

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

GABRIELE FERREIRA BERARDI

**DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA HIDRÁULICO
EM ÁREA RURAL PARA PULVERIZAÇÃO DE
CULTURAS**

CORNÉLIO PROCÓPIO

2024

GABRIELE FERREIRA BERARDI

**DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA HIDRÁULICO
EM ÁREA RURAL PARA PULVERIZAÇÃO DE
CULTURAS**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentada como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. Marcos Antonio de Souza Lourenço

CORNÉLIO PROCÓPIO

2024



[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.

GABRIELE FERREIRA BERARDI

**DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA HIDRÁULICO EM
ÁREA RURAL PARA PULVERIZAÇÃO DE CULTURAS**

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

Data de aprovação: 27/fevereiro/2025

Marcos Antonio de Souza Lourenço
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Rubens Gallo
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Fábio Kenji Suguimoto
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

CORNÉLIO PROCÓPIO

2024

AGRADECIMENTOS

Expresso meus agradecimentos primeiramente a Deus, que me guiou e proporcionou saúde para suportar os mais diversos obstáculos encontrados no decorrer da jornada. E a todos que de forma direta ou indireta contribuíram para que meu trajeto acadêmico fosse realizado da melhor maneira possível. Meu muito obrigado!

Aos meus nonnos, Gabriele (in memoriam) e Linda, pelos ensinamentos e experiências passadas afim de concretar os fundamentos básicos de ser um cidadão.

Aos meus pais, Nicola e Rosa, pela educação que me impuseram e por todas as regalias e privilégios que me proporcionaram a fim de facilitar ao máximo “minha estrada”; diria que foi fundamental para a obtenção do meu melhor desenvolvimento profissional e pessoal.

Ao meu irmão, Miguel pelo apoio e incentivo sempre ao longo dos anos. A minha namorada Bárbara, que sempre ficou ao meu lado sendo compreensível nos meus momentos ausentes.

Ao meu orientador, Marcos Lourenço por todo apoio oferecido. Sua dedicação e responsabilidade foram fatores destaques servindo de auxílio para a conclusão do presente projeto.

E por fim, a todos os professores pelos quais obtive o imenso prazer de conhecer no caminho espontâneo da grade curricular do curso. Grato por todas as experiências.

RESUMO

BERARDI, G. F. Dimensionamento de um Sistema Hidráulico em Área Rural para Pulverização de Culturas. TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2024.

Este estudo teve como objetivo dimensionar, de forma eficiente, um sistema hidráulico para pulverização de culturas, atendendo às necessidades hídricas de pequenos agricultores. Para isso, foram analisados dados e condições de contorno, permitindo a seleção das melhores opções de materiais e equipamentos, sempre com foco na viabilidade econômica do projeto. Além disso, foi conduzida uma revisão bibliográfica sobre os conceitos físicos fundamentais do sistema e as estratégias adotadas, que constituíram a base da pesquisa. Os resultados obtidos demonstram que a metodologia proposta é uma solução eficaz e viável para sistemas hidráulicos de médio e pequeno porte.

Palavras-chave: Custo, Dimensionamento Hidráulico, Eficiência, Pulverização.

ABSTRACT

BERARDI, G. F. Design of a Hydraulic System in a Rural Area for Crop Spraying. COURSE CONCLUSION WORK – Mechanical Engineering Course, Federal Technological University of Paraná. Cornélio Procópio, 2024.

This study aimed to efficiently size a hydraulic system for crop spraying, meeting the water needs of small farmers. For this, data and boundary conditions were analyzed, allowing the selection of the best material and equipment options, always focusing on the economic viability of the project. Furthermore, a bibliographical review was conducted on the fundamental physical concepts of the system and the strategies adopted, which constituted the basis of the research. The results obtained demonstrate that the proposed methodology is an effective and viable solution for medium and small hydraulic systems.

Keywords: Cost, Hidraulic Sizing, Efficiency, Spraying.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Área de Estudo Para a Instalação do Sistema	15
Figura 2 - Disposição Quadrada	25
Figura 3 - Disposição Triangular	25
Figura 4 - Disposição Retangular	26
Figura 5 - Características técnicas de um aspersor	29
Figura 6 - Esquematização dos Principais Tipos de Bombas	43
Figura 7 - Rotor de Fluxo Radial	44
Figura 8 - Rotor de Fluxo Misto	44
Figura 9 - Rotor de Fluxo Axial	45
Figura 10 - Curva Característica Plana (Flat)	48
Figura 11 - Curva Característica com Muita Inclinação (Step)	49
Figura 12 - Curva Característica Padrão (Rising)	49
Figura 13 - Curva Característica Instável (Drooping)	50
Figura 14 - Curvas características esquemáticas	50
Figura 15 - Lote de Análise para Dimensionamento do Sistema de Irrigação	52
Figura 16 – Esquematização do modelo de irrigação	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores do Índice Simplificado de Pulverização Recomendados para Determinados Tipos de Solos e Culturas	22
Tabela 2 - Intensidade Máxima de Precipitação para Condições Médias de Solo, Declividade e Vegetação.....	24
Tabela 3 - Distâncias Máximas Recomendadas entre Aspersiones Segundo suas Disposições	26
Tabela 4 - Espaçamentos Máximos entre Aspersiones e Laterais Segundo a Velocidade do Vento	26
Tabela 5 - Pressão de Serviço Mínima Segundo o Espaçamento dos Aspersiones	28
Tabela 6 - Valores mínimos do Coeficiente de Uniformidade, segundo espaçamento médio entre plantas.....	30
Tabela 7 - Valores em Porcentagem da Eficiência de Aplicação.....	31
Tabela 8 - Viscosidade Cinemática da Água de Acordo com sua Temperatura	35
Tabela 9 - Rugosidade Absoluta dos Tubos (ϵ) em mm.....	38
Tabela 10 - Valor do Coeficiente C sugerido para a Fórmula de Hazen-Williams.....	38
Tabela 11 - Valores Aproximados do Coeficiente de Perda Localizada (K)	40
Tabela 12 - Tubos de PVC	42
Tabela 13 - Grandezas a serem Calculadas para a Conclusão da Etapa 4.....	54
Tabela 14 - Dados Sobre o Solo	54
Tabela 15 - Dados Sobre o Clima.....	55
Tabela 16 - Dados Sobre a Cultura.....	55
Tabela 17 - Dados Sobre a Água	55
Tabela 18 - Dados Sobre o Conjunto Motobomba.....	55
Tabela 19 - Dados Sobre os Equipamentos	56
Tabela 20 - Dados da Linha Lateral	64
Tabela 21 - Dimensionamento do diâmetro da Linha Lateral	64
Tabela 22 - Pressão no Início das Linhas Laterais	64
Tabela 23 - Materiais para a Linha Lateral.....	65
Tabela 24 - Materiais Encontrados no Mercado para a Linha Lateral	65
Tabela 25 - Dados da Linha de Derivação	65
Tabela 26 - Dimensionamento do diâmetro da Linha de Derivação	65

Tabela 27 - Materiais para a Linha de Derivação.....	66
Tabela 28 - Materiais Encontrados no Mercado para a Linha de Derivação	66
Tabela 29 - Dados da Linha Lateral	66
Tabela 30 - Dimensionamento do Diâmetro da Linha Lateral	67
Tabela 31 - Pressão no Início das Linhas Laterais	67
Tabela 32 - Materiais para a Linha Lateral.....	67
Tabela 33 - Materiais Encontrados no Mercado para a Linha Lateral	67
Tabela 34 - Dados da Linha de Derivação	68
Tabela 35 - Dimensionamento do diâmetro da Linha de Derivação	68
Tabela 36 - Materiais para a Linha de Derivação.....	68
Tabela 37 - Materiais Encontrados no Mercado para a Linha de Derivação	68
Tabela 38 - Dados da Linha Principal	69
Tabela 39 - Materiais para a Linha de Principal.....	69
Tabela 40 - Dados da Linha de Sucção	69
Tabela 41 - Dados da Linha Lateral	70
Tabela 42 - Dimensionamento do Diâmetro da Linha Lateral	70
Tabela 43 - Pressão no Início das Linhas Laterais	70
Tabela 44 - Materiais para a Linha Lateral.....	70
Tabela 45 - Materiais Encontrados no Mercado para a Linha Lateral	71
Tabela 46 - Dados da Linha de Derivação	71
Tabela 47 - Dimensionamento do diâmetro da Linha de Derivação	71
Tabela 48 - Cálculo da Altura Manométrica	72
Tabela 49 - Dimensionamento da Potência do Conjunto Moto-bomba	72
Tabela 50 - Determinação do Manejo da Irrigação	73

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 OBJETIVOS GERAIS	15
1.1.1 Objetivos Específicos	15
2 REVISÃO DA LITERATURA	17
2.1 IRRIGAÇÃO POR ASPERSÃO CONVENCIOANAL	17
2.1.1 Sistemas Semiportáteis	18
2.2 CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS DOS ASPERSORES.....	18
2.2.2 Tipos de Aspersores.....	19
2.2.3 Vazão	20
2.2.4 Alcance	20
2.2.5 Pulverização.....	21
2.2.6 Eficiência	22
2.2.7 Precipitação.....	22
2.3 DISPOSIÇÃO DOS ASPERSORES NOS SISTEMAS CONVENCIONAIS.....	24
2.4 ESPAÇAMENTOS CONVENCIONAIS.....	27
2.5 CATÁLOGOS DE ASPERSORES.....	28
2.6 UNIFORMIDADE E EFICIÊNCIA DA IRRIGAÇÃO POR ASPERSÃO.....	29
2.6.1 Grau de Uniformidade	29
2.6.2 Eficiência da Irrigação	30
2.7 DISTRIBUIÇÃO DAS LINHAS LATERAIS E TRAÇADO DAS TUBULAÇÕES NO INTERIOR DAS PARCELAS DE IRRIGAÇÃO.....	32
2.8 ESCOAMENTO E REGIME DO FLUXO D'ÁGUA NAS TUBULAÇÕES	33
2.9 FUNDAMENTOS HIDRÁULICOS BÁSICOS	35
2.10 PERDA DE CARGA AO LONGO DO CONDUTO.....	36
2.11 PERDAS DE CARGA LOCALIZADAS.....	39
2.12 CONCEITO DO DIMENSIONAMENTO DAS LINHAS LATERAIS	40
2.13 OPÇÕES DE TUBULAÇÕES MAIS UTILIZADAS NO MERCADO ATUAL	41
2.14 BOMBAS HIDRÁULICAS	42
2.15 ALTURAS, POTÊNCIAS, RENDIMENTOS E PERDAS	45

2.16 CURVAS CARACTERÍSTICAS DAS BOMBAS.....	48
2.17 CAVITAÇÃO E NPSH	50
3 MATERIAIS E MÉTODOS	52
3.1 ÁREA DE ANÁLISE	52
3.2 REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO MODELO DE IRRIGAÇÃO	52
3.3 MOTODOLOGIA ABORDADA PARA O CASO	53
3.4 LEVANTAMENTO DAS CONDIÇÕES DE CONTORNO	54
3.5 EQUACIONAMENTO	56
3.5.1 Lâmina Líquida Máxima de Irrigação (L_{lm})	56
3.5.2 Necessidade de Irrigação Líquida Máxima Da Cultura (N_{lm})	56
3.5.3 Frequência máxima de irrigação (L_{max})	57
3.5.4 Eficiência da Irrigação (E_f)	57
3.5.5 Fração da Água de Lixiviação (LR)	57
3.5.6 Lâmina bruta de Irrigação (L_b)	58
3.5.7 Necessidade de Irrigação Bruta no Período de Máxima Demanda (N_{bm})	58
3.5.8 Tempo de Aplicação da Água no Solo (T_{min})	58
3.5.9 Variação na Altura do Início ao Final da Linha (m)	59
3.5.10 Perda de Carga Permissível (h_f)	59
3.5.11 Número de Aspersores (N)	59
3.5.12 Fator de Correção (f)	60
3.5.13 Perda de Carga Permissível Corrigida (h'_f)	60
3.5.14 Perda de Carga Linear (j)	60
3.5.15 Diâmetro da linha lateral (Q_{LL}).....	60
3.5.16 Pressão no Início da Linha Lateral (P_{IN})	61
3.5.17 Equação da Continuidade (Para um fluido incompressível)	61
3.5.18 Equação da Energia (Bernoulli)	61
4 RESULTADOS	63
4.1 CLASSIFICAÇÃO DOS RESULTADOS	63
4.1.1 Escolha do Aspersor	63
4.1.2 Disposição do Sistema	63
4.1.3 Parcela 1.....	64
4.1.4 Parcela 2.....	66
4.1.5 Parcela 3.....	69

4.2 DETERMINAÇÃO DA ALTURA MANOMÉTRICA E SELEÇÃO DO CONJUNTO MOTO BOMBA.....	71
4.3 DETERMINAÇÃO DO MANEJO DE IRRIGAÇÃO.....	72
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	74
6 REFERÊNCIAS	75

1 INTRODUÇÃO

A prática da irrigação, essencial para o desenvolvimento bem-sucedido da agricultura tecnificada, eficiente e lucrativa, envolve o fornecimento de água às culturas nos casos em que as precipitações pluviométricas ou qualquer outra fonte natural de abastecimento não são adequadas ou insuficientes para atender às demandas hídricas das plantas. Esta atividade se mostra indispensável em quase todas as regiões e climas do nosso planeta (Gomes, 2013).

Desde os primórdios da pré-história, a humanidade tem desviado cursos d'água para irrigar suas plantações. O emprego dessa técnica foi fundamental para estabelecer comunidades humanas em regiões áridas e semiáridas, transformando esses locais em áreas permanentemente habitáveis. Logo nos estágios iniciais, pessoas compreenderam que não apenas necessitavam de água para subsistir, mas que também as plantas se tornavam mais exuberantes e produtivas na presença desse recurso. Civilizações mais antigas adotaram de maneira intensiva as técnicas de irrigação como meio essencial para garantir sua sobrevivência (Testezlaf, 2017).

Segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), quando da escrita dessa monografia, o milho está com estimativas de aumento tanto em produção como em área cultivável. No ano de 2022 por exemplo, o Brasil não sofreu com crises hídricas e potencialmente teve um aumento significativo na safra do cereal, produzindo cerca de 124,88 milhões de toneladas. Além disso, temos a soja, que ainda é o produto com a maior taxa de colheita no país, com estimativa de produção de 153,6 milhões de toneladas. De acordo com a CONAB, boa parte da produtividade nas lavouras segue sendo confirmada.

Desta forma, pequenos agricultores se vêem na posição de investir e adquirir estratégias para fazerem parte do aumento dessa produção de culturas específicas, visando não ficar dependente de situações climáticas, com foco principal em crises hídricas que assolam o país.

Conforme um estudo conduzido pela Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG), a utilização racional da irrigação poderia resultar em uma economia significativa de recursos. Aproximadamente 20% do consumo de água e 30% da energia utilizada poderiam ser poupados. Essa economia de energia seria composta por 20% relacionados à aplicação desnecessária de água e 10% devido ao redimensionamento e otimização dos equipamentos empregados no processo de irrigação (Lima, 2019).

