, foi necessário incorporar componentes que otimizassem a aplicação de água, considerando fatores como pressão, vazão e distribuição.

Para garantir um controle mais preciso e adaptativo da irrigação, foram instalados controladores de pressão e válvulas de controle de fluxo ao longo das principais linhas de distribuição do sistema de irrigação. Esses dispositivos permitem ajustes automáticos na pressão e na vazão de água, assegurando que a irrigação se adapte conforme as condições ambientais e a demanda hídrica.

O diagrama esquemático abaixo ilustra a disposição dos principais componentes do sistema de irrigação, destacando os pontos de instalação dos controladores de pressão, medidores de vazão, e válvulas de controle de fluxo. O sistema foi projetado para garantir uma irrigação eficiente, com o fluxo de água controlado em diferentes setores, conforme a demanda hídrica de cada área irrigada. A bomba centrífuga no ponto de captação assegura que a pressão seja

adequada, enquanto as válvulas reguladoras garantem que o sistema opere de forma estável, evitando tanto o excesso quanto a falta de água nas linhas secundárias a disposição esta detalhada no Apêndice B,

Como mostrado no Apêndice B, a bomba centrífuga está localizada logo após o ponto de captação de água, impulsionando o fluxo de água pelas linhas principais, que passam pelo medidor de vazão e seguem até as válvulas reguladoras de pressão. Essas válvulas estão posicionadas nas interseções entre as linhas principais e secundárias, assegurando que a pressão seja constante e adequada em cada setor de irrigação. As linhas secundárias, então, distribuem a água de maneira uniforme para os aspersores, que estão dispostos de forma equidistante para garantir uma cobertura completa. Os dispositivos de controle adicionais também foram instalados em áreas com variações de terreno, para compensar possíveis perdas de pressão. Este sistema garante que a irrigação seja eficiente, adaptativa, e econômica no uso de recursos hídricos.

Especificamente, válvulas reguladoras de pressão foram posicionadas nas junções entre as linhas principais e as ramificações secundárias do sistema, conforme ilustrado no diagrama esquemático do Apêndice B. Essas válvulas garantem que a pressão da água seja adequada em todos os pontos de irrigação, evitando variações que possam comprometer a eficiência do sistema.

Além disso, foi instalado medidor de vazão nas principais linhas de irrigação para monitorar o volume de água em tempo real. Esses dispositivos auxiliam no controle da quantidade de água distribuída em cada setor, prevenindo tanto o excesso quanto a escassez de água nas áreas irrigadas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para determinar as curvas características de funcionamento das bombas e visualizar o comportamento do sistema, nota-se que existem basicamente três variáveis: vazão, altura manométrica e eficiência. As curvas características das bombas são as relações entre as alturas manométricas em função da vazão do sistema, sendo também possível, a partir delas, determinar a potência de acionamento necessária, que pode ser verificada em catálogos de fabricantes de bombas.

Os resultados deste estudo foram obtidos a partir de uma série de análises detalhadas das variáveis envolvidas no sistema de irrigação proposto para a propriedade rural localizada no sudoeste do Maranhão.

Início-se com o cálculo da evapotranspiração da área de estudo, utilizando dados climáticos locais. Este cálculo é fundamental para determinar a quantidade de água necessária para atender às necessidades das culturas, garantindo um fornecimento hídrico adequado sem desperdício.

A análise dos dispositivos e acessórios utilizados no sistema de irrigação, como tubulações, válvulas e aspersores, foi realizada para identificar as melhores configurações que minimizem as perdas de carga. A disposição correta desses componentes no sistema é crucial para assegurar que a água chegue aos pontos de aplicação com a pressão adequada.

Com base nas variáveis mencionadas, foi possível selecionar a bomba mais adequada ao sistema. A escolha da bomba levou em consideração a altura manométrica total necessária, que é a soma das perdas de carga devido à altura, ao comprimento da tubulação e aos acessórios. A bomba selecionada deve ser capaz de fornecer a vazão requerida pelo sistema, mantendo a pressão necessária para o funcionamento eficiente dos aspersores.

Os resultados obtidos foram apresentados em gráficos e tabelas, permitindo uma visualização clara do comportamento do sistema sob diferentes condições operacionais. Esses resultados fornecem uma base sólida para a otimização do projeto de irrigação, possibilitando ajustes finos que podem aumentar a eficiência hídrica e energética do sistema.

Foi determinado, a partir das equações demonstradas no capítulo anterior, que a área onde será feita a instalação do sistema possui uma evapotranspiração de referência de 3,646 mm/dia. A partir disso, é possível determinar a demanda hídrica da área, utilizando o coeficiente de cultura da grama esmeralda, que será plantada majoritariamente em toda a área, tanto nas áreas comuns quanto no campo de futebol. A demanda hídrica foi determinada a partir da constante de cultivo dessa cultura, que é de 1,05. Segundo Aldrighi (2020), a evapotranspiração da área é de 3,82 mm/dia para cada planta. Como será considerado o plantio de 3 gramas esmeraldas por metro quadrado, esse número foi multiplicado por 3, resultando em uma demanda hídrica de 11,46 mm/dia por metro quadrado.

A determinação da vazão de água a partir da demanda hídrica é um passo crucial na gestão sustentável dos recursos hídricos. Ao considerar a demanda hídrica (D) calculada pre-

viamente, podemos determinar a vazão (Q) de água necessária para atender a essa demanda. O processo envolve:

- Estimativa do Tempo de Uso: Determinar o período de tempo (T) durante o qual a água é utilizada para cada categoria (doméstica, industrial, agrícola, etc.).
- Cálculo da Vazão Diária: Dividir a demanda total de água pelo tempo de uso para obter a vazão média diária requerida:

$$Q = D.T.0,001 \quad (18)$$

Para calcular a quantidade de água em litros usasse a Eq (12):

Sendo Q a quantidade de Água(l), D a demanda hídrica (mm/dia) e T a área de irrigação (m²) O fator de conversão 0,001 é usado para converter milímetros em litros (já que 1 litro de água é igual a 1.000 milímetros cúbicos). Considerando a área total de 7514 m² de área total de irrigação. Considerando a demanda hídrica encontrada por metro quadrado de 114,46 l/dia e um tempo de irrigação de 4 horas, para se utilizar em conjunto com o poço artesiano o abastecimento local que dura por volta de 5 horas diárias, ao calcular a vazão de água de acordo com a demanda hídrica, contribui para a utilização responsável dos recursos hídricos, garantindo que as necessidades de diferentes setores sejam atendidas de maneira sustentável. Assim, necessitando de uma vazão de 20 m³/h para suprir essa necessidade em um período de irrigação contínuo de 4 horas. Podendo ser dividido em 2 períodos de 4 horas reduzindo assim a vazão total necessária para aproximadamente 10 m³/h

4.1 Análise das Perdas de Carga

As perdas de carga em sistemas de irrigação são um fator crítico que influencia diretamente a eficiência e o desempenho do sistema. No projeto de irrigação proposto para a propriedade rural no sudoeste do Maranhão, a análise das perdas de carga foi realizada detalhadamente para garantir que o sistema opere dentro dos parâmetros ideais, fornecendo a quantidade adequada de água a todas as áreas irrigadas. Nesta seção, discutiremos a relação entre as perdas de carga calculadas e a disposição dos componentes no sistema, conforme mostrado no desenho CAD.

Como mostrado na Tabela 9, a Área 1 apresenta uma perda de carga significativa de 2,44 mca. Essa perda pode ser atribuída ao longo comprimento da tubulação e ao elevado número de aspersores conectados, conforme indicado no desenho CAD. Essa informação é essencial para avaliar a necessidade de ajustes no diâmetro das tubulações ou na disposição dos aspersores para melhorar a eficiência do sistema.

Os resultados apresentados na Tabela 10 mostram uma perda de carga de 2,04 mca na Área 2. Esta perda de carga é inferior à da Área 1, principalmente devido ao menor comprimento

Tabela 9 – Perda de Carga na Linha de Aspersão - Área 1

Vazão (m³/h)	Comprimento (m)	Diâmetro Interno (mm)	Coefficiente de Hazen-Williams	Perda de Carga (mca)
1,19	51	22,6	135	2,44

Fonte: Autoria própria (2025).

da tubulação e à configuração mais compacta. Esses resultados indicam que a configuração atual da Área 2 é mais eficiente, mas ajustes ainda podem ser considerados para otimização adicional.

