

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO SUCKOW DA FONSECA
(CEFET/RJ)
Engenharia Mecânica

Blessed Henry Kwabi

**DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA INTEGRADO DE PURIFICAÇÃO DE ÁGUAS
RESIDUAIS: APLICAÇÃO EM ÁREAS AFETADAS PELA MINERAÇÃO ILEGAL EM
GANA**

Orientador: Carlos Eduardo Guedes Catunda

Rio de Janeiro
10/07/2025

Blessed Henry Kwabi

**DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA INTEGRADO DE PURIFICAÇÃO DE ÁGUAS
RESIDUAIS: APLICAÇÃO EM ÁREAS AFETADAS PELA MINERAÇÃO ILEGAL EM
GANA**

Rio de Janeiro

10/07/2025

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

K98 Kwabi, Blessed Henry
Desenvolvimento de sistema integrado de purificação de águas
residuais: aplicação em áreas afetadas pela mineração ilegal em
Gana / Blessed Henry Kwabi – 2025.
xvi, 131f.: il. (algumas color.). + anexo , enc.

Projeto Final (Graduação). Centro Federal de Educação
Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2025.
Bibliografia: f. 128-131.
Orientador: Carlos Eduardo Guedes Catunda.

1. Engenharia mecânica. 2. Água – Purificação.
3. Água – Desinfecção 4. Sustentabilidade e meio
ambiente – Inovações tecnológicas. I. Catunda, Carlos
Eduardo Guedes (Orient.). II. Título.

CDD 620.1

Dedico, em primeiro lugar, a Deus, fonte de toda sabedoria, direção e força. Foi a Sua mão que me sustentou e me conduziu até aqui.

À minha querida esposa, Salomey Kwabi, pelo amor, apoio constante e por caminhar ao meu lado com fé e coragem. E ao nosso filho que está para nascer, que já enche o meu coração de esperança e propósito.

À minha mãe, Dorcas Awuah, exemplo de luta, oração e dedicação. Ao meu saudoso pai, Richard Awuah Kwabi, cuja memória e esforço continuam vivos em mim — vocês obedeceram ao chamado de Deus e, com sacrifício e amor, me trouxeram ao Brasil para uma nova oportunidade de vida.

À minha irmã, Lovina Yaa Kwabi, por todo o apoio, incentivo e presença constante em minha caminhada.

E ao meu orientador, Carlos Catunda, por sua paciência, orientação e confiança durante o desenvolvimento deste trabalho. Sua dedicação como educador foi essencial para a realização deste projeto.

A todos vocês, minha eterna gratidão.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, fonte de toda sabedoria, força e graça. Foi Ele quem me sustentou nos momentos mais difíceis e me guiou até aqui. A Ele toda a glória!

À minha amada esposa, por todo apoio, paciência, amor e companheirismo durante essa jornada. Sua presença me fortalece diariamente, e sou grato por caminhar ao seu lado.

Ao meu orientador, pela dedicação, orientações valiosas e por acreditar no meu potencial. Sua contribuição foi essencial para a realização deste trabalho.

Ao meu querido pai (in memoriam), que não só me deu a vida, mas também abriu os caminhos para que eu viesse ao Brasil em busca de um futuro melhor. A sua memória é uma das minhas maiores inspirações.

À minha mãe, mulher de fé e coragem, e à minha irmã, que estiveram sempre comigo, mesmo à distância, com palavras de apoio e orações. Vocês são pilares na minha vida.

A todos os meus familiares e aos amigos incríveis que conheci ao longo da faculdade — cada conversa, incentivo, risada e desafio compartilhado foram fundamentais para essa conquista.

A todos vocês, meu sincero **muito obrigado**.

“Onde há fé, há fonte. Onde há fonte, há futuro. A água limpa é promessa e missão — tanto divina quanto humana e assim como Deus transforma águas amargas em doces, a ciência transforma contaminação em vida — purificar é mais que técnica, é esperança em movimento.”