Dessa forma, o presente estudo traz um projeto hipotético de dimensionamento de um sistema de bombeamento para um lote rural de 10 hectares, com a ideia de solucionar o impasse afirmado anteriormente. A intenção do mesmo é recalcar a água de um reservatório central

escavado, e respectivamente, irrigar as culturas mencionadas anteriormente na área demarcada, assim como mostrado na Figura 1.

Figura 1 - Área de Estudo Para a Instalação do Sistema



Fonte: (Google Earth, 2023)

1.1 OBJETIVOS GERAIS

O presente trabalho tem como objetivo geral, apresentar os passos para as técnicas do dimensionamento de um sistema hidráulico para pulverização de culturas, especificamente da soja e do milho. Conforme relatos de pequenos agricultores, os mesmos concretizam sua baixa produtividade de grãos à escassez de chuva na região e, dessa forma, traz como consequências, ameaças ao seu empreendimento. Contudo, o seguinte estudo trará através de todas as condições de contorno específicas, a solução para o pequeno agricultor em relação as crises hídricas que os ameaçam.

1.1.1 Objetivos Específicos

- Desenvolver um estudo para garantir a eficiência hídrica em uma área de 10 ha;

- Validar métodos com dados analíticos e quantitativos sobre o sistema calculado;
- Avaliar custos de implantação do sistema hidráulico por aspersão convencional na área descrita;
- Encontrar soluções para pequenos produtores aumentarem sua capacidade de produção;
- Sustentar um dimensionamento eficiente do sistema.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Partindo para a Literatura, encontramos que para executar o dimensionamento da forma mais eficaz, precisamos entender sobre os sistemas, elementos, peças e teorias. Segundo EMBRAPA (2006) o interesse pela irrigação, no Brasil, emerge nas mais variadas condições de clima, solo, cultura e socioeconomia. O mesmo estudo ainda retrata que não existe um sistema de irrigação ideal, capaz de atender satisfatoriamente a todas as condições e aos interesses envolvidos. Assim, deve-se selecionar o sistema de irrigação mais adequado para certa condição estudada e para atender aos objetivos desejados. O processo de seleção requer análise detalhada das condições apresentadas (cultura, solo e topografia), em função das exigências de cada sistema de irrigação, de forma a permitir a identificação das melhores alternativas.

De acordo com Testezlaf (2002), o Método de irrigação é a forma pela qual a água pode ser aplicada às culturas. Basicamente, são quatro os métodos de irrigação: superfície, aspersão, localizada e subirrigação. Para cada método, ainda há dois ou mais sistemas de irrigação, que podem ser empregados. A razão disso é que há vários tipos de sistemas com variáveis do tipo solo, clima, culturas, disponibilidade de energia, condições socioeconômicas, etc., para as quais o sistema de irrigação deve ser adaptado.

Nesse tópico, serão comentados apenas os métodos e sistemas mais apropriados para a cultura do milho e da soja. Em decorrência, serão abordados seus variados conceitos e características do projeto em geral.

2.1 IRRIGAÇÃO POR ASPERSÃO CONVENCIOANAL

Os sistemas de aspersão convencionais, geralmente são compostos por aspersores de baixa a média pressão, possuem espaçamentos entre 6 e 36 metros e são instalados em tubos porta-aspersores conectados a condutos sob pressão. Esses condutos, chamados de linhas laterais, são ligados à fonte de abastecimento de água por meio de uma rede principal de tubulações de distribuição. As conexões entre os diversos componentes da rede são feitas com peças especiais, como: Juntas, curvas, tês, cones de redução, enfim. O controle do fluxo de água

nas tubulações é realizado por dispositivos hidráulicos, como válvulas de derivação, retenção, reguladores de pressão, registros e ventosas (Gomes, H. P., 1999).

Os modelos de aspersão convencionais são amplamente utilizados devido à sua versatilidade, adequação a diferentes tipos de cultura, solos, topografias e áreas a serem irrigadas, além de oferecerem menor custo de instalação e maior flexibilidade no manejo (Gomes, H. P., 1999).

Dentre ele, temos o sistemas semiportáteis, na qual será o método utilizado no presente trabalho e será explicado na sequência da pesquisa.

2.1.1 Sistemas Semiportáteis

Os sistemas semiportáteis são uma variação dos sistemas portáteis, onde as tubulações de distribuição permanecem fixas, enquanto as linhas laterais com os aspersores podem ser transportadas. Normalmente, as tubulações de distribuição (principais e secundárias) são enterradas, especialmente quando a cultura a ser irrigada é de caráter permanente. Já em sistemas utilizados para irrigação sazonal, como em culturas de ciclo vegetativo curto, ou em irrigação suplementar, onde as chuvas não são suficientes, as tubulações de distribuição são feitas de materiais leves e instaladas na superfície do solo (Gomes, H. P., 1999).

Os sistemas portáteis e semiportáteis, entre os sistemas convencionais, são os que apresentam o menor custo de investimento. No entanto, exigem uma maior quantidade de mão de obra para sua operação e manutenção, sendo mais utilizados em regiões onde o custo da mão de obra é relativamente baixo (Gomes, H. P., 1999).

2.2 CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS DOS ASPERSORES

De acordo com Testezlaf (2017), a pressão de funcionamento de um aspersor, junto com o diâmetro e o ângulo de inclinação do bocal, determina a vazão, o alcance, o grau de pulverização das gotas, a eficiência e a uniformidade de precipitação da água aplicada. A correta adequação dessas características hidráulicas às condições específicas do projeto de irrigação é

essencial para o dimensionamento adequado e o manejo eficiente dos sistemas de aspersão. O mesmo ainda menciona as diferenças dos mesmos conceitos:

2.2.1 Tipos de Aspersores

- Aspersores de Baixa Pressão: Operam com pressões de serviço abaixo de 20 mca ($2,0 \text{ kg/cm}^2$), possuem baixa rotação e geralmente estão equipados com um único bocal de diâmetro inferior a 4 mm. As vazões fornecidas por esses dispositivos não ultrapassam $1 \text{ m}^3/\text{h}$, sendo recomendados para espaçamentos menores que 15 metros entre os aspersores.
- Aspersores de Média Pressão: Operam com pressões de funcionamento entre 20 e 40 mca ($2 \text{ a } 4 \text{ kg/cm}^2$) e são os mais comumente usados em sistemas convencionais de irrigação por aspersão. Equipados com um ou dois bocais, cujos diâmetros variam de 4 a 7 mm, os aspersores de dois bocais têm uma função específica: o bocal de menor diâmetro distribui água sobre a área próxima ao eixo do aspersor, enquanto o de maior diâmetro cobre a parte periférica do círculo. Esses dispositivos possuem rotação lenta, com vazões que variam entre $1 \text{ e } 6 \text{ m}^3/\text{h}$, e são utilizados em espaçamentos que vão de 12 a 36 metros.
- Aspersores de Alta Pressão: Esses aspersores operam com pressões superiores a 40 mca (4 kg/cm^2), oferecendo alcances superiores a 30 metros e vazões acima de $6 \text{ m}^3/\text{h}$. Modelos especiais, como os aspersores gigantes ou canhões hidráulicos, podem trabalhar com pressões de até 100 mca ou mais, atingindo raios de ação de até 100 metros e distribuindo vazões entre 20 e $120 \text{ m}^3/\text{h}$. São dispositivos de baixa rotação, podendo ser de impacto ou acionados por engrenagem, geralmente equipados com dois ou três bocais para uma distribuição mais eficiente da água.

2.2.2 Vazão

A água lançada sob pressão por um aspersor segue o mesmo princípio hidráulico da saída de água por um orifício ou bocal. A energia de pressão disponível no interior da tubulação (h) se converte em energia cinética ($v^2/2g$) na saída do aspersor, com uma eficiência determinada pelo coeficiente de descarga (C_d).

Se o aspersor estiver equipado com dois bocais de diferentes diâmetros, (d_1) e (d_2), com coeficientes de descarga (C_{d1}) e (C_{d2}), respectivamente, a vazão total (q) será a soma das vazões individuais de cada bocal, ambos submetidos à mesma pressão de serviço (h).

O coeficiente de descarga (C_d) representa a relação entre a vazão real e a teórica de um aspersor, sendo influenciado por fatores como a perda de carga e a contração do jato no bocal. Para uma mesma pressão de operação, quanto maior o valor de (C_d), maior será a vazão do aspersor, indicando sua eficiência hidráulica. O valor de (C_d) reflete a qualidade do projeto do aspersor, com valores típicos variando de 0,65 a 0,95 para a maioria dos modelos disponíveis no mercado.

2.2.3 Alcance

O alcance de um aspersor é a medida do raio do círculo molhado pela água lançada, e é determinado considerando que o jato d'água segue uma trajetória parabólica ideal, sem considerar as perdas por atrito no ar. Além disso, presume-se que o aspersor esteja posicionado ao nível do solo, ou seja, na mesma altura da área irrigada, para fins de cálculo do alcance teórico.

A fórmula empírica proposta por Cavazza (1965) para determinar o raio de alcance (R), de aspersores rotativos é amplamente aceita. Ela relaciona o raio de alcance com a pressão de serviço (h) e o diâmetro do bocal (d). Nessa fórmula, “ R ” e “ h ” são expressos em metros, enquanto que “ d ” é expresso em milímetros. Essa fórmula ajuda a prever o comportamento de aspersores rotativos em diferentes condições de operação, facilitando o projeto e dimensionamento dos sistemas de irrigação por aspersão.

Mantendo constantes as características do aspersor e dentro de determinados limites da sua pressão de funcionamento, o raio de alcance (R). aumenta proporcionalmente com o aumento da pressão (h). No entanto, fora desses limites, essa relação de proporcionalidade deixa de ser válida. Isso ocorre porque, em pressões muito altas, o jato d'água se pulveriza excessivamente, reduzindo o alcance. Da mesma forma, pressões muito baixas também comprometem o alcance, resultando em uma distribuição inadequada da água.

2.2.4 Pulverização

A qualidade da irrigação por aspersão é influenciada por diversos fatores, sendo um dos mais relevantes o grau de pulverização das gotas geradas. Irrigações que produzem gotas muito finas tendem a sofrer maiores perdas por evaporação, especialmente em áreas expostas a ventos fortes. Por outro lado, o uso de gotas grossas pode causar danos a plantas com folhas sensíveis e reduzir a capacidade de infiltração do solo, uma vez que o impacto dessas gotas pode levar à compactação do solo, um efeito que é ainda mais acentuado quando se utiliza aspersores de grande alcance.

Para um aspersor com um bocal específico, o aumento da pressão de funcionamento resulta na formação de gotas menores. Em contraste, para uma pressão de funcionamento constante, o diâmetro das gotas aumenta à medida que o tamanho do bocal do aspersor cresce. Além disso, para um mesmo modelo de aspersor operando em uma pressão determinada, gotas maiores tendem a se deslocar a maiores distâncias do eixo do emissor.

As gotas de chuvas naturais têm diâmetros que variam entre 0,5 e 1,0 mm, enquanto em uma tempestade, esse diâmetro pode ultrapassar 3,0 mm. Em comparação, aspersores de tamanho médio geram gotas com diâmetros entre 0,5 e 2,0 mm, cobrindo um círculo com um raio de aproximadamente 65% do alcance total do aspersor. Na área restante, caem gotas com diâmetros superiores a 3,0 mm.

A tabela a seguir apresenta os valores do índice de pulverização (I_p) para distintos tipos de gotas, indicadas para diferentes culturas e texturas de solos.

Tabela 1 - Valores do Índice Simplificado de Pulverização Recomendados para Determinados Tipos de Solos e Culturas

Ip	TIPOS DE GOTAS	CULTURAS	SOLOS
< 0,3	Finas	Flores/Hortaliças/Algodão/Fumo	Argiloso
0,3 – 0,5	Médias	Frutíferas/Extensivas/ Herbáceas	Franco
> 0,5	Grossas	Milho/Cana-de-açúcar	Arenosos

Fonte: (Lozano, 1965)

2.2.5 Eficiência

Do ponto de vista econômico, é mais vantajoso que um aspersor, ao operar sob uma pressão específica, alcance o maior raio possível. Essa característica torna a instalação mais econômica, uma vez que reduz a densidade de linhas laterais e aspersores necessários, além de exigir menos mão de obra para a movimentação das tubulações. O parâmetro que mede a eficiência de um aspersor em relação ao seu alcance é o índice de eficiência, definido por Oelher (1964). Esse índice, denominado (I_e), é calculado como a razão entre o raio de alcance do aspersor e a pressão de funcionamento.

A partir da estimativa do alcance, o índice de eficiência pode ser correlacionado com o índice de pulverização (I_p), que indica que, à medida que o índice de eficiência aumenta, as gotas lançadas pelo aspersor tendem a ser mais grossas. No entanto, é importante considerar que uma alta eficiência do aspersor pode impactar negativamente a qualidade da irrigação. Aspersores altamente eficientes geralmente produzem uma pulverização reduzida, resultando em gotas mais pesadas, o que pode causar danos às plantas e ao solo.

Os aspersores comerciais apresentam índices de eficiência que variam de 0,4 a 1,0. Os valores ideais de eficiência (I_e), que equilibram a viabilidade econômica e a qualidade da irrigação, estão entre 0,70 e 0,80.

2.2.6 Precipitação

A distribuição da precipitação gerada por um aspersor é influenciada pela pressão de funcionamento e pelas condições do vento. Quando um aspersor opera com a pressão adequada e não está sujeito a ventos significativos, a distribuição da precipitação tende a ter uma forma bem definida.

A intensidade média de precipitação de um aspersor, comumente referida apenas como precipitação, é um parâmetro crucial na elaboração de projetos de irrigação. É fundamental escolher um aspersor cuja intensidade média de precipitação não ultrapasse a capacidade de infiltração do solo, considerando a vegetação presente. Este critério deve ser rigorosamente seguido para evitar o encharcamento do solo e minimizar as perdas por escoamento superficial decorrentes da precipitação excessiva.

A tabela 15, elaborado pelo Serviço de Conservação de Solos dos Estados Unidos (1960), apresenta um conjunto de valores máximos para as intensidades de precipitação permitidas no solo, levando em consideração a textura média do solo, a inclinação do terreno e a presença ou ausência de cobertura vegetal. Segundo Keller e Bliesner (1990), a intensidade mínima de precipitação recomendada para a maioria das culturas irrigadas deve ser de 3 mm/h. Essa diretriz visa assegurar uma distribuição uniforme e uma eficiência de irrigação que não comprometa a qualidade em condições climáticas favoráveis. Em regiões com altas temperaturas e ventos fortes, é aconselhável que a intensidade mínima de precipitação seja superior ao valor mencionado.

A velocidade de rotação do aspersor impacta a precipitação aplicada no solo em cada momento. Quando a velocidade aumenta, a precipitação instantânea em um ponto específico do círculo molhado diminui. Para solos com certa permeabilidade, essa redução na precipitação instantânea contribui para minimizar os riscos de encharcamento e compactação do terreno.