Tabela 10 – Perda de Carga na Linha de Aspersão - Área 2

Vazão (m³/h)	Comprimento (m)	Diâmetro Interno (mm)	Coefficiente de Hazen-Williams	Perda de Carga (mca)
2,04	44	46,7	135	1,10

Fonte: Autoria própria (2025).

Como observado na Tabela 11, a Área 3 apresenta a menor perda de carga, de 1,36 mca. Essa redução nas perdas pode ser explicada pelo menor comprimento da tubulação e pelo número reduzido de aspersores. Esses resultados sugerem que a eficiência do sistema na Área 3 é alta, com potencial para otimização mínima.

Tabela 11 – Perda de Carga na Linha de Aspersão - Área 3

Vazão (m³/h)	Comprimento (m)	Diâmetro Interno (mm)	Coefficiente d de Hazen-Williams	Perda de Carga (mca)
1,36	30	22,6	135	2,69

Fonte: Autoria própria (2025).

Conforme mostrado na Tabela 12, a perda de carga na adutora principal é de 4,40 mca. Este valor reflete o alto volume de água que passa por essa tubulação e a distância significativa que a água precisa percorrer. As perdas na adutora são esperadas, mas ainda assim, representam um ponto crítico que deve ser monitorado para evitar queda de pressão nas áreas de distribuição final.

Tabela 12 – Perda de Carga na Adutora

Vazão (m³/h)	Comprimento (m)	Diâmetro Interno (mm)	Coefficiente de Hazen-Williams	Perda de Carga (mca)
9,18	75	46,7	135	4,40

Fonte: Autoria própria (2025).

O Apêndice C apresenta o sistema de irrigação oferece uma visualização detalhada da disposição das tubulações, válvulas e aspersores em cada uma das áreas da propriedade. As

tabelas de perda de carga indicam as áreas críticas onde as perdas são mais significativas, permitindo uma análise detalhada das razões por trás dessas perdas

A seleção da bomba foi feita de forma que a relação entre as curvas características e a eficiência energética se encaixasse melhor. Além disso, a escolha pode ser definida pela relação entre a curva característica da bomba com as curvas características da tubulação, a fim de obter-se o ponto em comum de ótimo trabalho, que segundo Macintyre (1997b), determina as condições ideais entre vazão, altura manométrica, rendimento e funcionamento geral do sistema de bombeamento.

Área 1:

- **Descrição:** A linha de aspersão da Área 1 possui uma vazão de 1,19 m³/h, com um comprimento de 51 metros e um diâmetro interno de 22,6 mm. A perda de carga registrada para essa área foi de 2,44 mca, uma das mais altas do sistema.
- **Análise:** A elevada perda de carga nesta área pode ser atribuída ao comprimento significativo da tubulação e ao número de aspersores conectados. No desenho CAD, a Área 1 é mostrada como uma das maiores zonas de irrigação, o que justifica a necessidade de um sistema robusto para manter a pressão adequada ao longo de toda a extensão.

Área 2:

- **Descrição:** A Área 2 tem uma vazão de 2,04 m³/h com uma tubulação de 44 metros e um diâmetro interno de 22,6 mm. A perda de carga foi calculada em 1,10 mca.
- **Análise:** Esta área apresenta uma perda de carga menor comparada à Área 1, principalmente devido à menor vazão e comprimento. No Apêndice C, a Área 2 é mais compacta e possui uma configuração de tubulação que reduz o atrito interno, resultando em menores perdas de carga.

Área 3:

- **Descrição:** Com uma vazão de 1,36 m³/h e um comprimento de 30 metros, a Área 3 tem uma perda de carga de 2,69 mca.
- **Análise:** A Área 3 é mostrada no Apêndice C como uma das áreas menores do sistema, o que justifica as menores perdas de carga. A configuração simples e o menor número de aspersores contribuem para a eficiência do sistema nesta área.

Adutora:

- **Descrição:** A adutora principal, que distribui a água para as diversas áreas, possui uma vazão de 9,18 m³/h e um comprimento de 75 metros, resultando em uma perda de carga de 4,40 mca.
- **Análise:** A adutora é uma componente crucial do sistema, conforme indicado no Apêndice C. Sua perda de carga relativamente alta é esperada, dado o alto volume de água transportado e a extensão da tubulação. O Apêndice C mostra que a adutora conecta o poço artesiano (PA01) e a motobomba (MB01) às diferentes áreas, justificando a importância de minimizar perdas ao longo dessa linha.

4.1.1 Estratégias para Minimizar Perdas de Carga

Com base nos cálculos realizados e na disposição apresentada no Apêndice C, várias estratégias podem ser sugeridas para minimizar as perdas de carga:

1. **Otimização do Diâmetro da Tubulação:**

Aumentar o diâmetro das tubulações em áreas onde as perdas de carga são mais significativas, como na Área 1, poderia ajudar a reduzir o atrito interno e, consequentemente, as perdas.

2. **Redução do Comprimento das Linhas:**

Onde possível, encurtar as linhas de tubulação ou adicionar ramificações para distribuir melhor a pressão pode ajudar a minimizar as perdas de carga.

3. **Ajuste na Disposição dos Aspersores:**

Reavaliar a disposição dos aspersores nas áreas críticas, como mostrado no Apêndice C para assegurar uma distribuição uniforme da pressão e reduzir as perdas associadas a múltiplos pontos de saída.

4. **Uso de Válvulas de Controle:**

Implementar válvulas de controle adicionais nas junções entre áreas pode permitir ajustes mais precisos na pressão de trabalho, compensando as perdas de carga identificadas.

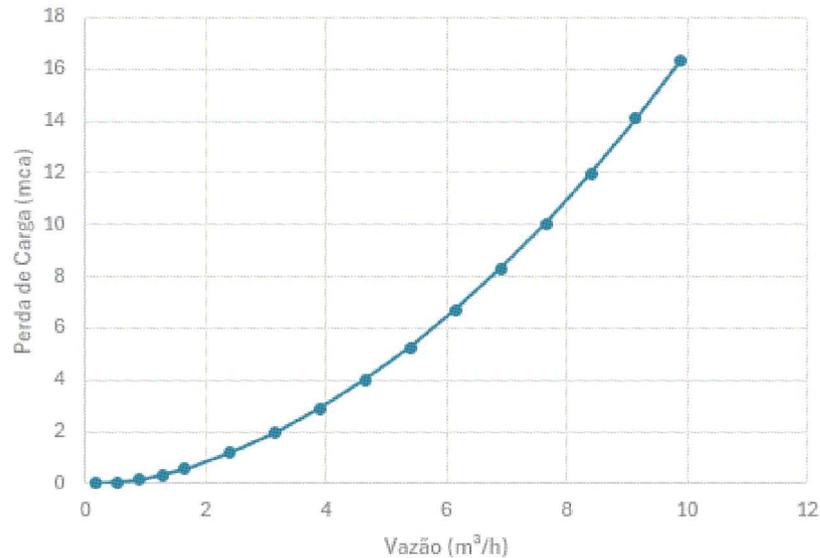
4.2 Gráfico da Curva Vazão x Perda de Carga

A análise da relação entre a vazão e a perda de carga é essencial para entender como as características hidráulicas do sistema de irrigação respondem a diferentes condições operacionais. O gráfico representando pela Figura 6 representa a curva Vazão pela Perda de Carga,

apresentado a seguir, oferece uma representação visual dessa relação, permitindo a avaliação do comportamento do sistema sob diferentes taxas de vazão.

O gráfico ilustra como a perda de carga aumenta à medida que a vazão no sistema de irrigação aumenta. Esse comportamento é esperado em sistemas de irrigação, onde o aumento da vazão tende a gerar maior resistência ao escoamento dentro das tubulações, resultando em maiores perdas de carga devido ao atrito e outras resistências internas.