RESUMO

Este trabalho de conclusão de curso apresenta o desenvolvimento de um sistema integrado de purificação de água, projetado para tratar águas superficiais contaminadas pela mineração ilegal (conhecida como *galamsey*) em Gana. O sistema proposto combina diversas tecnologias de tratamento, incluindo coagulação e floculação naturais com sementes de *Moringa oleifera*, seguidas de filtração em areia, adsorção por carvão ativado, ozonização e radiação ultravioleta. O projeto baseia-se em uma análise abrangente que inclui o dimensionamento de bombas, cálculos de perda de carga utilizando as equações de Darcy-Weisbach e Churchill, e comparação entre diferentes configurações de filtração. Um estudo de caso realizado em um bioparque brasileiro foi utilizado como referência, onde uma bomba de 0,5 CV abastece um reservatório de 15.000 litros, permitindo avaliações comparativas de desempenho. O sistema proposto foi adaptado para atender comunidades com menos de 1.000 habitantes, garantindo eficiência energética, baixo custo operacional e viabilidade técnica. O projeto inclui diagramas elaborados em AutoCAD, estudos de viabilidade econômica e uma análise dos impactos sociais e ambientais. Além disso, são discutidos os desafios relacionados à obtenção de amostras, modularidade do sistema e sua implementação em áreas remotas. Este trabalho contribui para a aplicação de tecnologias sustentáveis em regiões afetadas pela degradação ambiental, com o objetivo de reduzir riscos à saúde e promover o acesso à água potável.

Palavras-chave: Tratamento de água, Mineração ilegal, Ozonização, Desinfecção por UV, *Moringa oleifera*, Perda de carga, Engenharia sustentável.

ABSTRACT

This final project presents the development of an integrated water purification system designed to treat surface waters contaminated by illegal mining (known as *galamsey*) in Ghana. The proposed system combines multiple treatment technologies, including natural coagulation and flocculation using *Moringa oleifera* seeds, followed by sand filtration, activated carbon adsorption, ozonation, and ultraviolet radiation. The design is based on a comprehensive analysis involving pump sizing, head loss calculations using Darcy-Weisbach and Churchill equations, and comparison of different filtration configurations. A case study conducted in a Brazilian biopark was used as a benchmark, where a 0.5 HP pump supplies a 15,000-liter tank, allowing comparative performance evaluations. The proposed system was tailored to supply potable water to communities of less than 1,000 inhabitants, ensuring energy efficiency, low-cost operation, and technical viability. The project includes AutoCAD diagrams, economic feasibility studies, and an assessment of the social and environmental impacts. Additionally, the challenges related to sample acquisition, system modularity, and implementation in remote areas were discussed. This work contributes to the application of sustainable technologies in regions affected by environmental degradation, aiming to reduce health risks and promote access to safe water.