Tabela 2 - Intensidade Máxima de Precipitação para Condições Médias de Solo, Declividade e Vegetação

TEXTURA DO SOLO E CONDIÇÕES DO PERFIL	INTENSIDADE DE PRECIPITAÇÃO MÁXIMA (mm/h)			
	DECLIVIDADE (%)			
	0 a 5	5 a 8	8 a 12	>12
Areia grossa de textura uniforme até 1,8 m	51 51*	51 38*	38 25*	25 13*
Areia grossa com subsolo compacto	44 38*	32 25*	25 19*	19 10*
Franco arenoso de textura uniforme até 1,8 m	44 25*	32 20*	25 15*	19 10*
Franco arenoso com subsolo mais compacto	32 19*	25 13*	19 10*	13 8*
Franco siltoso de textura uniforme até 1,8 m	25 13*	20 10*	15 8*	10 5*
Franco siltoso com subsolo mais compacto	15 8*	13 6*	10 4*	8 2,5*
Argiloso ou franco argiloso	5 4*	4 2,5*	3 2*	2,5 1,5*

* Sem cobertura vegetal

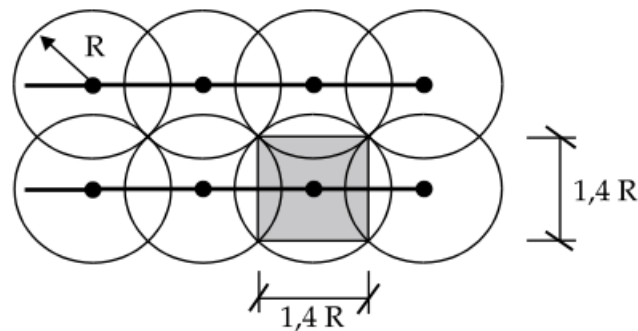
Fonte: (Adaptado de Gomes, 2013)

2.3 DISPOSIÇÃO DOS ASPERSORES NOS SISTEMAS CONVENCIONAIS

Nos sistemas convencionais de irrigação por aspersão, os aspersores são geralmente organizados de três maneiras diferentes nas linhas laterais, conforme descrito por Testezlaf (2017):

Disposição Quadrada: Nesse arranjo, os aspersores são posicionados nos vértices de um quadrado, o que significa que a distância entre as linhas laterais é igual à separação entre os aspersores dentro dessas linhas. Essa configuração permite uma distribuição uniforme da água, pois cada aspersor cobre uma área circular, e as áreas irrigadas se sobrepõem. Essa disposição é especialmente eficaz em áreas que exigem uma irrigação homogênea, pois maximiza a eficiência do sistema ao garantir que cada ponto do solo receba água adequada. A escolha desse padrão depende da cultura em questão, da topografia do terreno e das características específicas do sistema de irrigação.

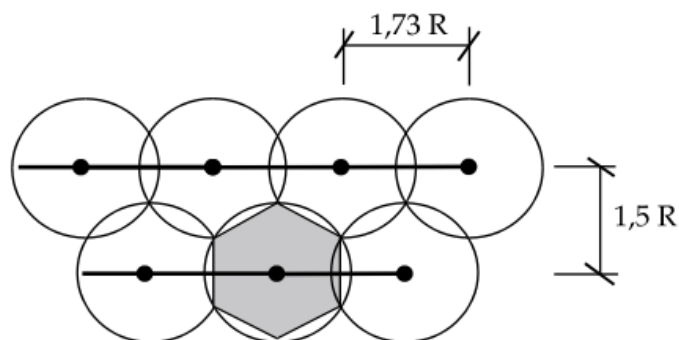
Figura 2 - Disposição Quadrada



Fonte: (Gomes, 2013)

Disposição triangular: Nesta configuração, os aspersores são posicionados nos vértices de uma rede de triângulos equiláteros. Essa disposição é comum em sistemas convencionais fixos, pois proporciona uma cobertura eficiente da área irrigada. No entanto, apresenta limitações em relação à mobilidade, especialmente quando se trata de deslocar linhas laterais portáteis. A necessidade de manobrar os aspersores em terrenos irregulares ou em áreas com diferentes tipos de culturas pode tornar essa configuração menos prática. Por isso, enquanto essa disposição é eficaz em termos de irrigação, sua implementação em sistemas móveis pode ser desafiadora.

Figura 3 - Disposição Triangular

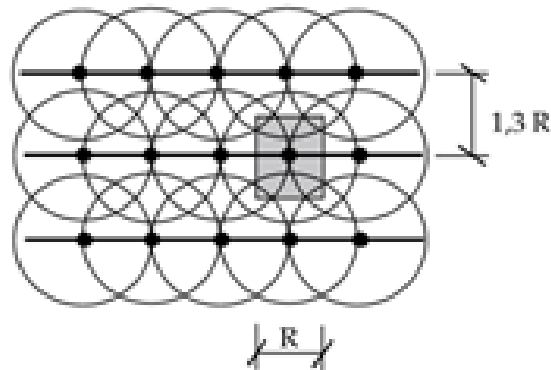


Fonte: (Gomes, 2013)

Disposição retangular: A separação entre os aspersores em uma mesma linha lateral é distinta da distância entre as linhas laterais. A maior distância do retângulo se refere à separação entre as linhas laterais, que visa otimizar a infraestrutura de tubulações dentro da área irrigada, especialmente em sistemas fixos. Essa configuração também busca diminuir o número de posições necessárias para as linhas laterais em sistemas portáteis, facilitando a mobilidade e

reduzindo os custos associados à instalação e manutenção do sistema de irrigação. Essa abordagem permite uma cobertura eficiente da área sem a necessidade de um excesso de infraestrutura, promovendo um uso mais econômico dos recursos disponíveis.

Figura 4 - Disposição Retangular



Fonte: (Gomes, 2013)

As distâncias máximas recomendadas entre os aspersores, tanto dentro de uma mesma linha lateral quanto entre elas, são apresentadas na Tabela 16, onde (R) representa o alcance do aspersor. Os valores especificados neste quadro foram determinados com o objetivo de garantir uma uniformidade satisfatória na precipitação da água, ao mesmo tempo em que se busca minimizar a quantidade de tubos e aspersores utilizados na instalação. Essa abordagem permite otimizar o projeto do sistema de irrigação, equilibrando eficiência na distribuição da água e redução de custos com materiais e manutenção.

Tabela 3 - Distâncias Máximas Recomendadas entre Aspersores Segundo suas Disposições

DISPOSIÇÃO	DISTÂNCIA ENTRE ASPERSORES	DISTÂNCIA ENTRE LINHAS
Quadrada	$\sqrt{2} R$	$\sqrt{2} R$
Triangular	$\sqrt{3} R$	$1,5 R$
Retangular	R	$1,3 R$

Fonte: (Lozano, 1965)

Tabela 4 - Espaçamentos Máximos entre Aspersores e Laterais Segundo a Velocidade do Vento

VELOCIDADE (Km/h)	S_1	S_2
8 – 11	$0,8 R$	$1,3 R$
11 – 16	$0,8 R$	$1,2 R$
> 16	$0,6 R$	R

Fonte: (Luján, 1989)

Em regiões afetadas por ventos fortes, é recomendável evitar o uso de aspersores que apresentem um alto grau de pulverização ou que lancem o jato d'água a grandes alturas. Nesses casos, as gotas de água lançadas pelos aspersores tornam-se mais suscetíveis ao arrasto do vento, o que pode comprometer a uniformidade da distribuição da precipitação sobre o solo. Uma estratégia para minimizar a influência do vento na irrigação é realizar a irrigação durante a noite, período em que, geralmente, a velocidade do vento é reduzida. Essa prática pode ajudar a garantir uma distribuição mais eficaz da água sobre as culturas (Testezlaf, 2017).

2.4 ESPAÇAMENTOS CONVENCIONAIS

Clément-Galant (1986) ressalta que em instalações de sistemas de aspersão convencionais, os espaçamentos entre aspersores são influenciados também pelos comprimentos dos tubos disponíveis no mercado. Os tubos leves, fabricados para sistemas de irrigação, geralmente têm comprimentos padronizados de 6 metros, com variações em peso, espessura e classe, dependendo do material de fabricação. Em consequência, são adotados espaçamentos retangulares entre aspersores e linhas laterais, classificados da seguinte forma: espaçamentos de 6×6 e 6×12 metros são considerados pequenos; de 12×12 a 24×24 metros são considerados médios; e espaçamentos de 24×30 , 24×36 , 30×30 , 30×36 metros, entre outros, são considerados grandes.

Espaçamentos menores entre aspersores e linhas laterais promovem uma boa uniformidade na distribuição da precipitação, permitindo que os aspersores funcionem com pressões mais baixas. Isso resulta em uma qualidade de irrigação superior, além de reduzir os requisitos de energia do sistema. No entanto, essa abordagem também eleva os custos de investimento na instalação, pois demanda mais equipamentos (tubos, aspersores, acessórios, etc.) e requer maior quantidade de mão de obra para a movimentação das linhas laterais portáteis.

Os espaçamentos maiores resultam em uma irrigação menos uniforme e aumentam os custos energéticos, pois exigem aspersores que operem com altas pressões. Entretanto, essa configuração requer menos mão de obra e reduz o custo total de investimento na instalação. Por sua vez, os espaçamentos médios equilibram, em certa medida, as vantagens e desvantagens dos espaçamentos pequenos e grandes, tornando-se, assim, a opção mais utilizada na prática.

Com base em uma eficiência satisfatória dos aspersores, Clément-Galant (1986) sugere

valores mínimos da pressão de funcionamento para diferentes espaçamentos dos emissores, conforme detalhado na Tabela 18. Esses valores são fundamentais para garantir que a irrigação seja eficaz, evitando desperdícios e assegurando uma distribuição uniforme da água sobre a área cultivada.

Tabela 5 - Pressão de Serviço Mínima Segundo o Espaçamento dos Aspersores

ESPAÇAMENTO (m)	PRESSÃO MÍNIMA (mca)
6 x 6	15
12 x 12	20
18 x 18	25
24 x 24	30
30 x 30	35
42 x 42	40

Fonte: (Clément-Galant, 1986)

2.5 CATÁLOGOS DE ASPERSORES

As empresas que fabricam aspersores disponibilizam catálogos contendo as especificações técnicas de cada tipo de emissor. Esses catálogos oferecem uma ampla variedade de modelos de aspersores, atendendo praticamente a todas as necessidades para a irrigação por aspersão. Para cada aspersor, que pode ter um ou mais diâmetros de bocal, são indicadas a vazão e o alcance correspondentes a diferentes pressões de funcionamento. Além disso, alguns catálogos também apresentam as intensidades médias de precipitação para cada espaçamento recomendado, proporcionando informações úteis para o dimensionamento e a seleção adequada dos equipamentos de irrigação.

Abaixo, na Figura 9 temos um exemplo de catálogo de aspersores:

Figura 5 - Características técnicas de um aspersor

Bocais Diâmetro Nominal	Código	Pressão	Diâmetro Alcance	Altura máxima do jato	Vazão	Espaçamento entre aspersores (m)				
						6 x 12	12 x 12	12 x 18	18 x 18	18 x 24
(mm)		(mca)	(m)	(m)	(m ³ /h)	Intensidade de aplicação (mm/h)				
0 x 4,60		30	21,20	2,20	1,25	17,36				
Tampão Preto	3027-ER	35	21,20	2,30	1,35	18,75				
	4491-ERL	40	21,20	2,40	1,44	20,00				
		45	21,20	2,40	1,53	21,25				
4,00 x 4,60		20	26,80	3,50	1,79	12,43				
Curto Vermelho	4488-ER	25	27,00	3,70	2,00	13,89				
	4503-ERL	30	27,20	3,90	2,19	15,21				
		35	27,60	4,10	2,34	16,25				
		40	28,00	4,30	2,53	17,57				
		45	28,00	4,40	2,68	18,61				

Fonte: (<https://www.agropolo.com.br/ny-30>, 2024)

2.6 UNIFORMIDADE E EFICIÊNCIA DA IRRIGAÇÃO POR ASPERSÃO

2.6.1 Grau de Uniformidade

A uniformidade na irrigação por aspersão refere-se à distribuição homogênea da água aplicada sobre a área irrigada. Essa uniformidade é crucial, pois afeta diretamente a qualidade da irrigação e o rendimento das culturas. Quando a irrigação apresenta baixa uniformidade, algumas áreas recebem menos água do que o necessário, comprometendo o desenvolvimento das plantas. Por outro lado, as áreas que recebem excesso de água podem sofrer encharcamento, erosão do solo e, em alguns casos, perda de água por percolação, resultando na lavagem de nutrientes essenciais, o que também prejudica a produção agrícola.

Existem critérios específicos para avaliar o grau de uniformidade na irrigação por aspersão, e no presente estudo utilizaremos o método proposto por Christiansen (1942). O coeficiente de uniformidade (C_u) é calculado com base em dados experimentais coletados a partir de aspersores rotativos instalados no campo. As variáveis que mais influenciam a uniformidade incluem a pressão de funcionamento dos aspersores, o diâmetro dos bocais, o espaçamento entre os aspersores e as condições de vento durante a operação.

Os valores recomendados para a uniformidade de irrigação variam conforme o

desenvolvimento do sistema radicular das culturas. Quanto mais extenso for o sistema radicular da planta, maior será sua capacidade de absorção de água e nutrientes em uma área maior, reduzindo assim a necessidade de uma irrigação extremamente uniforme. Em plantas mais espaçadas, que tendem a ter raízes mais profundas e abrangentes, é aceitável trabalhar com coeficientes de uniformidade mais baixos. Pillsbury e Degan (1968) estabeleceram, na Tabela 19, valores mínimos dos coeficientes de uniformidade de Christiansen, com base nos espaçamentos entre as plantas cultivadas, adequando-os às necessidades específicas de cada cultura.

Tabela 6 - Valores mínimos do Coeficiente de Uniformidade, segundo espaçamento médio entre plantas

ESPAÇAMENTO MÉDIO ENTRE PLANTAS (m)	C_u (%)
0 – 2	85
2 – 4	80
4 – 6	75
6 – 8	65

Fonte: (Gomes, 2013)

2.6.2 Eficiência da Irrigação

De acordo com Testezlaf (2017), a precipitação gerada pelos aspersores não é totalmente aproveitada pelas raízes das plantas. Parte dela é perdida por evaporação e pelo arraste das gotas pelo vento, especialmente em áreas sujeitas a condições climáticas adversas. Além disso, uma porção da água pode infiltrar-se excessivamente no solo, resultando em perdas por percolação profunda. Isso ocorre principalmente devido à falta de uniformidade na distribuição da água no terreno, o que compromete a eficiência da irrigação e pode levar ao desperdício de recursos hídricos e nutrientes essenciais para as plantas.

As perdas causadas pela evaporação e pelo vento são influenciadas por vários fatores que podem flutuar ao longo do ciclo vegetativo da cultura, como temperatura, umidade relativa do ar, radiação solar, velocidade do vento, cobertura vegetal e o tamanho das gotas de água. Devido à complexidade de avaliar com precisão esses fatores, as perdas são geralmente estimadas de maneira aproximada, especialmente durante o período de maior demanda hídrica das plantas (Testezlaf, 2017).