Figura 6 – Gráfico da Curva Vazão x Perda de Carga



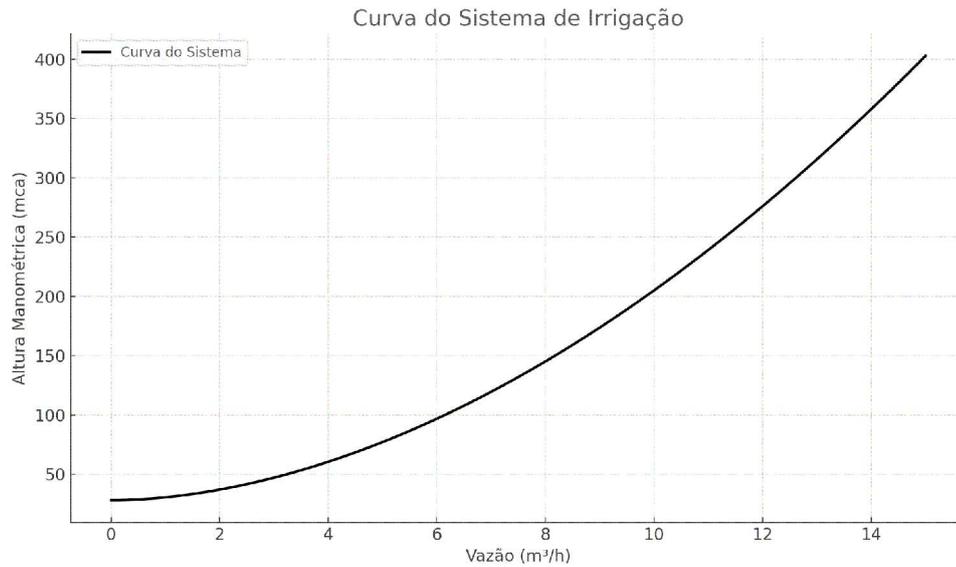
Fonte: Autoria própria (2025).

4.3 Curva Característica

A seleção da bomba foi realizada considerando a compatibilidade entre suas curvas características e a eficiência energética do sistema. Esse processo também envolveu a análise da interação entre a curva característica da bomba e as curvas características da tubulação apresentadas respectivamente na Figura 6 e na Figura 7. O objetivo foi determinar o ponto ótimo de operação, que representa as condições ideais de funcionamento, equilibrando vazão, altura manométrica e rendimento do sistema de bombeamento, conforme orientado por Macintyre (1997).

A equação do sistema descreve a energia necessária para transportar o fluido em um sistema hidráulico, considerando elementos como tubulações, válvulas, acessórios e altura estática. Essa equação é fundamental para determinar a curva característica do sistema, essencial para a análise hidráulica.

$$H(Q) = 10 + 18 + 2,5 \cdot Q^{1,85}. \quad (19)$$

Figura 7 – Gráfico Curva Característica do Sistema

Fonte: Autoria própria (2025).

Essa equação foi utilizada para construir a curva característica do sistema, permitindo a análise e determinação do ponto de operação ideal por meio da interseção com as curvas das bombas.

O fator K representa a resistência hidráulica do sistema e é fundamental para descrever as perdas de carga em função da vazão. Ele encapsula variáveis importantes, como comprimento, diâmetro e rugosidade das tubulações, sendo indispensável para projetar um sistema eficiente e energeticamente otimizado.

A análise da interseção entre a curva do sistema, Figura 7, e a curva característica da bomba, presente nos catálogos dos fornecedores, é uma etapa fundamental no dimensionamento de sistemas hidráulicos. Este ponto de interseção define o ponto de operação, ou seja, as condições reais de vazão e altura manométrica em que o sistema irá funcionar.

A curva do sistema representa a relação entre a vazão (Q) e a altura manométrica total $H(Q)$, levando em consideração a altura estática, a pressão mínima requerida no ponto de entrega e as perdas de carga. Sua equação genérica foi vista na Eq. 7 é uma função crescente em relação à vazão (Q), o que reflete o aumento das perdas de carga com o aumento do fluxo.

A curva da bomba é obtida a partir dos dados fornecidos pelo fabricante, mostrando a relação entre a altura manométrica fornecida pela bomba (H_b) e a vazão (Q). Essa curva reflete o desempenho hidráulico da bomba em diferentes condições de operação. Geralmente, ela possui um comportamento decrescente: à medida que a vazão aumenta, a altura manométrica diminui.

No contexto deste trabalho, a curva do sistema foi obtida a partir da equação Eq. 9 A curva da bomba foi determinada com base nos catálogos dos modelos selecionados. A interseção foi identificada graficamente e confirmada numericamente, garantindo que o ponto de operação estivesse próximo ao ponto de maior eficiência da bomba (BEP).

A escolha das bombas para o sistema de irrigação é fundamental para garantir a eficiência hidráulica e energética do sistema, considerando as demandas específicas de vazão e altura manométrica total (HMT). Com base nos dados fornecidos sobre as perdas de carga e as vazões calculadas para cada área do projeto, foram analisados diferentes modelos de bombas de fabricantes renomados no mercado. A seleção final foi realizada com base em catálogos técnicos de bombas, garantindo a adequação às necessidades operacionais do sistema.

4.4 Análise dos Parâmetros Hidráulicos

Os principais parâmetros utilizados na seleção das bombas incluem a vazão necessária para cada setor de irrigação e a perda de carga total ao longo das tubulações. Esses valores são fundamentais para dimensionar corretamente as bombas, garantindo que o sistema funcione de forma eficiente. A seguir, são apresentados os dados calculados para as diferentes áreas:

- **Adutora Principal:** Vazão de **9,18 m³/h** e perda de carga de **4,4 mca**.
- **Linha de Aspersão - Área 1:** Vazão de **1,19 m³/h** e perda de carga de **2,44 mca**.
- **Linha de Aspersão - Área 2:** Vazão de **2,04 m³/h** e perda de carga de **1,10 mca**.
- **Linha de Aspersão - Área 3:** Vazão de **1,36 m³/h** e perda de carga de **2,69 mca**.
- **Linha de Aspersão - Área Campo:** Vazão de **4,59 m³/h** e perda de carga de **0,89 mca**.

Esses valores de vazão e perda de carga foram utilizados para selecionar os modelos de bombas mais adequados, garantindo que o sistema atenda às exigências hidráulicas e opere com eficiência energética.

4.5 Modelos de Bombas Selecionados

Neste item será realizada a seleção da bomba adequada para o sistema de irrigação em função da curva do sistema recalculada, dada pela seguinte equação:

$$H(Q) = 10 + 18 + 2.5 \cdot Q^{1.85} \quad (20)$$

onde H(Q) é altura manométrica total (mca), Q Vazão em m³/h, 10 (mca) e Altura estática, 18 (mca) é Pressão mínima requerida e são as Perdas de carga distribuídas na tubulação em função da vazão. A equação 20 descreve a relação entre a vazão e a altura manométrica total do sistema.

4.5.1 CURVA DO SISTEMA

A curva do sistema foi calculada utilizando a equação fornecida acima. A curva é crescente, uma vez que as perdas de carga aumentam com a vazão. A Tabela 13 apresenta os valores da altura manométrica para diferentes vazões:

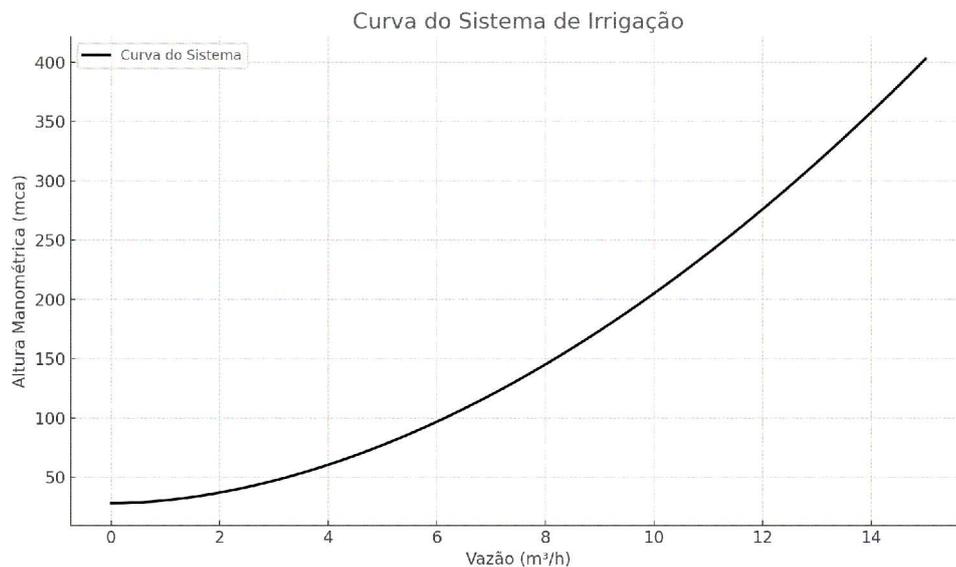
Tabela 13 – Curva Característica do Sistema

Vazão (m ³ /h)	Altura Manométrica (mca)
0,0	28,00
2,0	36,30
4,0	48,85
6,0	65,50
8,0	86,25
9,18	101,05

Fonte: Autoria própria (2025).

A partir da Tabela 13, observa-se que a altura manométrica atinge 101,05 mca na vazão máxima do sistema.