Keywords: Water treatment, Illegal mining, Ozonation, UV disinfection, *Moringa oleifera*, Head loss, Sustainable engineering.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Os tipos de Bombas	11
Figura 2 – Bomba Centrífuga	12
Figura 3 – Diagrama de Moody - Rouse	23
Figura 4 – Coeficiente de Atrito para Escoamento Completamente Turbulento	24
Figura 5 – Perdas de cargas localizadas em conexões.	25
Figura 6 – Curva de Sistema	32
Figura 7 – Ponte de Trabalho	33
Figura 8 – Altura Manométrica (curva Head) x (Vazão)	34
Figura 9 – Curva Potência Absorvida x Vazão	35
Figura 10 – Curva Eficiência x Vazão	36
Figura 11 – Curva de NPSH Requerido x Vazão	37
Figura 12 – Imagem ilustrativa da bomba de captação	60
Figura 13 – As curvas de característica da bomba 1 e 2 da captação	61
Figura 14 – Esquema de automação do processo de coagulação e floculação	66
Figura 15 – Imagem ilustrativa do filtro de areia e filtro de carvão ((2025),)	70
Figura 16 – Legenda	72
Figura 17 – Imagem ilustrativa do Painel do O3. ((Tecnologia...,))	73
Figura 18 – Tubulação de instalação do O3	74
Figura 19 – Imagem ilustrativa da bomba de filtragem	82
Figura 20 – Curva de característica da bomba de filtragem	84
Figura 21 – Comparação entre as fórmulas de fator de atrito	93
Figura 22 – Preparação do coagulante.	102
Figura 23 – Filtração do coagulante e amostra da água do rio	103
Figura 24 – Configurações de Sedimentação com Diferentes Concentrações de Coagulante de Moringa, Cal e Sem Coagulante.	105
Figura 25 – Montagens para Filtração com Areia	106
Figura 26 – Montagens para filtração com Carvão Ativado	108
Figura 27 – Fluxograma da Captação	136
Figura 28 – Fluxograma do processo de filtragem	137
Figura 29 – Imagem ilustrativa do sistema completo no AutoCad	137
Figura 30 – Captação da água do Rio	138
Figura 31 – Tanque 1 onde acontecerá o processo de coagulação e floculação	138
Figura 32 – Imagem do processo da filtragem	139
Figura 33 – Imagem com o prefiltro dentro da água	140
Figura 34 – imagem do filtro de areia em cinza e carvão em azul	141
Figura 35 – Imagem dos filtros UV	141
Figura 36 – Imagem e tubulação do painel do ozônio	142

Figura 37 – Imagem das tubulação do ozônio do estudo de caso no Bioparque . . .	143
Figura 38 – Imagem do Sistema geral 1	144
Figura 39 – Imagem do sistema geral 2	145
Figura 40 – Imagem das tubulações	146
Figura 41 – Imagem geral com os filtros de areia, uv e o painel de ozônio	147
Figura 42 – (Boachie-Yiadom, 2025)Imagem da Situação atual do Rio Bonsa	148
Figura 43 – (Boachie-Yiadom, 2025)Água buscado do Rio Bonsa	149
Figura 44 – Cálculo de perdas de carga na sucção no Voima Toolbox usando Darcy-Weisbach	149
Figura 45 – Calculo de perda de carga na sucção no Voima Toolbox usando Darcy-Weisbach	150
Figura 46 – Calculo de perda de carga na sucção no voima toolbox usando Hazen-Williams	150
Figura 47 – Calculo de perda de carga no recalque no vioma toolbox usando Hazen-Williams	150
Figura 48 – Calculo de perdas de carga no voima toolbox usando o Fair-Whipple . .	151
Figura 49 – Interface do Software KSB EasySelect	151
Figura 50 – Interface da seção geral do software KSB EasySelect	152
Figura 51 – Seleção do produto com os dados no KSB EasySelect	152
Figura 52 – Cálculo de perdas de carga no recalque no Voima Toolbox usando Darcy-Weisbach	153
Figura 53 – Cálculo de perdas de carga na sucção no Voima Toolbox usando Hazen-Williams	153
Figura 54 – Cálculo de perdas de carga no recalque no Voima Toolbox usando Hazen-Williams	154
Figura 55 – Cálculo de perdas de carga no Voima Toolbox usando Fair-Whipple . . .	154

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Comparação de Perda de carga da bomba de captação da água do rio	56
Gráfico 2 – Curva do sistema do rio ao Tanque 1	57
Gráfico 3 – Comparação de perda de carga das bombas de filtração	81
Gráfico 4 – Curva do sistemas para filtragem	82
Gráfico 5 – Perfis de Altura de Sedimentação para Diferentes Concentrações dos Coagulantes Moringa e Cal em Comparação com Água Não Tratada ao Longo do Tempo.	110
Gráfico 6 – Variação do pH nas Diferentes Etapas do Tratamento para Cada Tipo de Coagulante Testado.	112
Gráfico 7 – Teste de remoção da turbidez após as filtrações de limão.	114
Gráfico 8 – Etapas da eficiência de purificação	116