A falta de uniformidade na irrigação por aspersão impacta diretamente a eficiência do aproveitamento da água pelas plantas em relação ao total distribuído. Quando uma lâmina de irrigação é aplicada, partes do terreno podem receber mais água do que o necessário, resultando em perdas por percolação ou escoamento superficial. Enquanto isso, outras áreas não recebem a quantidade adequada de água, prejudicando o crescimento das plantas e diminuindo a eficiência da irrigação (Testezlaf, 2017).

A eficiência de aplicação é a relação entre a quantidade de água retida no solo, disponível para as raízes das plantas, e a quantidade total de água aplicada durante a irrigação. Expressa em porcentagem, esse índice reflete o nível de aproveitamento da água pelo sistema de irrigação, indicando sua efetividade. Quanto maior a eficiência de aplicação, mais água é efetivamente utilizada pelas plantas, reduzindo desperdícios e maximizando os recursos hídricos disponíveis (McCulloch at al, 1967).

A eficiência de aplicação (E_a) da irrigação por aspersão geralmente varia ao longo do dia, alcançando entre 60% em regiões semiáridas e 75% em áreas de clima moderado. Contudo, quando a irrigação é realizada à noite, a eficiência pode atingir até 90%. Essa melhoria na eficiência noturna se deve à redução das perdas por evaporação e arraste das gotas pelo vento, proporcionando uma melhor utilização da água aplicada (McCulloch at al, 1967).

Tabela 7 - Valores em Porcentagem da Eficiência de Aplicação

LÂMINA DE IRRIGAÇÃO LÍQUIDA(mm)	EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA (mm/dia)		
	< 5	5 a 7,5	> 7,5
	Velocidade do vento < 6,5 Km/h		
25	68	65	62
50	70	68	65
100	75	70	68
150	80	75	70
	Velocidade do vento de 6,5 a 16 Km/h		
25	65	62	60
50	68	65	62
100	70	68	65
150	75	70	68
	Velocidade do vento > 16 Km/h		
25	62	60	58
50	65	62	60
100	68	65	62
150	70	68	65

Fonte: (Mc Culloch, 1967)

2.7 DISTRIBUIÇÃO DAS LINHAS LATERAIS E TRAÇADO DAS TUBULAÇÕES NO INTERIOR DAS PARCELAS DE IRRIGAÇÃO

Nos sistemas convencionais de aspersão, a distribuição das linhas laterais e o traçado das tubulações de distribuição dentro das parcelas são influenciados por diversos fatores, conforme os conceitos da EMBRAPA (2002):

Topografia do Terreno: A topografia é um dos fatores mais importantes a serem considerados na distribuição das linhas laterais em sistemas de irrigação por aspersão. As linhas laterais devem ser posicionadas paralelamente às curvas de nível do terreno para garantir uma irrigação uniforme. Caso não seja possível seguir essa orientação, é fundamental que as diferenças de cota ao longo das linhas laterais sejam limitadas, de modo a não comprometer a pressão média de funcionamento dos aspersores. Mantendo essa condição, é possível assegurar que a irrigação ocorra de forma eficiente, minimizando a perda de água e melhorando a uniformidade da precipitação no solo.

Comprimento Máximo das Linhas Laterais: O comprimento máximo de uma linha lateral em sistemas de irrigação por aspersão é determinado pela diferença de pressão permitida entre os aspersores ao longo da tubulação. À medida que o comprimento da linha lateral aumenta, as perdas de carga por atrito também aumentam, o que pode resultar em diferenças significativas de pressão entre os aspersores. Em terrenos com declividade leve e descendente na direção do fluxo de água, o ganho de energia devido à diferença de altura pode ajudar a compensar as perdas de carga ao longo da tubulação, permitindo que o comprimento das linhas laterais seja estendido. No entanto, é importante evitar a instalação de linhas laterais em direção ascendente, já que isso resultaria em uma combinação de perdas de carga por atrito e queda de pressão devido à diferença de altura. Quando não é possível evitar essa configuração, é essencial ajustar o comprimento e/ou o diâmetro das linhas laterais para equilibrar as pressões na tubulação e garantir uma irrigação eficiente. Isso assegura que todos os aspersores funcionem dentro da faixa de pressão ideal, promovendo uma distribuição uniforme da água no terreno.

Geometria da Parcela: Ao selecionar as formas geométricas para parcelas, lotes ou unidades de irrigação, é recomendável optar por formas retangulares. Isso se deve ao fato de que superfícies com formatos não retangulares resultam em comprimentos variáveis das linhas laterais, o que pode complicar tanto o manejo da irrigação quanto o dimensionamento hidráulico das tubulações. Em áreas com formato retangular, as linhas laterais devem ser dispostas em uma direção paralela a um dos lados do retângulo. Essa configuração facilita a uniformidade na

distribuição da água e otimiza o funcionamento do sistema de irrigação, permitindo um controle mais eficiente das operações de irrigação.

Direção Dominante do Vento: Para minimizar o impacto dos ventos sobre a precipitação dos aspersores, é recomendado dispor os aspersores em uma configuração retangular, com as linhas laterais instaladas na direção perpendicular à direção predominante do vento. Essa orientação ajuda a garantir uma distribuição mais uniforme da água sobre a área irrigada, melhorando a eficiência da irrigação e reduzindo as perdas causadas pelo arraste do vento.

Direção das Fileiras das Plantas: A orientação das linhas laterais, determinada pelos fatores mencionados anteriormente, influencia a disposição das fileiras de plantas. É aconselhável cultivar as plantas em fileiras paralelas às tubulações laterais. Essa configuração facilita os tratos culturais e os deslocamentos dos sistemas de irrigação, especialmente nos sistemas portáteis ou semiportáteis, otimizando o manejo e a eficiência da irrigação.

Localização do Ponto de Tomada D'água: A fonte de água que abastece a parcela de irrigação normalmente está localizada em seu interior, especialmente quando a fonte de distribuição também se encontra nesse espaço. No entanto, em sistemas de irrigação coletiva que atendem a várias parcelas, a rede de distribuição, que fornece água às tomadas d'água (hidrantes), costuma estar posicionada externamente, ao longo dos limites das parcelas, seguindo o traçado das vias de acesso dentro da área irrigada. Essa disposição facilita o acesso e a operação do sistema de irrigação.

2.8 ESCOAMENTO E REGIME DO FLUXO D'ÁGUA NAS TUBULAÇÕES

Fox, R. W.; McDonald, A. T. (1998) Relata que o escoamento de água em uma tubulação é considerado permanente quando suas características físicas, como velocidade, pressão, temperatura e massa específica, permanecem constantes ao longo do tempo em qualquer ponto do fluido. Quando essas características mudam com o tempo, o escoamento é chamado de não permanente. Dentro do escoamento permanente, pode-se ainda classificá-lo em:

Escoamento uniforme: quando a velocidade do fluido se mantém constante ao longo de toda a trajetória.

Escoamento variado: quando a velocidade muda ao longo da trajetória das partículas do fluido, formando diferentes linhas de corrente.

No dimensionamento dos sistemas de irrigação pressurizados, é fundamental considerar as situações transitórias do escoamento, que ocorrem quando há variações abruptas nas condições de fluxo (Fox, R. W.; McDonald, A. T., 1998). Essas situações transitórias podem ser causadas por:

- Abertura e fechamento de válvulas;
- Evacuação de ar dos condutos;
- Manobras de arranque e parada de bombas.

Um dos efeitos mais críticos dessas variações é o golpe de aríete, que ocorre quando o fluxo de água é rapidamente interrompido ou alterado, gerando sobrepressões súbitas nas tubulações. Essas sobrepressões podem ser intensas o suficiente para romper os tubos, especialmente quando os sistemas não são projetados para suportar tais sobrecargas.

Em uma tubulação, o regime de fluxo da água pode ser classificado como laminar, turbulento ou crítico, dependendo das características do escoamento (Fox, R. W.; McDonald, A. T., 1998):

Regime Laminar: O escoamento ocorre de forma organizada, com o fluido se movendo em filetes ou lâminas paralelas, sem que haja mistura significativa entre as camadas. As partículas de água seguem trajetórias suaves e ordenadas, e não há intercâmbio entre elas.

Regime Turbulento: As partículas de água seguem trajetórias irregulares, movendo-se em diversas direções enquanto fluem pelo conduto. Há um intercâmbio constante de partículas entre as camadas do fluido, e o escoamento é caótico.

Regime Crítico: Situa-se entre o laminar e o turbulento, sendo uma fase de transição. As características do escoamento podem variar entre o comportamento laminar e turbulento.

Uma diferença essencial entre os regimes laminar e turbulento é o comportamento das perdas de carga ao longo da tubulação. No regime laminar, a perda de carga é proporcional à velocidade média do escoamento, ou seja, ela aumenta de forma linear com o aumento da velocidade. Já no regime turbulento, a perda de carga é significativamente maior, pois ela varia com o quadrado da velocidade, resultando em um aumento exponencial à medida que o fluxo se intensifica (Fox, R. W.; McDonald, A. T., 1998).

Na prática, em sistemas de irrigação e outras aplicações com escoamento pressurizado, o regime de escoamento dentro das tubulações é geralmente turbulento, a menos que as velocidades sejam muito baixas, quase em estado de repouso. Esse fato é relevante para o dimensionamento dos sistemas, pois o regime turbulento implica maiores perdas de energia por atrito ao longo do conduto, o que pode impactar a eficiência do sistema e aumentar a demanda por pressão (Fox, R. W.; McDonald, A. T., 1998).

É possível determinar o regime de fluxo em uma tubulação por um parâmetro adimensional denominado número de Reynolds (Re), sendo ele a relação da velocidade média do fluxo com o produto do diâmetro interno da tubulação pela viscosidade cinética do fluido.

Com base em resultados experimentais realizados sob condições normais de escoamento em tubulações, os regimes de fluxo podem ser classificados utilizando as seguintes relações:

$$Re < 2000 \rightarrow \text{Regime Laminar}$$

$$Re < 4000 \rightarrow \text{Regime Turbulento}$$

$$2000 \leq Re \leq 4000 \rightarrow \text{Regime Crítico}$$

Tabela 8 - Viscosidade Cinemática da Água de Acordo com sua Temperatura

T (°C)	$\nu \left(\frac{m^2}{s} \cdot 10^{-6}\right)$	T (°C)	$\nu \left(\frac{m^2}{s} \cdot 10^{-6}\right)$
0	1,787	25	0,893
5	1,519	30	0,801
10	1,307	35	0,742
15	1,140	40	0,658
20	1,004	45	0,602

Fonte: (Gomes, 2013)

2.9 FUNDAMENTOS HIDRÁULICOS BÁSICOS

O transporte de água através de condutos forçados é governado por duas equações fundamentais (Cencel Y. A.; Cimbala, J. M., 2007):

Equação da Continuidade: Essa equação expressa o princípio da conservação de massa, indicando que a quantidade de fluido que entra em um sistema deve ser igual à quantidade que sai, se não houver acúmulo ou perda de massa. Para a água, que é praticamente incompressível nas pressões típicas das redes de abastecimento de irrigação, a equação afirma que, em um escoamento permanente, a vazão (Q), (volume de água transportado por unidade de tempo) permanece constante ao longo de todo o conduto (Expresso na Eq.18).

Equação da Energia: Também conhecida como equação de Bernoulli, aplicada a fluidos incompressíveis, afirma que, em um escoamento permanente, a soma das energias de pressão, potencial e cinética em uma seção de um conduto é igual à soma dessas mesmas energias em outra seção, mais as perdas de energia que ocorrem entre as duas seções (Expresso na Eq. 19).

2.10 PERDA DE CARGA AO LONGO DO CONDUTO

Parte da energia dos líquidos em regime dinâmico se dissipa devido à viscosidade do fluido e ao atrito interno, além dos efeitos da turbulência e dos choques entre as partículas. Essa energia dissipada se converte em calor e é denominada perda de carga por atrito, perda de energia por atrito ou perda de carga contínua ao longo do conduto (Fox, R. W.; McDonald, A. T., 1998).

Em um escoamento uniforme e permanente de um fluido em um conduto, a perda de carga (h_f) entre duas seções é diretamente proporcional à distância (L). A perda de carga unitária (j), definida como a relação entre a perda de carga total e o comprimento do conduto, permanece constante ao longo do escoamento. Ou seja, em condições de escoamento uniforme, a perda de carga por unidade de comprimento é a mesma em todo o conduto, mantendo a uniformidade no comportamento do fluido ao longo de sua trajetória (Fox, R. W.; McDonald, A. T., 1998).

De acordo com o mesmo, a perda de carga por atrito em uma tubulação é influenciada tanto pelas propriedades físicas do fluido quanto pelas características geométricas do conduto. No caso de um fluido, suas propriedades, como viscosidade e massa específica, desempenham um papel crucial. Em relação às tubulações, as características geométricas que afetam a perda de carga incluem o diâmetro interno (D) do conduto e a rugosidade absoluta (ε) as paredes internas. A rugosidade influencia a quantidade de atrito entre o fluido e as paredes da tubulação, aumentando as perdas de energia ao longo do escoamento.

O mesmo ainda afirma que as perdas de carga por atrito em escoamentos permanentes e uniformes podem ser calculadas por meio de diversas fórmulas empíricas, desenvolvidas com base em experimentos específicos. A escolha da fórmula mais apropriada dependerá do nível de precisão necessário e da semelhança entre as condições hidráulicas do sistema que está sendo projetado e as condições sob as quais a fórmula foi originalmente desenvolvida. Fatores como o regime de fluxo (laminar ou turbulento), o tipo de fluido, a rugosidade das tubulações e as velocidades envolvidas influenciam diretamente na precisão das equações utilizadas para o cálculo.

A fórmula empírica que atualmente apresenta maior aceitação prática para calcular a perda de carga é a fórmula de Darcy-Weisbach. Essa equação se ajusta de maneira precisa aos resultados experimentais e considera todos os parâmetros fundamentais que influenciam na perda de carga contínua, como a velocidade do fluido, o diâmetro do conduto, a viscosidade do

fluido e a rugosidade interna da tubulação. Devido a sua abrangência e precisão, a fórmula de Darcy-Weisbach também é referida como a "fórmula universal da perda de carga" (Fox, R. W.; McDonald, A. T., 1998).

O fator de atrito " f " é um coeficiente adimensional que influencia o cálculo da perda de carga em escoamentos. Para escoamentos em regime turbulento, ele depende da rugosidade relativa do tubo (ε/D) e do número de Reynolds (Re). Quando o escoamento está em regime laminar ($Re < 2000$), o fator de atrito não depende do material da tubulação e pode ser obtido diretamente pela fórmula de Poiseuille, que considera o fluxo laminar como suave e ordenado, sem grande influência da rugosidade interna das tubulações (Fox, R. W.; McDonald, A. T., 1998).

Segundo Azevedo Netto (1998), para valores de Reynolds (Re) entre 2000 e 4000, o fluxo se encontra em uma zona de transição entre os regimes laminar e turbulento, e não existe uma função precisa para determinar o fator de atrito (f) nesse intervalo. Já para escoamentos em regime turbulento ($Re \geq 4000$), o coeficiente de atrito (f) pode ser obtido utilizando a fórmula de Colebrook e White, que leva em consideração tanto a rugosidade relativa da tubulação quanto o número de Reynolds, fornecendo uma solução precisa para calcular a perda de carga em escoamentos turbulentos.