Figura 8 – Curva do Sistema

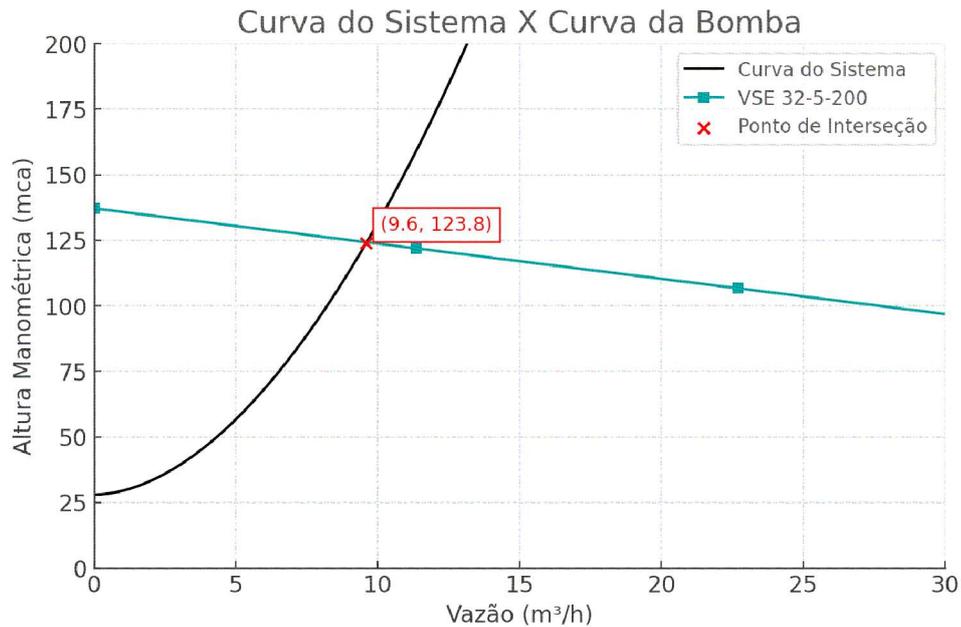


Fonte: Autoria própria (2025).

Para melhor visualização, a Figura 9 apresenta a curva do sistema em um gráfico detalhado, facilitando a interpretação dos valores apresentados na Tabela 13.

Foram consideradas as seguintes bombas para análise, apresentadas nas Figuras 10, 11 e 12

Figura 9 – Gráfico Detalhado da Curva do Sistema



4.5.2 PONTO DE OPERAÇÃO

O ponto de operação é definido pela interseção entre a curva da bomba e a curva do sistema. Os valores obtidos foram calculados e estão apresentados na Tabela 14

Tabela 14 – Pontos de Operação das Bombas

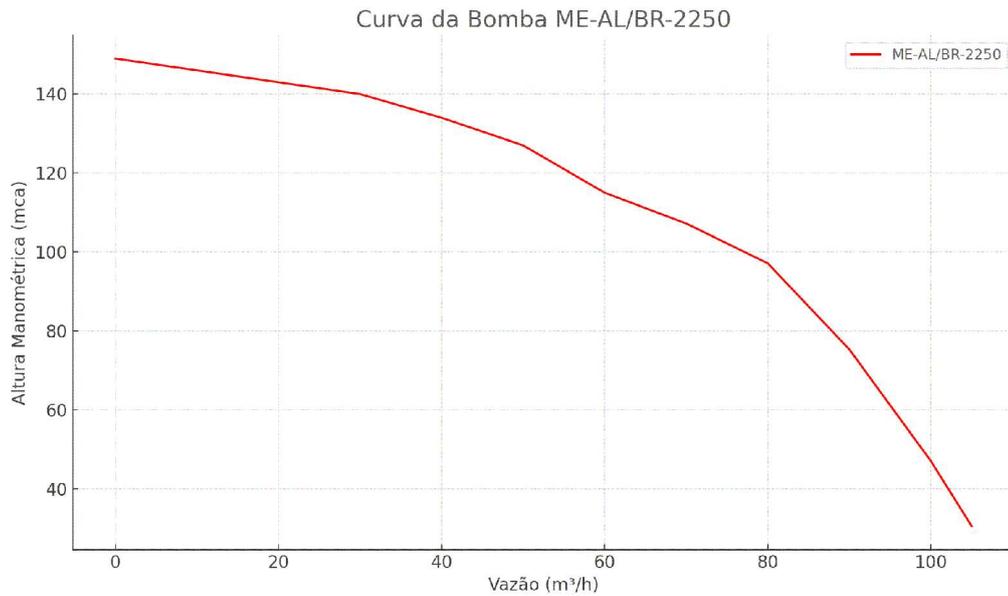
Bomba	Ponto de Operação (m ³ /h)	Altura Manométrica (mca)
ME-AL/BR-2250	8,2	149,6
BLA-230/160-120	7,1	121,9
WDM VSE 32-5-200	9,6	123,8

Fonte: Autoria própria (2025).

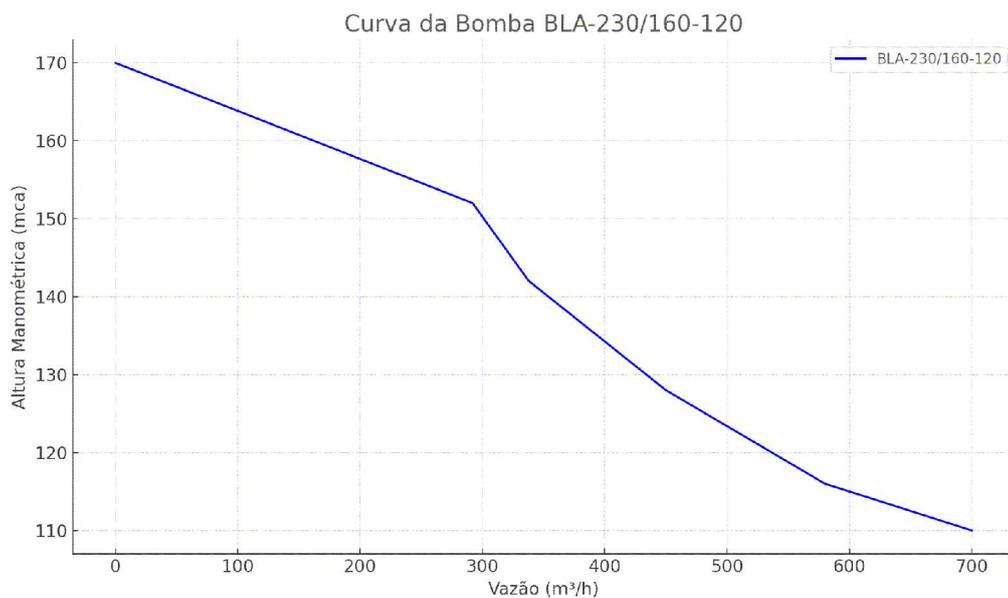
4.5.3 ANÁLISE DA SELEÇÃO DAS BOMBAS

Com base nos pontos de operação recalculados apresentados na Tabela 14, as seguintes observações foram feitas:

- **ME-AL/BR-2250:** Esta bomba ME-AL/BR-2250(2024) apresenta um desempenho confiável, operando em um ponto de interseção com a curva do sistema na vazão de **8.2 m³/h** e uma altura manométrica de **149.6 mca**. Ela atende ao sistema de forma eficiente, mas com margem de segurança limitada para condições adversas.