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Coeficiente de Farnant	18
Tabela 2 – Coeficiente de Hazen -Williams	19
Tabela 3 – Coeficiente de Hazen-Williams (Material e tempo de uso)	20
Tabela 4 – Rugosidade de parede do tubo	22
Tabela 5 – Valores de K de acordo com a peça	27
Tabela 6 – Valores de Pressão de Vapor e peso da água em função da temperatura	41
Tabela 7 – Pressão Atmosférica	42
Tabela 8 – Dados Técnicos do Sistema Existente no Bioparque	43
Tabela 9 – Comparação dos resultados d'água após passar pelo ozônio e UV . . .	45
Tabela 10 – Parâmetros da Sucção	53
Tabela 11 – Parâmetros do recalque	54
Tabela 12 – Comparação das perdas de carga calculadas por diferentes métodos da bomba de captação do rio	55
Tabela 13 – Parâmetros da bomba de captação	60
Tabela 14 – Perda de carga Estimadas por linha	70
Tabela 15 – Perda de carga Estimada do UV	72
Tabela 16 – Perda de carga do sistema do painel do ozônio	75
Tabela 17 – Parâmetros Gerais do sistema	75
Tabela 18 – Trecho de Sucção	76
Tabela 19 – Trecho do Recalque	76
Tabela 20 – Parâmetros da sucção Filtragem	78
Tabela 21 – Parâmetros do recalque Filtragem	79
Tabela 22 – Perda de carga dos filtros	79
Tabela 23 – Comparação das perdas de carga calculadas por diferentes métodos da bomba de filtração.	81
Tabela 24 – Parâmetros operacionais da bomba centrífuga selecionada	83
Tabela 25 – Comparação entre os métodos de fator de atrito	92
Tabela 26 – Teste das fórmulas de fatore de atrito	92
Tabela 27 – Descrição comparativa dos sistemas dos casos	94
Tabela 28 – Comparação Técnica	98
Tabela 29 – Comparativo: Mercado x Engenheiro x Literatura	119
Tabela 30 – textbfPlano de Manutenção Preventiva do Sistema	133
Tabela 31 – textbfAnálise de Risco e Plano de Contingência	133
Tabela 32 – textbfEstudo Econômico Simplificado (USD e GHS)	134

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
BEP	Best Efficiency Point
BRL	Real Brasileiro
CV	Cavalo-Vapor
EPA	Environmental Protection Agency
GM/MS	Gabinete do Ministro, Ministério da Saúde
HMT	Altura Manométrica Total
HP	Horse Power
IA	Inteligencia Artificial
ISO	International Organization for Standardization, ou Organização Internacional para Padronização, em português
KOH	Hidróxido de potássio
NBR	Norma Brasileira
NPSH	termo em língua inglesa Net Positive Suction Head
O ₃	Ozônio
OH	HIDROXILO
OMS	Organização Mundial da Saúde
ONU	Organização das Nações Unidas
O	Fórmula Química do Ozônio
PVC	Policloreto de Polivinila
Re	Número de Reynolds
UMaT	University of Mines and Technology (Univversidade de Minerais e Tecnologia
UMaT	University of Mines and Technology (Univversidade de Minerais e Tecnologia
UNICEF	Fundo das Nações Unidas para Infância

US	Ultrassonografia
USD	Dólares Americanos
UV	Radiação Ultravioleta
UVC	Radiação Ultravioleta tipo C
WHO	World Health Organization (Organização Mundial de Saúde)
°C	Graus Célsius