Os valores da rugosidade absoluta " ε " variam conforme o tipo de material e a qualidade de fabricação da tubulação. Esses valores são essenciais para o cálculo preciso das perdas de carga por atrito em sistemas hidráulicos. A Tabela 22 apresenta os valores médios ou intervalos de valores de rugosidade absoluta para diferentes materiais de fabricação das tubulações, oferecendo uma estimativa para cálculos. No entanto, para obter valores mais precisos de " ε ", assim como os coeficientes de atrito específicos das fórmulas empíricas, é recomendável utilizar as informações fornecidas pelos fabricantes das tubulações (Azevedo Netto et al, 1998).

Tabela 9 - Rugosidade Absoluta dos Tubos (ϵ) em mm

MATERIAL	TUBOS NOVOS	TUBOS VELHOS
Aço galvanizado	0,015 a 0,02	0,46
Aço rebitado	0,10 a 0,30	0,60
Aço revestido	0,04	0,05 a 0,12
Aço soldado	0,004 a 0,006	0,24
Chumbo	Lisos	Lisos
Cimento – amianto	0,03 a 0,10	-
Cobre ou latão	0,10 a 0,20	Lisos
Concreto bem acabado	0,004 a 0,006	-
Concreto ordinário	0,10 a 0,20	-
Ferro forjado	0,004 a 0,006	0,24
Ferro fundido	0,025 a 0,050	0,30 a 0,50
Manilhas cerâmicas	0,06	0,30
Plástico	0,001	0,001

Fonte: (Azevedo Netto, 1998)

Outra fórmula amplamente utilizada no dimensionamento das tubulações dos sistemas de irrigação pressurizados é a fórmula de Hazen-Williams. Nessa fórmula, o coeficiente (C) representa a rugosidade do material da tubulação, sendo fundamental para o cálculo das perdas de carga em escoamentos turbulentos. Os valores desse coeficiente (C) variam conforme o material da tubulação e podem ser obtidos a partir da Tabela 23, que indica os valores recomendados para diferentes tipos de materiais utilizados na fabricação das tubulações (Azevedo Netto et al, 1998).

Tabela 10 - Valor do Coeficiente C sugerido para a Fórmula de Hazen-Williams

TUBOS	NOVOS	USADOS \pm 10 ANOS	USADOS \pm 20 ANOS
Aço galvanizado	125	100	-
Aço rebitado	110	90	80
Aço soldado comum	125	110	90
Chumbo	130	120	120
Cimento – amianto	140	130	120
Cobre	140	135	130
Concreto (bom acabamento)	130	-	-
Concreto (acabamento comum)	130	120	110
Ferro fundido	130	120	105
Latão	130	130	130
Plástico (PVC)	140	135	130

Fonte: (Azevedo Netto, 1998)

2.11 PERDAS DE CARGA LOCALIZADAS

As conexões e peças especiais, como curvas, cotovelos, registros e válvulas, nas redes de tubulações, causam alterações abruptas no escoamento que geram perdas de carga nesses pontos. Essas perdas são chamadas de perdas de carga localizadas ou singulares. Diferente das perdas de carga por atrito, que podem ser determinadas com maior precisão a partir de parâmetros definidos, as perdas localizadas são mais complexas de quantificar, pois dependem de vários fatores, como o tipo de conexão, ângulos de curvatura e a forma como a água flui através desses pontos (Pimenta, 1981).

A perda de carga localizada (Δhf) em uma singularidade ou peça especial do conduto pode ser calculada como uma fração da carga cinética ($V^2/2g$) logo após o ponto em que ocorre a perda. Essa abordagem permite avaliar o impacto que as alterações no fluxo, causadas por conexões como curvas e válvulas, têm sobre a energia do sistema hidráulico (Pimenta, 1981).

O coeficiente de perda de carga singular (K) é determinado por meio de experimentos e varia de acordo com o tipo e o diâmetro da peça especial utilizada. A padronização dos valores de (K) é uma tarefa complexa, pois existem numerosos modelos e fabricantes para cada tipo de peça. Para facilitar a referência, a Tabela 24 apresenta valores aproximados de (K) para diversas peças especiais comumente empregadas nas tubulações dos sistemas de irrigação pressurizados (Azevedo Netto et al, 1998).

Tabela 11 - Valores Aproximados do Coeficiente de Perda Localizada (K)

PEÇAS	K	PEÇAS	K
Ampliação gradual	0,30	Junção	0,40
Bocais	2,75	Medidor Venturi	2,50
Comporta aberta	1,00	Redução gradual	0,15
Controlador de vazão	2,50	Registro de ângulo, aberto	5,00
Cotovelo de 90° raio curto	0,90	Registro de gaveta, aberto	0,20
Cotovelo de 90° raio longo	0,60	Registro de globo, aberto	10,00
Cotovelo de 45°	0,40	Saída de canalização	1,00
Crivo	0,75	Tê, passagem direta	0,60
Curva de 90°	0,40	Tê, saída lateral	1,30
Curva de 45°	0,20	Tê, saída bilateral	1,80
Curva de retorno	2,20	Válvula de bóia	6,00
Entrada normal	0,50	Válvula de pé	1,75
Entrada de borda	1,00	Válvula de retenção	2,75

Fonte: (Azevedo Netto, 1998)

2.12 CONCEITO DO DIMENSIONAMENTO DAS LINHAS LATERAIS

O dimensionamento das tubulações nas redes hidráulicas dos sistemas de irrigação é realizado de forma inversa ao sentido do fluxo de água na instalação. Primeiro, define-se o traçado das tubulações, os espaçamentos, a vazão e a pressão dos aspersores. Com essas informações, passa-se ao dimensionamento das linhas laterais. Após isso, são calculadas as tubulações da rede de distribuição. Por fim, o último passo é o dimensionamento da estação elevatória ou de bombeamento, garantindo que toda a instalação funcione de maneira eficiente e eficaz (Gomes, 2013).

Cada linha lateral apresenta uma vazão que diminui progressivamente, começando com um valor “ Q ”, que é igual à soma das descargas dos aspersores, e reduzindo até o valor “ q ”, correspondente à vazão do último aspersor. Como resultado, a perda de carga por atrito ao longo da linha lateral será sempre inferior àquela que ocorreria se não houvesse derivações para os aspersores. Isso deve-se ao fato de que as derivações permitem uma distribuição mais uniforme da água, resultando em menores perdas ao longo do sistema (Gomes, 2013).

2.13 OPÇÕES DE TUBULAÇÕES MAIS UTILIZADAS NO MERCADO ATUAL

Para Testezlaf (2015), a escolha adequada dos tipos de tubo é fundamental para o bom dimensionamento das linhas laterais e das redes de distribuição dos sistemas de irrigação. Para selecionar as tubulações de forma apropriada, é necessário considerar diversos fatores, incluindo:

Diâmetros: A seleção do diâmetro deve garantir um fluxo eficiente e minimizar as perdas de carga.

Custo dos tubos: O custo inicial dos materiais deve ser avaliado em relação ao orçamento disponível.

Pressões de trabalho: É importante escolher tubos que suportem as pressões operacionais do sistema.

Cargas externas: Avaliar as cargas externas que podem atuar sobre as tubulações, como o peso do solo e tráfego, é essencial para evitar danos.

Custo de instalação: Considerar o custo da instalação e como ele se relaciona com a escolha dos materiais.

Manutenção: A facilidade de manutenção dos tubos escolhidos deve ser levada em conta.

Qualidade da água: Características da água a ser transportada, como corrosividade e presença de sólidos em suspensão, podem afetar a escolha do material do tubo.

Características do terreno: O tipo de solo e a topografia influenciam na viabilidade e no tipo de instalação.

Segundo Testezlaf (2015), os tipos de tubo utilizados em sistemas de irrigação, tanto pequenos quanto grandes, incluem geralmente:

Plástico: Os tubos de plástico, como PVC e polietileno, são os mais comuns, devido à sua leveza, resistência à corrosão e facilidade de manuseio. Os tubos reforçados externamente com fibra de vidro e resina poliéster (RPVC) também estão se tornando populares por suas propriedades duráveis.

Tabela 12 - Tubos de PVC

BITOLAS			DIMENSÕES		MASSA (Kg/m)
DN (Nº)	DE (mm)	DI (mm)	ESPESSURA (mm)	COMPRIMENTO (m)	
100	118	108,4	4,8	6	2,670
150	170	156,4	6,8	6	5,500
200	222	204,2	8,9	6	10,966
250	274	252,0	11,0	6	13,920
300	326	299,8	13,1	6	19,855
350	378	347,6	15,2	6	-
400	429,9	395,5	17,2	6	-
500	532	489,4	21,3	6	-

Fonte: (NBR 5647, 1999)

Alumínio: Embora tenham sido amplamente utilizados no passado, os tubos de alumínio estão em desuso na maioria dos sistemas de irrigação modernos, em parte devido ao seu custo e à tendência de corrosão.

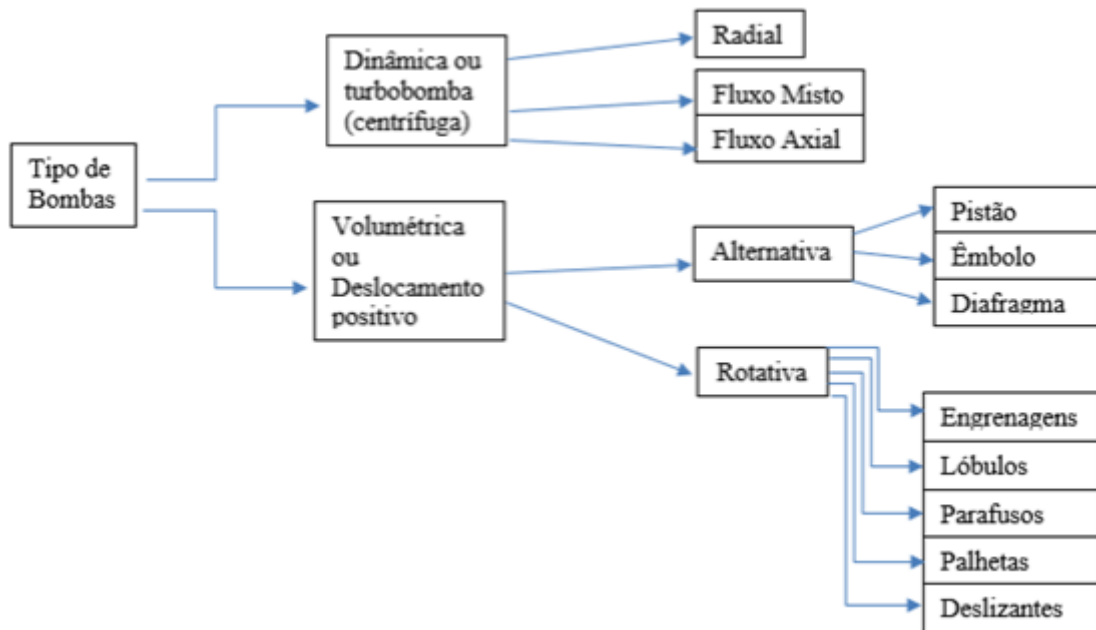
Aço galvanizado: Assim como os tubos de alumínio, os de aço galvanizado estão se tornando menos frequentes. Eles apresentam boa resistência mecânica, mas são mais pesados e suscetíveis à corrosão.

Ferro fundido: Os tubos de ferro fundido têm uma aplicação bastante restrita nos sistemas de irrigação. Embora sejam muito duráveis, seu peso e custo elevado limitam sua utilização.

Atualmente, os tubos de plástico dominam o mercado de sistemas de irrigação devido a suas vantagens em termos de custo, facilidade de instalação e resistência a diversos fatores ambientais.

2.14 BOMBAS HIDRÁULICAS

Figura 6 - Esquemática dos Principais Tipos de Bombas



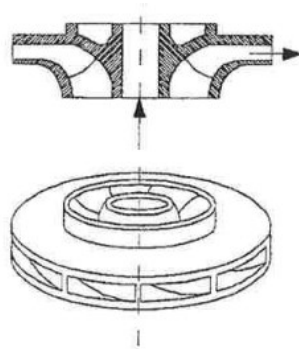
Fonte: (Autoria Própria, 2024)

Nas estações elevatórias de água voltadas para sistemas de irrigação, as turbobombas rotativas, especialmente as centrífugas, dominam amplamente. Essas bombas são preferidas por abrangerem uma ampla faixa de vazão e pressão, além de oferecerem alta eficiência com custos reduzidos de instalação, operação e manutenção. Por esse motivo, o foco deste tópico será voltado para esse tipo específico de bomba.

As bombas centrífugas são classificadas com base em diversas características, com destaque para: trajetória do fluido, construção e número de rotores. No que diz respeito à trajetória do fluido, elas podem ser divididas em radiais, mistas ou axiais (Fox, R. W.; McDonald, A. T., 1998):

Bomba centrífuga de Fluxo Radial: Neste tipo de bomba, o líquido é movimentado do centro para a periferia do rotor, em um fluxo que ocorre de forma perpendicular ao eixo de rotação. O fluido entra no rotor de maneira paralela ao eixo e é direcionado pelas pás para a periferia, seguindo trajetórias contidas em planos perpendiculares ao eixo.

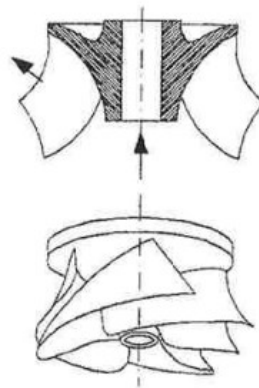
Figura 7 - Rotor de Fluxo Radial



Fonte: (<https://edisciplinas.usp.br/>, 2017)

Bomba centrífuga de Fluxo Misto: Neste tipo, o movimento do líquido ocorre de forma inclinada (diagonal) em relação ao eixo de rotação. O fluido entra no rotor em um fluxo paralelo ao eixo, mas sai do rotor em uma trajetória ligeiramente inclinada, que segue um plano quase perpendicular ao eixo de rotação. A pressão é gerada tanto pela força centrífuga quanto pela ação de sustentação ou propulsão exercida pelas pás.

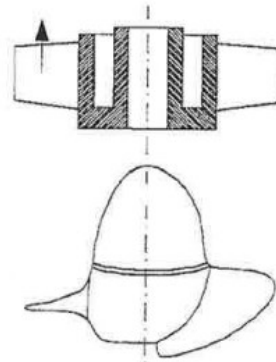
Figura 8 - Rotor de Fluxo Misto



Fonte: (<https://edisciplinas.usp.br/>, 2017)

Bomba centrífuga de Fluxo Axial: o movimento do líquido ocorre de forma paralela ao eixo de rotação. O rotor, nesse tipo de bomba, geralmente possui uma única base de fixação das pás, que tem a forma de um cone ou ogiva. O fluido é impulsionado ao longo do eixo pelas pás, o que confere pressão e movimento ao líquido sem alterar significativamente sua trajetória.