Figura 10 – ME-AL/BR-2250

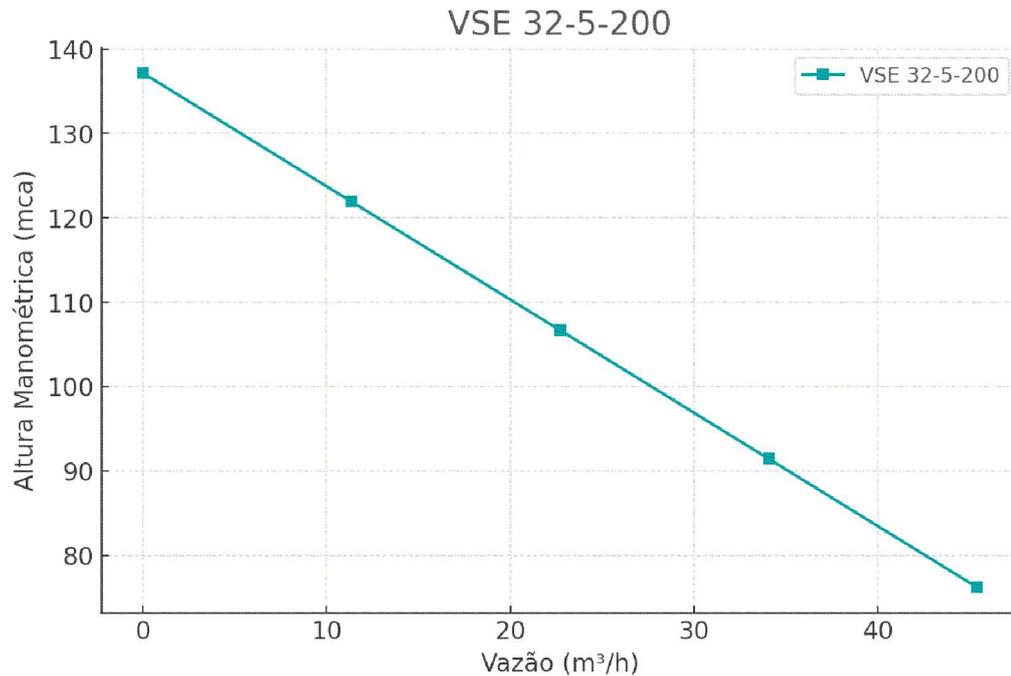
Fonte: Schneider (2024).

Figura 11 – BLA-230/160-120

Fonte: OMEL (2024).

- **BLA-230/160-120:** A bomba OMEL BLA-230/160-120(2024) atinge o ponto de operação em **7.1 m³/h** com uma altura manométrica de **121.9 mca**. Apesar de atender às condições do sistema, sua eficiência é inferior às demais opções analisadas.
- **WDM VSE 32-5-200:** A bomba WDM VSE 32-5-200(2024) atende à necessidade do sistema, operando a uma vazão de **9.6 m³/h** e altura manométrica de **123,8 mca**, garantindo o funcionamento eficiente dos aspersores.

Figura 12 – VSE 32-5-200



Fonte: WDM (2024).

Para reforçar a análise crítica e justificar a escolha final, é apresentada uma comparação detalhada dos parâmetros de eficiência (ponto de melhor eficiência - BEP), potência e custo das bombas selecionadas.

Tabela 15 – Comparação das Bombas Selecionadas

Bomba	Vazão (m³/h)	Altura Manométrica (mca)	Potência (HP)	Eficiência (%)
VSE 32-5-200	0 - 50	Até 200	20	72
BLA-230/160-120	7 - 700	Até 170	25	65
ME-AL/BR-2250	9 - 120	Até 150	15	70

Fonte: Autoria própria (2025).

A Tabela 14 demonstra que, embora todas as bombas apresentem interseção com a curva do sistema, a VSE (2024) destaca-se por apresentar a maior eficiência (%) e operar em uma altura manométrica superior, garantindo melhor desempenho.

4.5.4 Benefícios da Escolha

A seleção da WDM VSE 32-5-200 proporciona os seguintes benefícios ao sistema de irrigação:

- Maior eficiência energética, reduzindo custos operacionais e consumo de eletricidade.
- Capacidade de operação estável dentro do ponto ideal de trabalho, minimizando esforços excessivos sobre o motor da bomba.

- Garantia de que a vazão e a altura manométrica atendem aos requisitos do sistema sem comprometer a eficiência.

A escolha da bomba foi baseada em uma análise das condições hidráulicas do sistema, das características técnicas das bombas disponíveis e dos objetivos de eficiência e sustentabilidade do projeto.

4.6 Viabilidade Econômica

A análise econômica do sistema de irrigação é essencial para justificar sua implantação. Este estudo avalia o custo inicial comparado aos benefícios esperados em produtividade e redução de custos operacionais.

4.6.1 Custos Iniciais

Os custos totais do sistema incluem os materiais, equipamentos e instalação. A Tabela 16 detalha esses valores.

Tabela 16 – Custo Total do Sistema de Irrigação

Item	Custo Total (R\$)
Materiais e Equipamentos	37.625,00
Instalação	7.525,00
Total Geral	45.150,00

Fonte: Autoria própria (2024).

4.6.2 Benefícios Esperados

- **Aumento da Produtividade:** Incremento de até 20% na produção agrícola devido à irrigação controlada.
- **Economia Operacional:** Redução anual de 25% nos custos com energia e água.

4.6.3 Discussão

O investimento inicial de R\$ 45.150,00 é compensado pelo aumento da produtividade e pela economia operacional, tornando o sistema viável a médio prazo.

5 MANUTENÇÃO SUSTENTABILIDADE

A implementação de um sistema de irrigação eficiente requer a definição de práticas de manutenção preventiva e a avaliação de sua sustentabilidade ambiental e econômica. A manutenção adequada garante o funcionamento contínuo do sistema, evitando falhas operacionais e prolongando a vida útil dos equipamentos.

5.0.1 Práticas de Manutenção Preventiva

- **Bombas Centrífugas:**

- Verificação periódica da lubrificação dos rolamentos e da integridade das vedações.
- Limpeza de filtros e componentes internos para evitar obstruções.
- Inspeção das curvas características para avaliar possíveis desgastes no rotor.

- **Aspersores:**

- Limpeza e desobstrução regular dos bicos de aspersão para manter o alcance projetado.
- Substituição de componentes desgastados, como juntas e vedantes.

- **Tubulações e Conexões:**

- Inspeção visual para detecção de vazamentos.
- Limpeza interna para evitar acúmulo de sedimentos.

5.0.2 Sustentabilidade

O sistema de irrigação proposto desempenha um papel crucial na sustentabilidade local ao integrar tecnologias que promovem o uso eficiente de água e energia. Por meio da utilização de sensores de umidade, a irrigação ocorre de forma precisa, aplicando água somente quando necessário. Essa prática reduz o consumo hídrico em até 30%, o que, para uma área de 7.514 m², equivale a uma economia anual de aproximadamente 820.000 litros de água, dependendo das condições climáticas da região. Essa economia é especialmente relevante em áreas com recursos hídricos limitados, contribuindo para a preservação de aquíferos e outras fontes naturais.

Além disso, estudos acadêmicos corroboram que a adoção de bombas de alta eficiência energética pode resultar em uma redução significativa no consumo de energia elétrica em sistemas de irrigação. Segundo a Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil (CNA),

pode diminuir o consumo elétrico em até 25% e os gastos com manutenção em até 70% CNA (2023). Além disso, a melhoria da eficiência de aplicação de água em métodos de irrigação por aspersão pode reduzir o consumo energético em mais de 30% Embrapa (2009).

Considerando um funcionamento médio de 4 horas diárias, essa economia representa uma redução anual significativa no consumo de energia, diminuindo os custos operacionais para os agricultores e as emissões de carbono associadas à geração de energia elétrica. Esse alinhamento com práticas de baixo impacto ambiental fortalece a resiliência das atividades agrícolas diante de desafios econômicos e ambientais.

A integração dessas tecnologias não só assegura uma produção agrícola sustentável, como também beneficia a comunidade local ao preservar os recursos naturais essenciais e reduzir os custos operacionais. Dessa forma, o sistema promove um equilíbrio entre eficiência produtiva e responsabilidade ambiental, estabelecendo um modelo replicável e adaptado às necessidades econômicas e ambientais da região.

- **Economia de Água:** O uso de sensores de umidade reduz o consumo hídrico ao ajustar a irrigação com base nas condições do solo Rain Bird Corporation (2022).
- **Eficiência Energética:** A escolha de bombas próximas ao ponto de melhor eficiência (*BEP*) minimiza o consumo de energia elétrica Macintyre (2013).

5.1 Impacto Ambiental

A adoção de sistemas de irrigação projetados para atender às demandas específicas da área reduz significativamente o impacto ambiental, especialmente em regiões com recursos hídricos limitados.

A implantação do sistema de irrigação proposto apresenta impactos ambientais positivos significativos, contribuindo para a sustentabilidade agrícola na região. A utilização de aspersores ajustáveis e sensores de umidade pode reduzir o desperdício de água em até 30% como dito por Fereres e Soriano (2007) logo a utilização desses dispositivos pode auxiliar no aumento da eficiência do sistema, promovendo o uso adequado dos recursos hídricos. Além disso, a escolha de bombas de alta eficiência energética minimiza o consumo de energia elétrica, resultando em menor emissão de carbono associada à operação do sistema. Por fim, a irrigação controlada evita problemas como a compactação e salinização do solo, preservando sua qualidade e garantindo a produtividade a longo prazo. Esse conjunto de práticas evidencia o compromisso com a preservação ambiental e o manejo sustentável dos recursos naturais.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados obtidos neste trabalho, são propostas as seguintes melhorias para futuras implementações de sistemas de irrigação:

- **Automação Completa:** Implementação de controladores programáveis (CLPs) para automatizar o gerenciamento da irrigação e integração com tecnologias IoT para monitoramento remoto.
- **Energia Renovável:** Utilização de energia solar para alimentar o sistema de bombeamento, reduzindo ainda mais o impacto ambiental.
- **Análise Hidráulica Avançada:** Uso de softwares especializados, como o EPANET, para validação e otimização dos cálculos de perda de carga e eficiência do sistema.