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Motivação	2
1.2	Objetivo	2
1.3	Objetivo Específico	3
1.4	Estrutura do Projeto	4
2	REVISÃO TEÓRICA	5
2.1	Filtração, Ozônio e UV no Tratamento de Águas	6
2.2	Filtros de Areia e Carvão Ativado	8
3	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	11
3.1	Tipos e Classificação das Bombas	11
3.1.1	Princípios de funcionamento das Bombas Centrífugas	12
3.2	Conceitos Essenciais da Mecânica dos Fluidos	13
3.2.1	Classificação dos regimes de escoamento	13
3.2.1.1	<i>Tipos de Escoamento</i>	13
3.2.2	Número de Reynolds e Influência na Perda de Carga	14
3.2.3	Aplicação do Teorema de Bernoulli em sistemas de bombeamento	14
3.3	Elementos Fundamentais de um sistema hidráulico	15
3.3.1	Relação entre vazão, velocidade e diâmetro do sistema	15
3.3.2	Perdas de Carga do Sistema	16
3.3.2.1	Cálculo das Perdas de Carga Distribuídas e Localizadas	17
3.3.2.2	Fórmulas para Perda de Carga Distribuídaa)	17
3.3.2.2.1	Métodos de cálculo para perdas de carga localizada	25
3.3.3	Altura manométrica total do sistema: definição e cálculo	28
3.3.3.1	<i>Altura Estática</i>	28
3.3.3.2	<i>Altura Dinâmica</i>	28
3.3.4	Construção da curva do sistema e ponto de operação	30
3.3.4.1	<i>Procedimento para Obtenção da Curva do Sistema</i>	30
3.3.4.2	<i>Determinação do Ponto de Trabalho</i>	32
3.4	Curvas Características das Bombas	33
3.4.1	Relação entre altura manométrica e vazão	34
3.4.2	Potência absorvida pela bomba em função da vazão	35
3.4.3	Eficiência da bomba e seu comportamento operacional	35
3.4.4	Curva NPSH Requerido x Vazão	36
3.5	Fatores que influenciam as Curvas Características	37
3.5.1	<i>Variação do Diâmetro do Rotor</i>	37

3.5.2	<i>Variação da Rotação do Rotor</i>	38
3.5.3	<i>Variação nas Propriedades do Fluido</i>	38
3.5.4	<i>Ponto de Melhor Eficiência (BEP – Best Efficiency Point)</i>	39
3.6	Seleção e Operação de Bombas	39
3.6.1	<i>Critérios para escolha da bomba ideal para cada aplicação</i>	39
3.6.2	<i>Modos de operação e ajustes para eficiência energética</i>	40
3.6.3	<i>Fenômeno da cavitação e análise do NPSH disponível</i>	40
4	METODOLOGIA	43
	Considerações Finais	44
4.1	Dimensionamento dos Filtros de Areia e Carvão Ativado	47
4.1.1	<i>Considerações sobre o Sistema de Retro lavagem dos Filtros</i>	47
4.1.2	<i>Dimensionamento do Sistema de Desinfecção por Ultravioleta (UV)</i>	47
4.1.3	<i>Dimensionamento do Sistema de Ozonização</i>	47
4.2	Considerações sobre a Operação Contínua do Sistema	48
4.2.1	<i>Perda de Carga no Sistema de Bombeamento</i>	48
4.2.2	<i>Cálculo da Altura Manométrica Total (Hm)</i>	49
4.2.3	<i>Cálculo do NPSH – Garantia de Operação sem Cavitação</i>	49
4.2.4	<i>Cálculo da Potência da Bomba</i>	50
4.3	Importância da Análise Comparativa	50
4.4	Cálculos Hidráulicos (Do Rio até o Tanque 1) Passo a Passo e Seleção de bomba	51
4.4.1	<i>Comparação entre métodos de cálculo de perda de carga</i>	54
4.4.2	Escolha da Bomba Utilizando o Software KSB EasySelect	57
4.4.3	<i>Por que o KSB EasySelect?</i>	58
4.4.4	<i>Como foi feita a seleção da bomba</i>	59
4.4.4.1	<i>Resultados Do Software Para Bomba De Captação</i>	60
4.4.4.2	<i>Importância da seleção correta</i>	62
4.4.4.3	Análise e Interpretação das Curvas da Bomba Selecionada	62
4.4.5	<i>Considerações sobre a Seleção de Bombas em Paralelo</i>	65
4.5	Automatização do Processo de Coagulação, Decantação e Extração da Água Clarificada	65
4.5.1	<i>Explicação do Esquema de Automação</i>	67
4.5.2	<i>Funcionamento resumido:</i>	68
4.6	Dimensionamento e seleção dos filtros	68
4.6.1	<i>Equipamentos Selecionados</i>	68
4.7	Dimensionamento e seleção das Bombas	75
4.7.1	<i>Cálculos Hidráulicos (Do tanque 1 até o reservatório final) Passo a Passo</i>	76
4.7.2	<i>Perdas de carga das 2 bombas usados na filtração para o reservatório final.</i>	80