Figura 9 - Rotor de Fluxo Axial



Fonte: (<https://edisciplinas.usp.br/>, 2017)

Quanto ao número de rotores, as bombas centrífugas podem ser classificadas em simples e múltiplos estágios. No caso das bombas de simples estágio, há apenas um rotor. No entanto, quando são necessárias grandes alturas de elevação, o tamanho do rotor pode se tornar excessivamente grande, o que aumenta os custos e reduz a eficiência. Para contornar esse problema, utilizam-se bombas de múltiplos estágios, que possuem dois ou mais rotores fixados em um mesmo eixo e dispostos em série. Nesse arranjo, a descarga de um rotor é direcionada para a sucção do próximo, aumentando progressivamente a pressão até atingir o valor desejado (Fox, R. W.; McDonald, A. T., 1998).

2.15 ALTURAS, POTÊNCIAS, RENDIMENTOS E PERDAS

Conceitos fundamentais para o dimensionamento do sistema de irrigação retirados da literatura de Gomes, H. P. (1999):

- Altura estática ou geométrica de elevação (h_g): Em termos energéticos, ela corresponde à diferença de energia potencial entre o nível da superfície livre do reservatório inferior e o ponto de descarga no recalque. Assim, a relação é expressa por: $[h_g = h_a + h_r]$.
- Altura geométrica de aspiração (h_a): Se refere à elevação entre o nível do fluido no reservatório inferior e o centro do rotor da bomba.
- Altura geométrica de recalque (h_r): Esse termo refere-se à altura que o

fluido precisa ser elevado após passar pela bomba, ou seja, do nível do rotor até o ponto de descarga do sistema de bombeamento.

- Perdas de carga na aspiração (H_{fa}): Representam a soma de todas as resistências que o fluido encontra ao longo da tubulação de aspiração, desde o ponto de captação até a entrada da bomba. Essas perdas ocorrem devido ao atrito do fluido com as paredes da tubulação, mudanças de direção, válvulas, conexões e outros obstáculos presentes na linha de sucção.
- Perdas de carga no recalque (H_{fr}): Referem-se à soma de todas as resistências encontradas pelo fluido no trajeto da bomba até o final da tubulação de descarga. Essas perdas são causadas pelo atrito entre o fluido e as paredes da tubulação, além de obstáculos como válvulas, curvas, conexões e acessórios presentes na linha de recalque.
- Altura manométrica de aspiração (H_a):
 - Para bomba não afogada: $[H_a = h_a + H_{fa}]$
 - Para bomba afogada: $[H_a = -h_a + H_{fa}]$
- Altura manométrica de recalque (H_r): $[H_r = h_r + H_{fr}]$.
- Altura manométrica (H): representa a energia fornecida pela bomba ao fluido, expressa como energia por unidade de peso do líquido bombeado. Ela é uma das variáveis mais importantes no dimensionamento da bomba, juntamente com a vazão. Enquanto a vazão reflete a quantidade de fluido transportado e sua velocidade, a altura manométrica expressa a capacidade da bomba de superar obstáculos como desníveis e perdas por atrito, garantindo que o fluido chegue ao destino com a pressão ou energia cinética necessárias. A altura manométrica pode ser calculada pela aplicação da equação da energia entre a superfície livre do reservatório inferior e o ponto de descarga na tubulação de recalque.
- Potência hidráulica (P_{hid}): É a altura manométrica (H), expressa em termos de potência, ou seja, a energia por unidade de tempo. Ela é calculada multiplicando-se a altura manométrica (H) pela vazão gravimétrica (γQ), que representa o peso do fluido por unidade de

tempo. A potência manométrica reflete a quantidade de energia que o fluido efetivamente recebe da bomba por unidade de tempo, considerando tanto a elevação do fluido quanto as perdas por atrito e outros fatores ao longo do trajeto.

- Rendimento da bomba (η): É a relação entre a energia útil transmitida ao fluido pela bomba e a energia total recebida pela bomba do seu motor ou acionador. É expresso como o quociente entre a potência hidráulica (P_{hid}) ou seja, a potência efetivamente fornecida ao fluido, e a potência mecânica (P_m) recebida pela bomba.
- Rendimento do motor elétrico (η_{me}): é o quociente entre a potência mecânica (P_m) fornecida pelo motor para acionar a bomba e a potência elétrica (P_e) recebida pelo motor. Ele indica a eficiência do motor em converter a energia elétrica em energia mecânica.
- Potência motriz (P_m): É a potência medida no eixo do motor, ou seja, a quantidade de energia mecânica disponível para acionar a bomba e pode ser determinada a partir do rendimento da bomba.
- Rendimento do conjunto motorbomba (η_{mb}): É definido como o quociente entre a potência hidráulica (P_{hid}) fornecida ao fluido e a potência elétrica (P_e) consumida pelo motor. Ele indica a eficiência geral do sistema motor-bomba em converter a energia elétrica em energia hidráulica útil para o bombeamento.
- Altura motriz (H_m): Nada mais é do que a potência motriz expressa em energia/peso.
- Perdas externas de energia na bomba: Representam a quantidade de energia que é dissipada no sistema devido a ineficiências, como atrito interno, turbulência e outros fatores que impedem a conversão total de energia motriz em energia hidráulica útil. Essas perdas são determinadas pela diferença entre a potência motriz (P_m), fornecida ao eixo da bomba, e a potência hidráulica (P_{hid}), transferida ao fluido. Em termos de altura, é a diferença entre a altura motriz e a altura manométrica.
- Perdas internas de energia na bomba: São as perdas causadas devido ao movimento do fluido, dividindo-se em:

- Perdas volumétricas: São na verdade as perdas de vazão. Ocoorem através do eixo, selo mecânico ou gaxeta das bombas. E perdas por recirculação, ocoorendo em zonas de alta pressão (na saída dos rotores) e de baixa pressão (na entrada dos mesmos).
- Perdas hidráulicas: São referente às perdas por choque na entrada das pás e por atrito nos canais internos. Se a bomba for bem projetada, os choques são minimizados e trabalhará próxima ao ponto de máxima eficiência.

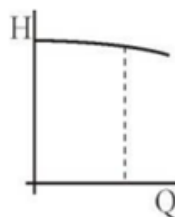
2.16 CURVAS CARACTERÍSTICAS DAS BOMBAS

A caracterização de uma bomba se refere principalmente pelos valores de sua altura manométrica e de vazão. Essa relação, pode ser expressa na forma de gráfico, denominando-se: “Curva Característica Principal”. Junto da mesma, tem-se outras grandezas igualmente importantes, como: Diâmetro do rotor, velocidade de rotação, potência motriz, rendimento e altura de aspiração. O conjunto das mesmas é chamado de “Curvas Características”. Estas são disponibilizadas pelos fabricantes a partir de ensaios laborais e são de suma importância para a escolha da unidade que melhor satisfaz às necessidades de um projeto de irrigação (Gomes, H. P., 1999).

A curva característica principal apresenta várias formas em relação à suas características:

Plana (flat): Variação pouco acentuada da altura manométrica em relação a vazão. Geralmente, são casos associados a rotores largos, com muitas pás, e com expressivos ângulos de saída.

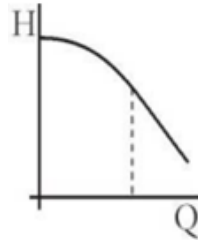
Figura 10 - Curva Característica Plana (Flat)



Fonte: (Autoria Própria, 2024)

Com muita inclinação (step): A altura varia rigorosamente com a vazão. Estão associadas a características inversas a curva tipo “flat”;

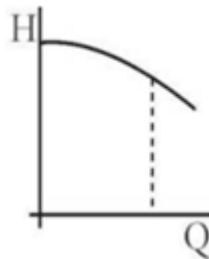
Figura 11 - Curva Característica com Muita Inclinação (Step)



Fonte: (Autoria Própria, 2024)

Padrão (rising): Possuem comportamento intermediário entre a flat e step;

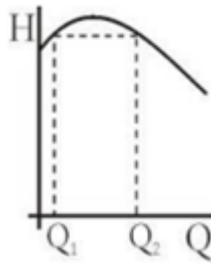
Figura 12 - Curva Característica Padrão (Rising)



Fonte: (Autoria Própria, 2024)

- Instável (drooping): Quando uma bomba possui uma altura manométrica máxima superior à chamada altura de “shut off” (altura máxima de recalque, sem vazão), a operação em alturas intermediárias entre esses dois valores pode levar a uma situação em que duas vazões distintas sejam possíveis para a mesma altura manométrica. Essa condição cria uma instabilidade no sistema, pois a bomba pode oscilar entre essas duas vazões, o que pode resultar em um funcionamento ineficiente ou até mesmo prejudicial ao sistema de bombeamento.

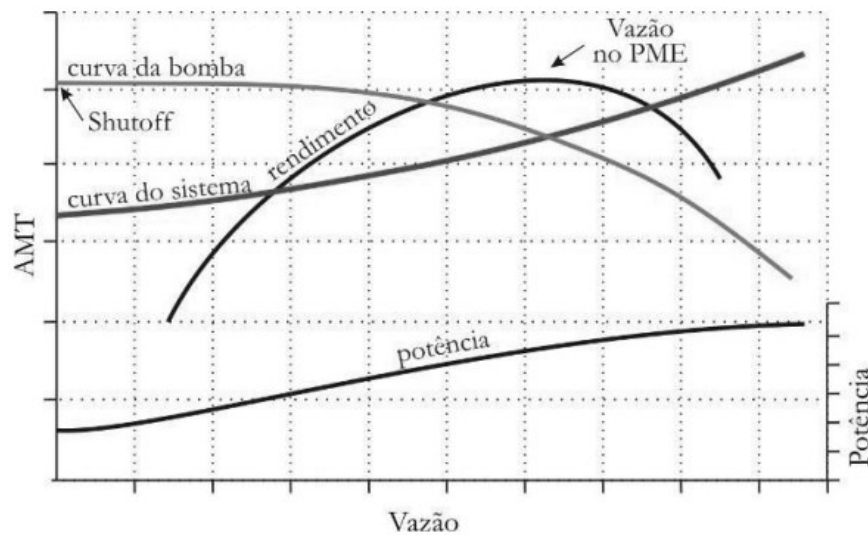
Figura 13 - Curva Característica Instável (Drooping)



Fonte: (Autoria Própria, 2024)

A Curva Característica Principal se junta as curvas de rendimento, a de potência motriz dando origem às “Curvas Características da Bomba”, que podemos analisar a Figura 18:

Figura 14 - Curvas características esquemáticas



Fonte: (Gomes, 1999)

Quando a curva característica do sistema hidráulico se sobrepõe à curva característica da bomba, o ponto de interseção entre essas duas curvas é denominado ponto de trabalho (*PT*). Esse ponto representa a condição de operação ideal da bomba, onde a vazão e a altura manométrica ($H - Q$) estão equilibradas com as necessidades do sistema. Operar em qualquer outro ponto do gráfico ($H - Q$), diferente do ponto de trabalho (*PT*), só é possível modificando-se uma ou ambas as curvas.

2.17 CAVITAÇÃO E NPSH

Segundo Fox, R. W.; McDonald, A. T. (1998), a cavitação pode ocorrer em qualquer máquina que trabalha com líquidos sempre que a pressão estática local cai abaixo da pressão de vapor do fluido. Quando essa condição acontece, o líquido pode instantaneamente passar do estado líquido para vapor, formando bolhas ou cavidades de vapor fazendo com que esse fenômeno altere significativamente a configuração do escoamento. A formação de cavidades de vapor interfere na passagem efetiva do escoamento, o que modifica o campo de pressão local. Como o tamanho e a forma das cavidades são influenciados por essas variações de pressão, o escoamento pode se tornar transiente, ou seja, instável e sujeito a oscilações. Esse comportamento transiente pode levar à vibração da máquina e, em casos mais graves, danificar componentes, comprometendo a eficiência e a integridade do sistema hidráulico.

A tendência à cavitação aumenta à medida que a velocidade do escoamento local se eleva. Isso ocorre tipicamente quando a vazão ou a velocidade de rotação da bomba são aumentadas. Nesses casos, a aceleração do escoamento amplifica a queda de pressão, tornando o sistema mais suscetível à cavitação.

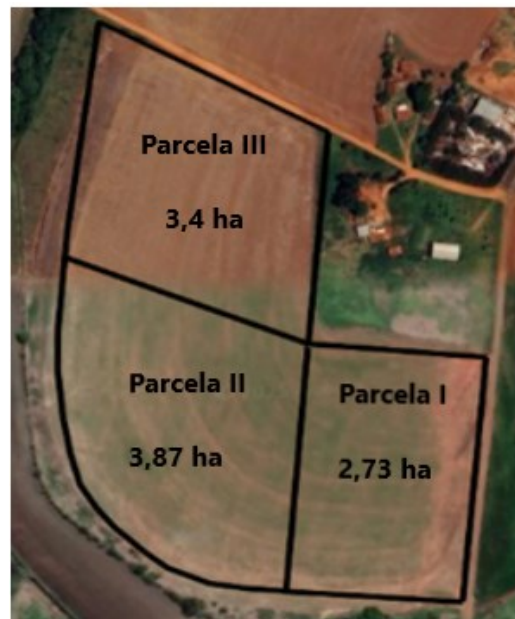
Logo, a cavitação pode ser evitada se a pressão em todos os pontos da máquina for mantida acima da pressão de vapor do líquido de trabalho.

Segundo Fox, R. W.; McDonald, A. T. (1998), a altura de sucção positiva líquida (NPSH) é definida como a diferença entre a pressão absoluta de estagnação no escoamento da sucção da bomba e a pressão de vapor do líquido, expressa em termos de altura de líquido. Em outras palavras, ela indica o quão longe o sistema está de atingir as condições de cavitação. Quanto maior for a altura NPSH, menor será a probabilidade de ocorrência de cavitação, já que a pressão disponível para evitar a vaporização indesejada será maior.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 ÁREA DE ANÁLISE

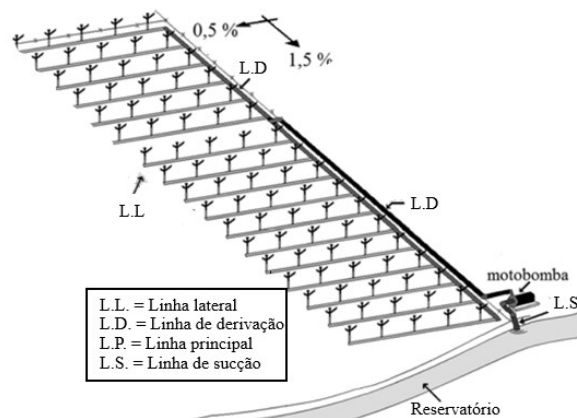
Figura 15 - Lote de Análise para Dimensionamento do Sistema de Irrigação



Fonte: (Google Earth, 2024)

3.2 REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO MODELO DE IRRIGAÇÃO

Figura 16 – Esquematização do modelo de irrigação



Fonte: (Autoria Própria, 2024)

3.3 MOTODOLOGIA ABORDADA PARA O CASO

A metodologia utilizada no projeto basicamente foi dividida em quatro etapas:

ETAPA 1 – Determinar as características agronômicas da área a ser irrigada.

ETAPA 2 – Determinar o esquema (layout) da irrigação, parcelar e dimensionar as linhas laterais, derivação, principal/recalque e sucção;

ETAPA 3 – Dimensionar o conjunto motobomba, com base nos critérios hidráulicos e econômicos;

ETAPA 4 – Determinar o manejo da irrigação.