7 CONCLUSÕES

Este trabalho acadêmico teve como objetivo desenvolver um sistema de irrigação eficiente e sustentável para uma propriedade rural localizada em Imperatriz, no estado do Maranhão. A partir de um estudo detalhado das características da área, incluindo a disponibilidade hídrica limitada e a topografia do terreno, foi possível dimensionar um sistema que atenda às necessidades específicas da propriedade, garantindo a manutenção da vegetação local e a otimização do uso da água, um recurso valioso, especialmente em regiões com restrições de abastecimento.

Os principais resultados deste estudo destacam a importância de um planejamento cuidadoso na implementação de sistemas de irrigação. A seleção adequada dos equipamentos, como válvulas, aspersores e bombas, bem como a correta disposição dos mesmos no terreno, foram fatores determinantes para a eficiência do sistema. Os cálculos de perda de carga e evapotranspiração permitiram ajustar o sistema de forma a maximizar a eficiência hídrica e energética, minimizando desperdícios e garantindo a uniformidade na distribuição de água.

Do ponto de vista econômico, o projeto demonstrou significativa viabilidade. A redução de 30% no consumo de água, aliada a uma diminuição de 25% no consumo de energia elétrica, não apenas diminui os custos operacionais, mas também torna a atividade agrícola mais competitiva e sustentável. Esses benefícios diretos fortalecem a lucratividade do produtor ao mesmo tempo em que contribuem para a preservação de recursos naturais.

No âmbito ambiental, o sistema projetado promove uma gestão hídrica eficiente e reduz as emissões de carbono associadas ao consumo de energia. Além disso, a irrigação controlada evita problemas como a compactação e salinização do solo, mantendo sua fertilidade e garantindo a longevidade produtiva da área. Esses resultados evidenciam a relevância de aliar práticas agrícolas modernas com a preservação ambiental para enfrentar os desafios impostos pelas mudanças climáticas e pela crescente demanda por alimentos.

A contribuição deste trabalho para a área de pesquisa está na aplicação prática de conceitos teóricos de hidráulica e engenharia agrícola em um cenário real, demonstrando a importância de um projeto bem fundamentado para a sustentabilidade agrícola em regiões com desafios hídricos. O estudo oferece uma base sólida para futuros projetos de irrigação em condições semelhantes, evidenciando a necessidade de integrar o conhecimento técnico com as especificidades locais para alcançar resultados eficientes e sustentáveis.

Embora o sistema de irrigação desenvolvido neste estudo tenha se mostrado eficaz para atender às necessidades da propriedade, há espaço para melhorias e futuras expansões. Uma possibilidade é a incorporação de tecnologias avançadas de monitoramento, como sensores de umidade do solo e sistemas de controle automatizados, que poderiam otimizar ainda mais o uso da água, adaptando a irrigação em tempo real às condições ambientais. Além disso, a adoção de fontes de energia renovável, como a solar, pode potencializar os benefícios ambientais e econômicos do sistema.

A conclusão deste trabalho reflete a importância de uma abordagem interdisciplinar no desenvolvimento de soluções para problemas complexos, como a gestão hídrica em propriedades rurais. Por meio da aplicação de conhecimentos de engenharia, ciência dos materiais e gestão ambiental, foi possível criar um sistema de irrigação que atende às demandas imediatas da propriedade e contribui para a sustentabilidade a longo prazo. Este trabalho reforça a relevância de uma prática agrícola consciente e tecnicamente embasada, capaz de enfrentar os desafios contemporâneos com inovação e responsabilidade, beneficiando tanto os produtores quanto o meio ambiente.