4.7.3	<i>Seleção da Bomba para a Etapa de Filtragem e Enchimento do Reservatório Final</i>	82
4.7.3.1	<i>Análise e Interpretação das Curvas da Bomba Selecionada</i>	84
4.7.4	<i>Resumo das Curvas</i>	87
5	ANÁLISES DO SISTEMA	88
5.1	Análise Comparativa de Perda de Carga	88
5.1.1	<i>Justificativa da Escolha do Método de Darcy-Weisbach para o Cálculo da Perda de Carga</i>	88
5.1.1.1	<i>Análise Gráfica e Técnica dos Métodos</i>	89
5.1.2	<i>Justificativas Técnicas para a Escolha do Método de Darcy-Weisbach</i> . .	89
5.2	Justificativa da escolha da equação de Churchill	91
5.3	Análise comparativa com o Sistema do Bioparque	93
5.3.1	<i>Análise da parte mecânica</i>	94
5.3.2	<i>Estrutura de filtração</i>	95
5.3.3	<i>Sistema de desinfecção</i>	95
5.3.4	<i>Escalabilidade e robustez mecânica</i>	95
5.3.5	<i>Vantagens mecânicas do sistema proposto</i>	96
5.4	Análise comparativos com o Sistema que já utilizado em Gana . . .	96
5.4.1	<i>Sistemas de Tratamento de Água em Gana</i>	97
5.4.2	<i>Descrição do Sistema Proposto</i>	97
5.4.3	<i>Vantagens do Sistema Proposto</i>	98
5.5	Impactos Sociais e Sanitários Esperados	99
5.6	Testes feitos com o comportamento da água após passar pelo Coagulantes Naturais no Tratamento de Efluentes de Mineração	99
5.6.1	<i>Objetivos</i>	100
5.6.2	<i>Metodologia</i>	100
5.6.3	<i>Procedimento Experimental</i>	100
5.6.3.1	<i>Materiais Utilizados</i>	100
5.6.3.2	<i>Equipamentos e Aparelhos</i>	101
5.6.3.3	<i>Métodos</i>	101
5.6.3.4	<i>Filtragem de areia</i>	105
5.6.3.5	<i>Filtração com carvão ativada</i>	107
5.7	RESULTADOS E DISCUSSÃO	108
5.7.1	<i>Variações de pH</i>	110
5.7.2	<i>Avaliação da Remoção de Turbidez</i>	112
5.7.2.1	<i>Importância da Remoção de Turbidez</i>	112
5.7.2.2	<i>Principais Resultados</i>	113
5.7.3	<i>Resumo Geral do Sistema e Estrutura Hidráulica</i>	114