A Etapa 1, será formada por dois passos:

- Fixar valores fundamentais relacionados ao solo da área a ser irrigada;
- Dimensionar o aspersor através dos dados obtidos no passo anterior.

Na Etapa 2, a sequência é a determinação dos próximos onze passos (para cada parcela):

- Executar a distribuição das linhas laterais, linha de derivação, linha principal e de sucção e o traçado das tubulações no interior das parcelas;
- Definir o comprimento da linha lateral, desnível do terreno, espaçamento entre aspersores e laterais, e sua quantidade;
- Calcular o diâmetro das linhas laterais com base nos passos executados acima;
- Calcular a pressão na entrada das linhas laterais;
- Definir o comprimento da linha de derivação, desnível do terreno e sua quantidade;
- Calcular o diâmetro da linha de derivação;
- Calcular a pressão na entrada da linha de derivação;
- Definir o comprimento da linha principal e a velocidade de escoamento;
- Calcular o diâmetro da linha principal;
- Definir o comprimento da linha de sucção e a velocidade de escoamento;
- Calcular o diâmetro da linha de sucção;

A Etapa 3 é composta por dois passos:

- Determinar a altura manométrica da parcela com situação mais desfavorável hidráulicamente.
- Dimensionar a potência do conjunto motobomba.

Por fim, a metodologia da Etapa 4, destaca-se na determinação do manejo da irrigação através das seguintes grandezas:

Tabela 13 - Grandezas a serem Calculadas para a Conclusão da Etapa 4.

GRANDEZA	SIGLA
LÂMINA LÍQUIDA MÁXIMA DE IRRIGAÇÃO	L_{lm}
NECESSIDADE DE IRRIGAÇÃO LÍQUIDA MÁXIMA DA CULTURA	N_{lm}
FREQUÊNCIA MÁXIMA DE IRRIGAÇÃO	$F_{máx}$
EFICIÊNCIA DA IRRIGAÇÃO	E_f
FRAÇÃO DA ÁGUA DE LIXIVIAÇÃO	LR
LÂMINA BRUTA MÁXIMA DE IRRIGAÇÃO	L_{bm}
NECESSIDADE DE IRRIGAÇÃO BRUTA MÁXIMA DA CULTURA	N_{bm}
TEMPO DE APLICAÇÃO DA ÁGUA NO SOLO	T

Fonte: (Autoria própria, 2024)

3.4 LEVANTAMENTO DAS CONDIÇÕES DE CONTORNO

Tabela 14 - Dados Sobre o Solo

DADOS SOBRE O SOLO DE TEXTURA ARENOSA		
Profundidade média	1,5	m
Capacidade de campo	15	% do peso do solo
Ponto de murcha	5	% do peso do solo
Velocidade de Infiltração Básica	18	mm/h
Densidade Aparente	1,4	g/cm^3

Fonte: (Autoria Própria, 2024)

Tabela 15 - Dados Sobre o Clima

DADOS SOBRE O CLIMA		
Velocidade máxima do vento	4	m/s
Evaporação no Tanque Classe A, no mês de máxima demanda (out)	12	mm/dia
Umidade relativa do ar, no mês de máxima demanda	57	%

Fonte: (Autoria Própria, 2024)

Tabela 16 - Dados Sobre a Cultura

DADOS SOBRE A CULTURA		
Profundidade efetiva do sistema radicular	90	cm
Déficit hídrico tolerável	40	%

Fonte: (Autoria Própria, 2024)

Tabela 17 - Dados Sobre a Água

DADOS SOBRE A QUALIDADE DA ÁGUA		
condutividade elétrica da água, medida a 25°C	1	mmhos/cm

Fonte: (Autoria Própria, 2024)

Tabela 18 - Dados Sobre o Conjunto Motobomba

DADOS SOBRE O CONJUNTO MOTOBOMBA		
rendimento esperado do conjunto	75	%
taxa anual de aumento da energia	15	%
taxa de juro anual	10,75	%

Fonte: (Autoria Própria, 2024)

Tabela 19 - Dados Sobre os Equipamentos

DADOS SOBRE OS EQUIPAMENTOS	
Sistema de irrigação semiportátil com tubos de PVC	Linhas laterais e tubulações de distribuição fixas;
Vida útil dos equipamentos (tubos, conexões e conjunto motobomba)	20 anos
Perda de carga localizada no hidrante, na entrada da lateral	1,5 mca
Altura do tubo de subida	2 m
Coefficiente de rugosidade, C de Hazen-Williams, admitido	140

Fonte: (Autoria Própria, 2024)

3.5 EQUACIONAMENTO

3.5.1 Lâmina Líquida Máxima de Irrigação (L_{lm})

$$L_{lm} = \frac{1}{10}(C_c - PM)D_{ar}YZ_r \quad (1)$$

Sendo:

L_{lm} = Lâmina Líquida Máxima de Irrigação [mm];

C_c = Umidade à capacidade de campo, em [%] de peso do solo;

PM = Umidade correspondente ao ponto de murcha, em [%] de peso do solo;

D_{ar} = Densidade aparente relativa do solo [adimensional];

Y = Déficit hídrico tolerável de umidade [%];

Z_r = Profundidade efetiva das raízes da planta [m].

3.5.2 Necessidade de Irrigação Líquida Máxima Da Cultura (N_{lm})

$$ET_o = E_{tanque} \cdot Kp \quad (2)$$

$$N_{lm} = ETp \quad (3)$$

Sendo:

ETo = Evapotranspiração da cultura de referência

E_{tanque} = Evaporação medida no tanque

Kp = Coeficiente do tanque

ETp = Evapotranspiração mensal máxima da cultura, em mm.

3.5.3 Frequência máxima de irrigação ($F_{m\acute{a}x}$)

$$F_{m\acute{a}x}(dias) = \frac{L_{lm}(mm)}{N_{lm}\left(\frac{mm}{dia}\right)} \quad (4)$$

3.5.4 Eficiência da Irrigação (E_f)

$$E_f = E_a \cdot E_d \quad (5)$$

Sendo:

E_a = Eficiência de Aplicação

E_d = Eficiência de Distribuição

3.5.5 Fração da Água de Lixiviação (LR)

$$LR = \frac{CEa}{5CE - CEa} \quad (6)$$

Sendo:

CEa = Condutividade elétrica da água de irrigação, em dS/m (mmhos/cm), medida a 25 °C.

CE = Valor estimado da condutividade elétrica do extrato de solo saturado, em dS/m (mmhos/cm).

3.5.6 Lâmina bruta de Irrigação (L_b)

$$L_b = 100 \times \frac{L_l}{E_f} \quad (7)$$

Sendo:

L_l = Lâmina de irrigação líquida [mm]

E_f = Eficiência do sistema de irrigação[%]

3.5.7 Necessidade de Irrigação Bruta no Período de Máxima Demanda (N_{bm})

$$N_{bm} = 100 \times \frac{N_l}{E_f} \quad (8)$$

Sendo:

N_l = necessidade de irrigação líquida [mm]

3.5.8 Tempo de Aplicação da Água no Solo ($T_{mín}$)

$$T_{\min} = \frac{L_b(mm)}{V_b \left(\frac{mm}{h} \right)} \quad (9)$$

Sendo:

V_b = Velocidade de infiltração básica do solo.

3.5.9 Variação na Altura do Início ao Final da Linha (m)

$$\Delta z = (Des_t \cdot L_{LL}) \div 100 \quad (10)$$

Em que:

L_{LL} = comprimento da linha lateral (m);

Des_t = desnível do terreno (%).

3.5.10 Perda de Carga Permissível (h_f)

$$h_f = (0,20 \cdot PS) - \Delta z \quad (11)$$

Onde:

PS = pressão de serviço (mca)

Δz = variação na altura do início ao final da linha (m).

3.5.11 Número de Aspersores (N)

$$N = L_{LL}/E_{asp} \quad (12)$$

Em que:

N = Número de aspersores;

L_{LL} = Comprimento da linha lateral (m);

E_{asp} = Espaçamento entre aspersores (m).

3.5.12 Fator de Correção (f)

$$f = (m + 1)^{-1} + (2 \cdot N)^{-1} + \left[\frac{\sqrt{(m - 1)}}{6 \cdot N^2} \right] \quad (13)$$

Em que:

f = fator de correção, (adimensional);

m = constante com valor de 1,85 (para a equação de Hazen-Williams);

N = Número de aspersores.

3.5.13 Perda de Carga Permissível Corrigida (h_f')

$$h_f' = [(0,20 \cdot PS) - \Delta z] / f \quad (14)$$

3.5.14 Perda de Carga Linear (j)

$$j = (h_f' / L_{LL}) \quad (15)$$

3.5.15 Diâmetro da linha lateral (Q_{LL})

$$D = \sqrt[2,63]{\frac{Q_{LL}}{0,2788 \cdot C \cdot J^{0,54}}} \quad (16)$$

Em que:

Q_{LL} = vazão no início da linha lateral (m^3/s);

J = perda de carga linear (m/m);

D = diâmetro interno da tubulação (m);

C = coeficiente de rugosidade (adimensional).

3.5.16 Pressão no Início da Linha Lateral (P_{IN})

$$P_{IN} = PS + 0,75 \cdot h_f + A_a - 0,5 \cdot \Delta z \quad (17)$$

Onde:

A_a = Altura do aspersor (m)

3.5.17 Equação da Continuidade (Para um fluido incompressível)

$$\vec{V}_1 \cdot A_1 = \vec{V}_2 \cdot A_2 \quad (18)$$

Onde:

\vec{V}_1 = Velocidade

A_1 = Área da seção

3.5.18 Equação da Energia (Bernoulli)

$$\frac{p_1}{\gamma} + z_1 + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \frac{V_2^2}{2g} + h_f \quad (19)$$

Onde:

$\frac{p_1}{\gamma}$ = Energia de pressão.

z_1 = Energia potencial.

$\frac{V_1^2}{2g}$ = Energia cinética.

h_f = Perdas de energia ou carga entre as seções 1 e 2

4 RESULTADOS

4.1 CLASSIFICAÇÃO DOS RESULTADOS

4.1.1 Escolha do Aspersor

O aspersor escolhido é da marca Agropolo, modelo NY-30 ER, bocal longo azul. Segundo o manual do fabricante, para utilização em um espaçamento de 12 x 18 m e uma intensidade de aplicação de água de 16,94 mm/h (o que atende à VIB determinada no campo), é necessária uma pressão de serviço de 25 mca . O diâmetro de alcance é de 32 m e a vazão é de 3,66 m^3/h .

4.1.2 Disposição do Sistema

Optou-se por dividir a área em três parcelas (Parcela I, Parcela II e Parcela III) independentes para facilitar o dimensionamento e o posterior manejo do sistema.

A Parcela I apresenta as seguintes dimensões: 198 m x 138 m , totalizando 2,73 ha . Será composta por 7 linhas laterais de 183 m cada e uma linha de derivação de 108 m .

A Parcela II apresenta as seguintes dimensões: 198 m x 198 m , totalizando 3,9 ha . Será composta por 11 linhas laterais de 189 m cada e uma linha de derivação de 204 m .

A Parcela III apresenta as seguintes dimensões: 198 m x 172 m , totalizando 3,4 ha . Será composta por 11 linhas laterais de 158 m cada e uma linha de derivação de 204 m . As três áreas apresentam um declive de 1,5% na direção principal do terreno e de 0,5% nas curvas de nível.

A linha principal terá 138 m e será disposta no sentido da maior inclinação do terreno. Todas as tubulações serão de PVC. O conjunto motobomba será instalado a uma distância horizontal de 2 m e vertical de 1,5 m do nível da água do curso d'água.

4.1.3 Parcela 1

Nessa sessão, encontra-se os cálculos do dimensionamento das tubulações das linhas laterais, de derivação e os materiais para as respectivas linhas da Parcela 1.

Tabela 20 - Dados da Linha Lateral

LINHA LATERAL		
Dados	Valor	Unidade
Comprimento da linha	183	m
Declive do terreno	0,5	%
Espaçamento entre aspersores	12 x 18	m
Pressão de serviço do aspersor (PS)	25	mca
Vazão do aspersor (Q)	3,66	m ³ /h
Intensidade de aplicação de água (I)	16,94	mm/h
Número de linhas laterais	7	Un

Fonte: (Autoria Própria, 2024)

Tabela 21 - Dimensionamento do diâmetro da Linha Lateral

CÁLCULO PARA A DETERMINAÇÃO DO DIÂMETRO		
Dados	Valor	Unidade
Variação na altura do início ao final da linha (Δz)	0,915	m
Perda de carga permissível (h_f)	5,915	m
Número de aspersores (N)	15	Pc
Fator de correção (f)	0,385	-
Perda de carga permissível corrigida (h'_f)	15,367	m
Perda de carga linear (j)	0,084	m/m
Vazão na linha lateral (Q_{LL})	0,015	m ³ /s
Diâmetro da linha lateral (D_{LL})	84,15	mm
Diâmetro Comercial Adotado = 100mm		

Fonte: (Autoria Própria, 2024)

Tabela 22 - Pressão no Início das Linhas Laterais

PRESSÃO NO INÍCIO DAS LINHAS LATERAIS		
Dados	Valor	Unidade
Pressão no início da linha lateral (P_{IN})	30,978	mca

Fonte: (Autoria Própria, 2024)

Tabela 23 - Materiais para a Linha Lateral

MATERIAIS PARA A LINHA LATERAL		
Materiais	Quantidade	Unidade
Tubo PVC para cada linha lateral	31	PC
Tubo PVC para toda a Parcela	217	PC
Derivação com bucha de redução	105	PC
Tubo de subida	105	PC
Cap	7	PC

Fonte: (Autoria Própria, 2024)

Tabela 24 - Materiais Encontrados no Mercado para a Linha Lateral

COMERCIAL		
Materiais	Medidas	Unidade
Tubo PVC	6	m
Derivação	100	mm
Bucha de redução	50	mm
Cap	100	mm
Tubo de subida	2	m

Fonte: (Autoria Própria, 2024)

Tabela 25 - Dados da Linha de Derivação

LINHA DE DERIVAÇÃO		
Dados	Valor	Unidade
Coprimento da linha	108	m
Aclive do terreno	1,5	%
Número de linhas laterais atendidas	7	Un

Fonte: (Autoria Própria, 2024)

Tabela 26 - Dimensionamento do diâmetro da Linha de Derivação

CÁLCULO PARA A DETERMINAÇÃO DO DIÂMETRO		
Dados	Valor	Unidade
Variação na altura do início ao final da linha (Δz)	1,62	m
Perda de carga permitível (h_f)	2,13	mm
Perda de carga linear (j)	0,019	m/m
Vazão na linha de derivação (Q_{LD})	0,108	m ³ /s
Diâmetro da linha de derivação (D_{LD})	238,92	mm
Diâmetro Comercial Adotado = 250 mm		

Fonte: (Autoria Própria, 2024)

Tabela 27 - Materiais para a Linha de Derivação

MATERIAIS PARA A LINHA DE DERIVAÇÃO		
Materiais	Quantidade	Unidade
Tubo PVC para a linha de derivação da parcela	18	PC
Derivação saída fêmea para cada lateral	7	PC
Cap	1	PC

Fonte: (Autoria Própria, 2024)

Tabela 28 - Materiais Encontrados no Mercado para a Linha de Derivação

COMERCIAL		
Materiais	Medida	Unidade
Tubo PVC	6	m
Derivação de saída fêmea	250 x 100	mm
Cap	250	mm

Fonte: (Autoria Própria, 2024)

4.1.4 Parcela 2

Nessa sessão, encontra-se os cálculos do dimensionamento das tubulações das linhas laterais, de derivação e os materiais para as respectivas linhas da Parcela 2.