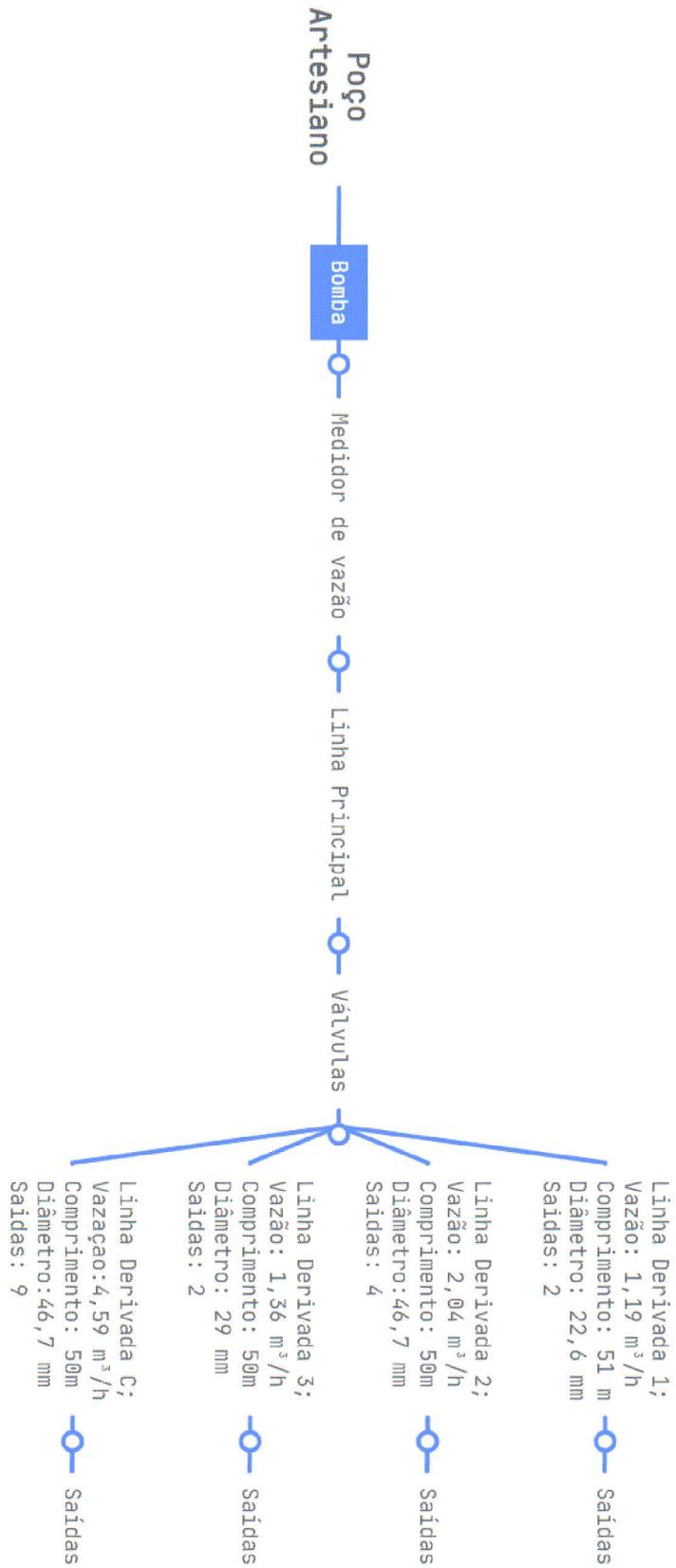
REFERÊNCIAS

- ALDRIGHI, M.; AL. et. Necessidades hídricas das gramas batatais (*Paspalum notatum* Flugge) e esmeralda (*Zoysia japonica* Steud) estimadas por sensoriamento remoto. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 7, p. 367–376, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.34117/bjdv6n7-367>.
- ALMEIDA, F. R.; RIBEIRO, D. A. Seleção de bombas para sistemas de irrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 23, n. 3, p. 211–218, 2019.
- ALVES, A. P.; SANTOS, M. C. dos. Eficiência da irrigação por aspersão em diferentes culturas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 22, n. 4, p. 250–257, 2018.
- AMARANTE, O. A. C. d. et al. **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro**. Brasília: Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - CEPEL, Ministério de Minas e Energia, 2001.
- AUTODESK. **AutoCAD 2024 (versão estudante)**. [S.l.], 2024. Software licenciado para estudantes. Disponível em: <https://www.autodesk.com/education/free-software/autocad>.
- BERNARDO, S. **Manual de Irrigação**. 8ª. ed. Viçosa: Editora UFV, 2019.
- BRITO, A. **Inicial - Portal Embrapa**. 2006. Disponível em: <https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/milho/arvore/>.
- BRITO, A. **Coordenadas Geográficas de Imperatriz, Maranhão - MA**. 2023. Disponível em: <https://www.geografos.com.br/cidades-maranhao/imperatriz.php>.
- CNA, C. da Agricultura e Pecuária do B. **Irrigação - Uso eficiente da água e da energia elétrica**. 2023. Disponível em: <https://www.cnabrazil.org.br/assets/arquivos/255-IRRIGA%C3%87%C3%83O.pdf>.
- CONFÚCIO. **Livros: Lun Yu - Diálogos, Analectos; Dà Xué - Grande Ensino; Zhong Young - A Doutrina do Mei; Mêncio - Mèng Zi**. 552 a.C.
- EMBRAPA, E. B. de P. A. **Eficiência energética na irrigação por aspersão**. 2009. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/557505/1/comtec83.pdf>.
- FERERES, E.; SORIANO, M. A. Deficit irrigation for reducing agricultural water use. **Journal of Experimental Botany**, v. 58, n. 2, p. 147–159, 2007.
- FERREIRA, R. L.; OLIVEIRA, J. M. de. Eficiência energética em sistemas de irrigação com bombas centrífugas. **Irrigation Science**, v. 36, n. 4, p. 283–290, 2018.
- HERNANDEZ, F. B. T. **Noções da elaboração de um projeto de irrigação**. São Paulo: UNESP, 1999. Acesso em: 24/08/2021. Disponível em: <http://www2.feis.unesp.br/irrigacao/projeto.htm>.
- HILLEL, D. **Introduction to Environmental Soil Physics**. [S.l.]: Academic Press, 2004.
- INPE. **Radiação Solar e Terrestre**. 2023. Acesso em: 12 set. 2023. Disponível em: <http://satelite.cptec.inpe.br/radiacao>.
- KELLER, J.; BLIESNER, R. D. **Sprinkle and Trickle Irrigation**. [S.l.]: Van Nostrand Reinhold, 1990.
- LIMA, F. J.; SILVA, A. B. Perdas de carga em sistemas de irrigação: Análise e cálculo. **Agricultural Water Management**, v. 222, p. 105–115, 2020.

- MACINTYRE, A. J. **Bombas e instalações de bombeamento**. [S.l.]: Ltc, 1997.
- MACINTYRE, A. J. **Bombas e Instalações de Bombeamento**. Rio de Janeiro: Ltc, 2013.
- MANTOVANI, E. C.; SOUZA, C. F. Performance of different types of sprinklers in pressurized irrigation. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 2, p. 157–164, 2011.
- MARTINS, A. **ESTUDO DA RELAÇÃO DOS ELEMENTOS METEOROLÓGICOS NA CIDADE DE IMPERATRIZ – MA NO PERÍODO DE 1990 A 2000**. [S.l.], 2000.
- MENON, E. S.; MENON, P. S. **Working Guide to Pumps and Pumping Stations**. Oxford: Elsevier, 2010.
- MERRIAM, J. L.; KELLER, J.; OLSON, K. Handbook of gravity-flow irrigation design. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 133, n. 6, p. 546–555, 2007.
- MICROSOFT. **Microsoft Excel 2024**. [S.l.], 2024. Software. Disponível em: <https://www.microsoft.com/excel>.
- OMEL Bombas e Compressores. **Catálogo Técnico - Bomba Centrífuga BLA-230/160-120**. [S.l.], 2024. Disponível online. Disponível em: <https://www.omel.com.br/catalogos/bombas-centrifugas.pdf>.
- PATTON, A. J.; REICHER, Z. J. **Zoysiagrass: A Low-Maintenance Turfgrass**. [S.l.]: Purdue Extension Bulletin, 2007.
- PHOCAIDES, A. **Sprinkle and Trickle Irrigation**. 2ª. ed. Roma, Itália: Food Agriculture Org, 2007.
- Rain Bird Corporation. **Catálogo de Produtos de Irrigação**. Azusa, Califórnia, 2022. Disponível em: <https://www.rainbird.com.br>.
- RIBEIRO, D.; ALMEIDA, J. M. Influência das variáveis climáticas na irrigação por aspersão. **Engenharia Agrícola**, v. 40, n. 1, p. 65–72, 2020.
- Schneider Motobombas. **Catálogo Técnico - Bomba Centrífuga Schneider ME-AL/BR-2250**. [S.l.], 2024. Disponível online. Disponível em: <https://www.schneider.ind.br/catalogo-bombas.pdf>.
- SPARK, W. **Clima e condições meteorológicas médias em Imperatriz no ano todo**. 2023. Disponível em: <https://pt.weatherspark.com/y/30244/Clima-caracter%C3%ADstico-em-Imperatriz-Brasil-durante-o-ano>.
- VENTURA, A. Problemas técnicos da silvicultura paulista. **Silvicultura em São Paulo**, v. 3, p. 61–80, 1964.
- WDM Pumps. **Catálogo Técnico - Bomba Centrífuga Multiestágio Vertical WDM VSE 32-5-200**. [S.l.], 2024. Disponível online. Disponível em: https://wdmpumps.net/br/wp-content/uploads/2021/11/WDM-Brasil-Catalogo-V10_compressed.pdf.

APÊNDICE A – Esquema de Operacao

Figura 13 – Esquema de Operação



Fonte: Autoria própria (2025).

APÊNDICE B – Diagrama esquemático do sistema de irrigação

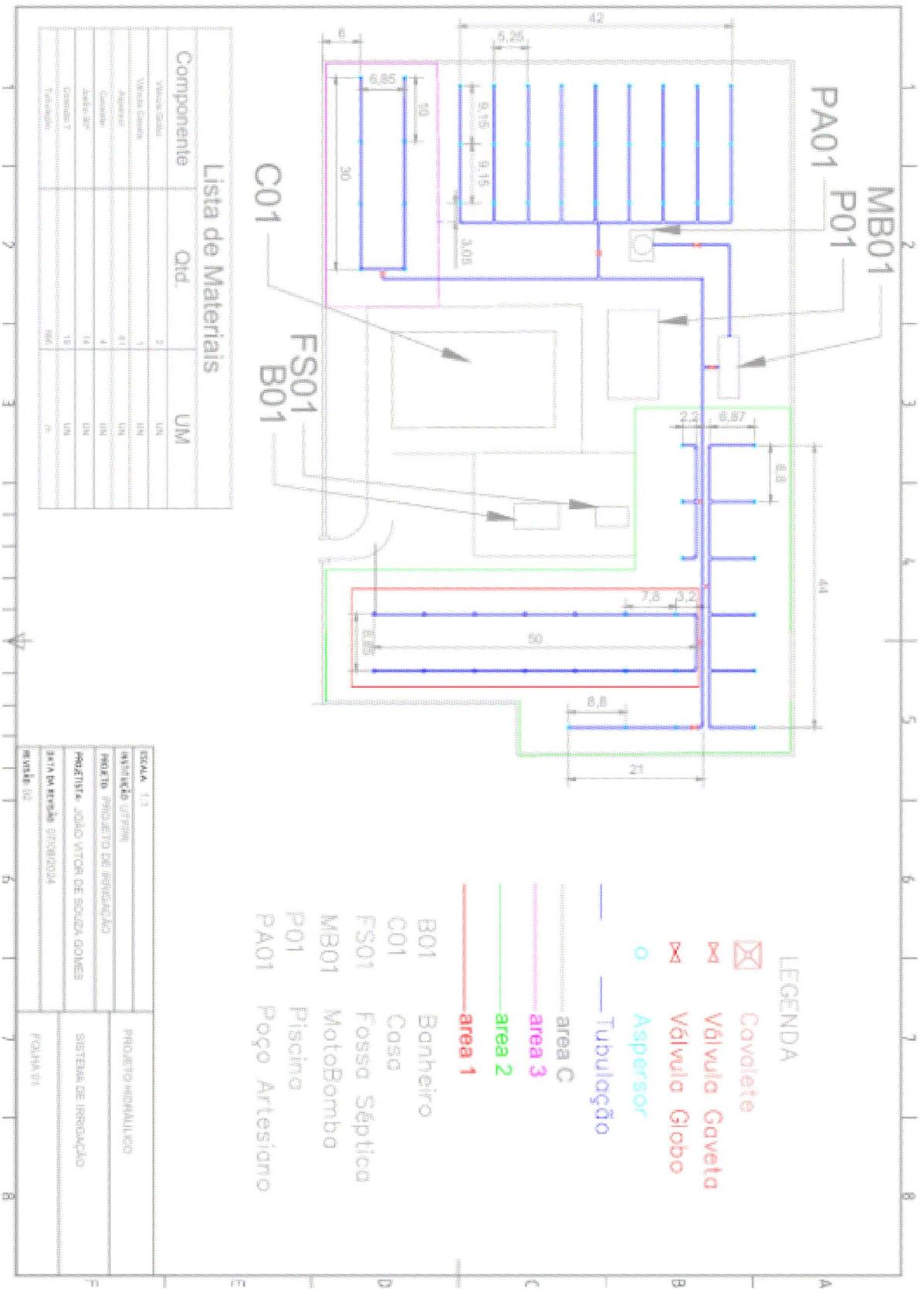
Figura 14 – Diagrama esquemático do sistema de irrigação



Fonte: Autoria própria (2025).