5.7.3.1	Resumo dos Cálculos Hidráulicos Captação (Rio → Tanque 1): Duas Bombas para Captação	114
5.7.3.2	Filtragem (Tanque 1 → Reservatório Final): Duas bombas para filtragem	115
5.7.3.3	Justificativa das Fórmulas Utilizadas	115
5.7.3.4	Discussões e Comparações Técnicas Eficiência Energética:	115
5.7.3.5	Desempenho dos Filtros:	116
5.7.3.6	Decisão Técnica sobre Vazão Menor na Filtragem:	116
5.7.3.7	Impactos Sociais e Expansão	116
5.8	CrITÉrios Técnicos, Mercado e Literatura na Escolha das Tecnologias	117
5.8.1	<i>Práticas do Mercado Atual</i>	117
5.8.2	Recomendações da Literatura Técnica e Científica	118
6	EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E IMPACTO SOCIAL	120
6.1	Eficiência Mecânica e Energética	120
6.2	Impacto Social e Ambiental	121
7	CONCLUSÃO	122
7.1	Síntese das principais métricas e resultados obtidos	122
7.2	Discussão dos Resultados	122
7.3	Contribuições Técnicas e Sociais	123
8	PROPOSTAS DE MELHORIAS FUTURAS	125
8.1	Tecnologias a serem integradas	125
8.2	Expansão do sistema para reúso e reúso agrícola	125
8.3	Sustentabilidade e educação ambiental	125
8.3.1	Implantação de uma Plantação de Moringa Próxima ao Rio Bonsa	126
8.4	Pesquisa e Inovação	126
	REFERÊNCIAS	128
	APÊNDICES	132
	ANEXOS	135

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de sistemas integrados para purificação de águas residuais em áreas afetadas pela mineração ilegal, como em Gana, é essencial para mitigar os impactos ambientais e de saúde pública gerados por essas atividades. “A mineração ilegal frequentemente resulta em contaminação das fontes hídricas, especialmente com metais pesados e outros produtos químicos, o que agrava ainda mais os problemas de poluição” (Marinho, 2023; Miranda, 2024). “Tecnologias como biorreatores de membrana (MBRs) e eletrocoagulação têm mostrado grande potencial na remoção de contaminantes, oferecendo alternativas mais sustentáveis e com custos reduzidos” (Santos et al., 2023; Fernandes et al., 2022). “Além disso, o uso de adsorventes alternativos, como resíduos agrícolas, se apresenta como uma solução eficaz para a remoção de poluentes específicos” (Baierle, 2018; Ribas & Silva, 2022). A implementação de tecnologias descentralizadas pode não apenas melhorar a qualidade da água, mas também contribuir para a recuperação de nutrientes e a geração de energia a partir das águas residuais (Machado et al., 2021; Azevedo & Cavalcanti, 2021). Assim, a integração de técnicas inovadoras e sustentáveis é crucial para enfrentar os desafios causados pela mineração ilegal e para a proteção dos recursos hídricos.

A pergunta central deste estudo é: como as tecnologias de filtração, ozonização e radiação UV podem ser integradas de forma eficaz no tratamento de águas residuais contaminadas por mineração ilegal ou materiais orgânicos, garantindo a remoção de contaminantes, otimizando o uso de energia e minimizando os impactos sociais e ambientais. A crescente contaminação das águas causada por atividades de mineração ilegal, como a ‘galamsey’ em Gana, tem gerado sérios impactos ambientais e problemas de saúde pública. A presença de metais pesados e outros contaminantes químicos e biológicos torna a água imprópria para consumo, comprometendo a qualidade de vida das comunidades locais e prejudicando os ecossistemas aquáticos.

Diante desse cenário alarmante, torna-se urgente desenvolver alternativas de tratamento de água que sejam eficazes, sustentáveis e adaptadas a contextos com infraestrutura limitada e recursos escassos. Este trabalho justifica-se pela necessidade de soluções práticas e tecnológicas capazes de assegurar o fornecimento de água potável e contribuir para a preservação ambiental.

Nesse contexto, a distribuidora nacional de água em Gana lançou um projeto especial para fomentar a inovação entre estudantes universitários, oferecendo a oportunidade de desenvolver propostas reais de sistemas de purificação de água para aplicação em comunidades afetadas pela contaminação hídrica. A proposta apresentada neste estudo é uma das contempladas por essa iniciativa, sendo desenvolvida com o apoio de estudantes da University of Mines and Technology (UMaT), que já realizam ações de limpeza de rios contaminados por metais pesados.