Tabela 29 - Dados da Linha Lateral

LINHA LATERAL		
Dados	Valor	Unidade
Comprimento da linha	189	m
Declive do terreno	0,5	%
Espaçamento entre aspersores	12 x 18	m
Pressão de serviço do aspersor (PS)	25	mca
Vazão do aspersor (Q)	3,66	m ³ /h
Intensidade de aplicação de água (I)	16,94	mm/h
Número de linhas laterais	11	Un

Fonte: (Autoria Própria, 2024)

Tabela 30 - Dimensionamento do Diâmetro da Linha Lateral

CÁLCULO PARA A DETERMINAÇÃO DO DIÂMETRO		
Dados	Valor	Unidade
Varição na altura do início ao final da linha (Δz)	0,945	m
Perda de carga permissível (h_f)	5,945	m
Número de aspersores (N)	16	PC
Fator de correção (f)	0,383	-
aPerda de carga permissível corrigida (h'_f)	15,533	M
Perda de carga linear (j)	0,082	m/m
Vazão na linha lateral (Q_{LL})	0,016	m ³ /s
Diâmetro da linha lateral (D_{LL})	87,16	mm
Diâmetro Comercial Adotado = 100mm		

Fonte: (Autoria Própria, 2024)

Tabela 31 - Pressão no Início das Linhas Laterais

PRESSÃO NO INÍCIO DAS LINHAS LATERAIS		
Dados	Valor	Unidade
Pressão no início da linha lateral (P_{IN})	30,986	mca

Fonte: (Autoria Própria, 2024)

Tabela 32 - Materiais para a Linha Lateral

MATERIAIS PARA A LINHA LATERAL		
Materiais	Quantidade	Unidade
Tubo PVC para cada linha lateral	32	PC
Tubo PVC para toda a Parcela	352	PC
Derivação com bucha de redução	176	PC
Tubo de subida	176	PC
Cap	11	PC

Fonte: (Autoria Própria, 2024)

Tabela 33 - Materiais Encontrados no Mercado para a Linha Lateral

COMERCIAL		
Materiais	Medidas	Unidade
Tubo PVC	6	m
Derivação	100	mm
Bucha de redução	50	mm
Cap	100	mm
Tubo de subida	2	m

Fonte: (Autoria Própria, 2024)

Tabela 34 - Dados da Linha de Derivação

LINHA DE DERIVAÇÃO		
Dados	Valor	Unidade
Coprimento da linha	204	m
Aclive do terreno	1,5	%
Número de linhas laterais atendidas	11	Un

Fonte: (Autoria Própria, 2024)

Tabela 35 - Dimensionamento do diâmetro da Linha de Derivação

CÁLCULO PARA A DETERMINAÇÃO DO DIÂMETRO		
Dados	Valor	Unidade
Varição na altura do início ao final da linha (Δz)	3,06	m
Perda de carga permissível (h_f)	6,81	mm
Perda de carga linear (j)	0,033	m/m
Vazão na linha de derivação (Q_{LD})	0,179	m ³ /s
Diâmetro da linha de derivação (D_{LD})	260	mm
Diâmetro Comercial Adotado = 300 mm		

Fonte: (Autoria Própria, 2024)

Tabela 36 - Materiais para a Linha de Derivação

MATERIAIS PARA A LINHA DE DERIVAÇÃO		
Materiais	Quantidade	Unidade
Tubo PVC para a linha de derivação da parcela	34	PC
Derivação saída fêmea para cada lateral	11	PC
Cap	1	PC

Fonte: (Autoria Própria, 2024)

Tabela 37 - Materiais Encontrados no Mercado para a Linha de Derivação

COMERCIAL		
Materiais	Medida	Unidade
Tubo PVC	6	m
Derivação de saída fêmea	300 x 100	mm
Cap	300	mm

Fonte: (Autoria Própria, 2024)

Tabela 38 - Dados da Linha Principal

LINHA PRINCIPAL		
Dados	Valor	Unidade
Comprimento da linha	138	m
Velocidade de escoamento adotada (V)	2	m/s
Vazão da linha (Q)	0,18	m ³ /s
Diâmetro da linha principal (D_{LP})	338	mm
Diâmetro Comercial Adotado = 350 mm		

Fonte: (Autoria Própria, 2024)

Tabela 39 - Materiais para a Linha de Principal

MATERIAIS PARA A LINHA PRINCIPAL		
Materiais	Quantidade	Unidade
Tubo PVC para a linha principal	23	PC

Fonte: (Autoria Própria, 2024)

Tabela 40 - Dados da Linha de Sucção

LINHA DE SUCCÃO		
Dados	Valor	Unidade
Velocidade de escoamento adotada (V)	1,5	m/s
Vazão da linha (Q)	0,18	m ³ /s
Diâmetro da linha principal (D_{LS})	390	mm
Diâmetro Comercial Adotado = 400 mm		

Fonte: (Autoria Própria, 2024)

4.1.5 Parcela 3

Nessa sessão, encontra-se os cálculos do dimensionamento das tubulações das linhas laterais, de derivação e os materiais para as respectivas linhas da Parcela 3.

Tabela 41 - Dados da Linha Lateral

LINHA LATERAL		
Dados	Valor	Unidade
Comprimento da linha	158	m
Declive do terreno	0,5	%
Espaçamento entre aspersores	12 x 18	m
Pressão de serviço do aspersor (PS)	25	mca
Vazão do aspersor (Q)	3,66	m ³ /h
Intensidade de aplicação de água (I)	16,94	mm/h
Número de linhas laterais	11	Un

Fonte: (Autoria Própria, 2024)

Tabela 42 - Dimensionamento do Diâmetro da Linha Lateral

CÁLCULO PARA A DETERMINAÇÃO DO DIÂMETRO		
Dados	Valor	Unidade
Varição na altura do início ao final da linha (Δz)	0,79	m
Perda de carga permissível (h_f)	5,79	m
Número de aspersores (N)	13	PC
Fator de correção (f)	0,390	-
aPerda de carga permissível corrigida (h'_f)	14,836	m
Perda de carga linear (j)	0,094	m/m
Vazão na linha lateral (Q_{LL})	0,013	m ³ /s
Diâmetro da linha lateral (D_{LL})	78,37	mm
Diâmetro Comercial Adotado = 100mm		

Fonte: (Autoria Própria, 2024)

Tabela 43 - Pressão no Início das Linhas Laterais

PRESSÃO NO INÍCIO DAS LINHAS LATERAIS		
Dados	Valor	Unidade
Pressão no início da linha lateral (P_{IN})	30,947	mca

Fonte: (Autoria Própria, 2024)

Tabela 44 - Materiais para a Linha Lateral

MATERIAIS PARA A LINHA LATERAL		
Materiais	Quantidade	Unidade
Tubo PVC para cada linha lateral	26	PC
Tubo PVC para toda a Parcela	286	PC
Derivação com bucha de redução	143	PC
Tubo de subida	143	PC
Cap	11	PC

Fonte: (Autoria Própria, 2024)

Tabela 45 - Materiais Encontrados no Mercado para a Linha Lateral

COMERCIAL		
Materiais	Medidas	Unidade
Tubo PVC	6	m
Derivação	100	mm
Bucha de redução	50	mm
Cap	100	mm
Tubo de subida	2	m

Fonte: (Autoria Própria, 2024)

Tabela 46 - Dados da Linha de Derivação

LINHA DE DERIVAÇÃO		
Dados	Valor	Unidade
Coprimento da linha	204	m
Aclive do terreno	1,5	%
Número de linhas laterais atendidas	11	Un

Fonte: (Autoria Própria, 2024)

Tabela 47 - Dimensionamento do diâmetro da Linha de Derivação

CÁLCULO PARA A DETERMINAÇÃO DO DIÂMETRO		
Dados	Valor	Unidade
Variação na altura do início ao final da linha (Δz)	3,06	m
Perda de carga permisível (h_f)	6,81	mm
Perda de carga linear (j)	0,033	m/m
Vazão na linha de derivação (Q_{LD})	0,145	m ³ /s
Diâmetro da linha de derivação (D_{LD})	240	mm
Diâmetro Comercial Adotado = 250 mm		

Fonte: (Autoria Própria, 2024)

4.2 DETERMINAÇÃO DA ALTURA MANOMÉTRICA E SELEÇÃO DO CONJUNTO MOTO BOMBA

Tabela 48 - Cálculo da Altura Manométrica

DETERMINAÇÃO DA ALTURA MANOMÉTRICA (PARCELA II)		
Dados	Valor	Unidade
Pressão no início da linha lateral (P_{IN})	30,986	mca
Perda de carga na linha de derivação (HFD)	6,81	mca
Diferença de nível ao longo da linha de derivação (DND)	3,06	m
Perda de carga na linha principal (HFP)	1,08	mca
Diferença de nível ao longo da linha principal (DNP)	0,69	m
Perda de carga na linha de sucção (HFS)	0,014	mca
Diferença de nível ao longo da linha de sucção (DNS)	1,5	m
Perdas localizadas (HFL)	10	mca
Altura manométrica (HM)	54,14	m

Fonte: (Autoria Própria, 2024)

Tabela 49 - Dimensionamento da Potência do Conjunto Moto-bomba

DETERMINAÇÃO DA POTÊNCIA DO CONJUNTO MOTOBOMBA		
Dados	Valor	Unidade
Vazão	180	L/s
Rendimento da bomba	75	%
Rendimento do motor	90	%
Potência do conjunto motobomba (P_{mb})	192,5	CV
Potência do conjunto Motobomba com margem de segurança (P_{mbs})	211,76	CV

Fonte: (Autoria Própria, 2024)

Como consta na Tabela 62, para um dimensionamento seguro e eficaz, será adotado um motor de potência comercial de 250 CV.

4.3 DETERMINAÇÃO DO MANEJO DE IRRIGAÇÃO

Tabela 50 - Determinação do Manejo da Irrigação

DETERMINAÇÃO DO MANEJO DE IRRIGAÇÃO		
Dados	Valor	Unidade
Lâmina líquida máxima de irrigação (L_{lm})	50,4	mm
Necessidade de irrigação líquida máxima da cultura (N_{lm})	4,71	mm/dia
Frequência máxima de irrigação ($F_{máx}$)	4,2	Dias
Eficiência da irrigação (E_f)	61,75	%
Fração da água de lixiviação (LR)	0,087	-
Lâmina bruta máxima de irrigação (L_b)	81,62	mm
Necessidade de irrigação bruta no período de máxima demanda (N_{bm})	7,62	mm/dia
Tempo de aplicação da água no solo (T)	4,81	Horas

Fonte: (Autoria Própria, 2024)

Logo, de acordo com a Tabela 63, pode-se destacar que a cada cinco dias será realizada a aplicação de 81,62 mm de água (lâmina bruta). Como o aspersor selecionado tem uma intensidade de aplicação de 16,94 mm/h, será gasto por volta de 5 horas de irrigação para aplicar a lâmina d'água necessária.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Portanto, conclui-se o presente trabalho exercendo o fato da metodologia empregada ser funcional e responder ao estudo de caso. Obteve-se por meio dos resultados um dimensionamento onde a tubulação da Parcela 2 teve seu maior diâmetro em relação as outras. Devido a isso, teve sua altura manométrica utilizada como referência, assim, sendo por consequência a pior situação para a bomba atender. Logo, por lógica, atendendo ao pior “cenário”, as outras parcelas não serão um impasse para o conjunto dimensionado.

6 REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 5647: **Tubos de PVC rígido com junta elástica**. Rio de Janeiro, 1999.

AZEVEDO NETTO J. M. A. et al. Manual de Hidráulica. 8. ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda. 1998, 669p.

BERNARDO, S.; SOARES, A.A.; MANTOVANI, E.C. Manual de irrigação. 7.ed. Viçosa, MG: Ed. UFV, 2005. 611p.

CAMARGO, A. P. Balanço hídrico no Estado de São Paulo. 3. ed. Campinas: IAC, 1971. 24 p. (Boletim, 116).

CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo. Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.

CEMIG- COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS. Estudo de otimização energética. Belo Horizonte: CEMIG. 1993. 22p.

CENGEL YUNUS A.; CIMBALA, J. M. **Mecânica dos fluidos: fundamentos e aplicações**. [S.l.]: São Paulo, SP: McGraw-Hill, Bookman, AMGH, 2007.

CLEMENT, R.; GALANT, A. El Riego por Aspersión. Barcelona: Editores Técnicos Asociados, S.A., 1986.

COLETTI, C.; TESTEZLAF, R. ; RIBEIRO, T. A. P. ; SOUZA, R. T. G. ; PEREIRA, D. A. Water quality index using multivariate factorial analysis. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 14, p. 517-522, 2010.

CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Pesquisa de Safras e Informações Geográficas da Agricultura Brasileira. Disponível em: <

<http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1534&t=2>> Acesso em 15 de outubro

FOX, R. W.; MCDONALD, A. T. **Introdução a mecânica dos fluidos**. 4. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons Inc, 1998.

GOMES, H. P. Engenharia de irrigação: Hidráulica dos Sistemas Pressurizados, Aspersão e Gotejamento. 3. ed. Campina Grande. UFPB. 1999. 421 p.

GOMES, H. P. Sistemas de Irrigação: Eficiência Energética. UFPB. 2013. 281 p.

KLAR, A. E. Irrigação: frequência e quantidade. São Paulo, SP: Nobel, 1991. v. 1. 156p

MALISKA, C. R. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional**. 2. ed.[S.l.]: Rio de Janeiro: LTC, 2010.

MANTOVANI, E.C.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L. F. Irrigação: princípios e métodos. 3. ed. atual. Viçosa, MG: Ed. UFV, 2009. 355p.

PENMAN, H. L. Natural evaporation from open water, bare soil, and grass. Proceedings of the Royal Society, London, GB, v. 193, p. 120-146, 1948.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas. Piracicaba: Agropecuária, 2002. 478 p.

PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDIYAMA, G. C. Evapo(transpi)ração. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183 p

REICHARDT, K. A água em sistemas agrícolas. São Paulo: Manole, 1987. 188 p.

REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; BRAIDA, J.A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência & Ambiente**. v. 27, p. 29-48, 2003.

TESTEZLAF, R. **Engenharia de Irrigação: Tubos e Acessórios**. Campinas, SP.: Unicamp/FEAGRI. 2015.

TESTEZLAF, R. **Irrigação: Métodos, sistemas e aplicações**. Campinas, SP.: Unicamp/FEAGRI. 2017.

THORNTHWAITE, C. W. An approach toward a rational classification of climate. *Geographic Review*, New York, v. 38, p. 55-94, 1948.