APÊNDICE C – Desenho CAD do Sistema de Irrigacao

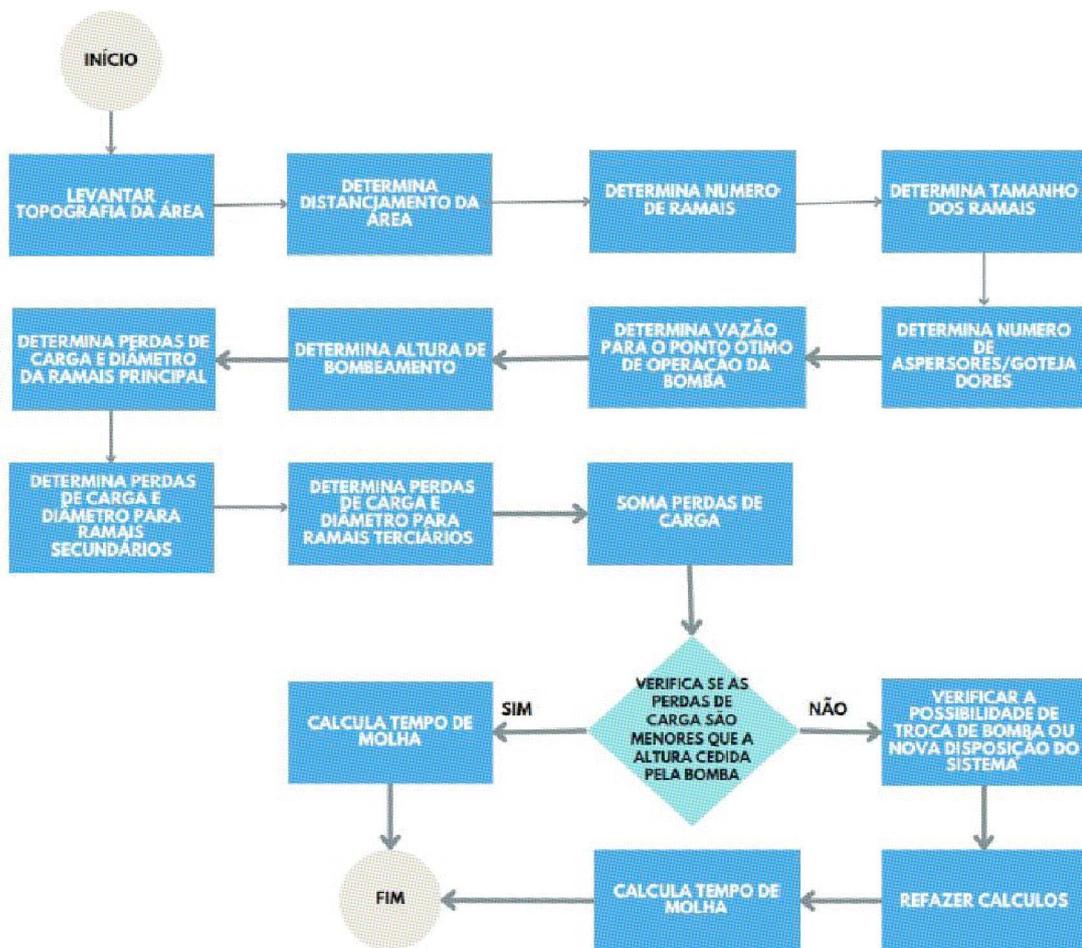
Figura 15 – Desenho CAD do Sistema de Irrigação



Fonte: Autoria própria (2025).

APÊNDICE D – Etapas de um projeto de irrigação

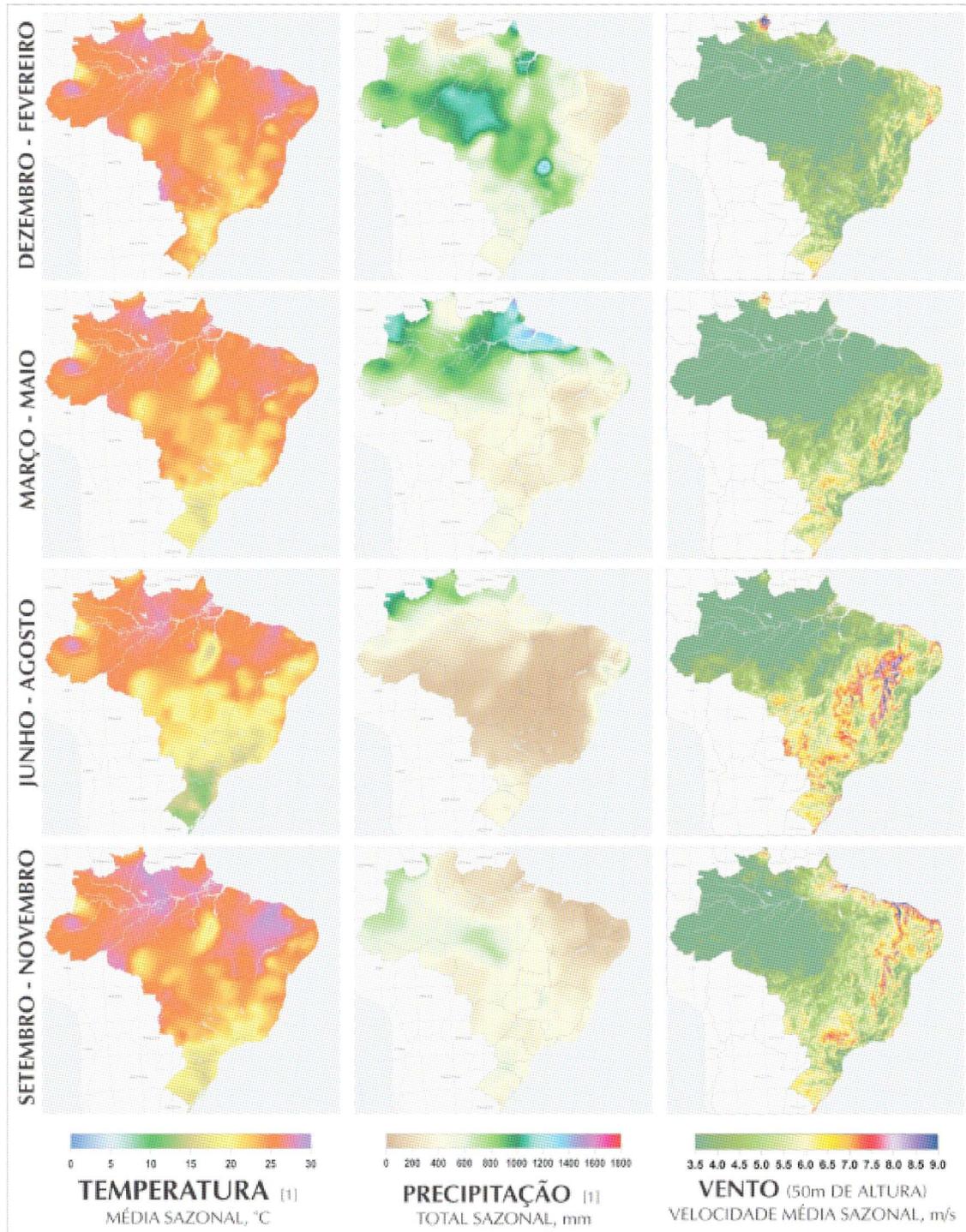
Figura 16 – Etapas de um projeto de irrigação



Fonte: Autoria própria (2025).

APÊNDICE E – Mapa Eólico

Figura 17 – Mapa Eólico



Fonte: Amarante et al. (2001).