A etapa atual do projeto concentra-se na remoção de turbidez e de contaminantes orgânicos e patogênicos da água, por meio de tecnologias avançadas como filtração, ozonização e radiação UV. O foco está no dimensionamento de bombas e sistemas de filtração capazes de captar água de um dos rios contaminados e abastecer um reservatório de 150.000 litros, com o objetivo de fornecer água potável para uma comunidade de aproximadamente 800 a 900 habitantes no bairro de Bonsa, em Gana.

Adicionalmente, o estudo incluirá uma análise comparativa com um sistema já existente em um bioparque, que utiliza uma bomba de 1 CV para abastecer um reservatório de 15.000 litros. Essa comparação servirá como base para validar os cálculos e as soluções técnicas propostas, além de gerar recomendações de melhoria e replicabilidade.

1.1 Motivação

A água é um recurso essencial à vida e ao desenvolvimento socioeconômico. No entanto, a crescente degradação dos recursos hídricos causada pela mineração ilegal representa uma ameaça séria à saúde pública, à biodiversidade e à segurança hídrica de comunidades inteiras. A presença de contaminantes como metais pesados e matéria orgânica torna essas águas inutilizáveis, aumentando os riscos de doenças e comprometendo a sustentabilidade ambiental.

Este projeto nasce como resposta às necessidades urgentes de comunidades que enfrentam dificuldades no acesso à água limpa. A motivação é desenvolver um sistema de tratamento que seja eficaz, sustentável e replicável, com potencial de impactar diretamente a vida das populações vulneráveis. Ao aliar inovação tecnológica ao compromisso social, a proposta visa não apenas fornecer água potável, mas também gerar conhecimento, capacitação e modelos que possam ser aplicados em outras regiões com desafios semelhantes.

A parceria com a distribuidora nacional de água, por meio do projeto aberto aos estudantes universitários, fortalece o caráter prático e aplicável da proposta, ao mesmo tempo em que promove o envolvimento acadêmico com problemas reais e urgentes da sociedade.

1.2 Objetivo

Desenvolver e implementar um sistema integrado de tratamento de água, utilizando tecnologias avançadas como filtração, ozonização e radiação UV, com foco no dimensionamento de bombas e sistemas de filtração para atender à demanda da distribuidora nacional de água em Gana. O sistema proposto será projetado para captar água de um rio contaminado e tratá-la para abastecer um reservatório com capacidade de 150.000 litros, garantindo a distribuição de água potável para uma comunidade de aproximadamente 800

habitantes.

O objetivo secundário é realizar uma análise comparativa com o sistema existente em um bioparque, que utiliza uma bomba de 1 CV para abastecer um reservatório de 15.000 litros. Essa análise servirá para validar os cálculos e o dimensionamento proposto, além de oferecer recomendações para a melhoria do sistema do bioparque, caso necessário.

Adicionalmente, o projeto busca promover o uso de tecnologias sustentáveis e economicamente viáveis, contribuindo para a mitigação dos impactos ambientais da mineração ilegal, a preservação dos recursos hídricos e o fornecimento de água de qualidade às comunidades afetadas.

1.3 Objetivo Específico

- 1) Realizar a revisão bibliográfica sobre tecnologias avançadas de tratamento de água, com foco em filtração, ozonização e radiação UV, aplicáveis a contextos de contaminação severa por mineração ilegal.
- 2) Dimensionar bombas e sistemas de filtração, baseando-se em cálculos de vazão, altura manométrica, perdas de carga e eficiência energética, utilizando modelos matemáticos, como as equações de Darcy-Weisbach, Colebrook e Churchill. Usar a fórmula de K para perdas localizadas em válvulas, filtros e conexões.
- 3) Desenvolver curvas de desempenho para as bombas selecionadas e avaliar a melhor configuração de instalação (afogada, convencional ou outras) para otimizar o sistema.
- 4) Projetar o layout completo do sistema integrado de tratamento de água, utilizando ferramentas de desenho técnico, como AutoCAD, para apresentar uma solução viável e prática.
- 5) Comparar o sistema projetado para a empresa com o sistema existente em um bioparque, identificando melhorias no uso de uma bomba de 1 CV para abastecimento de um reservatório de 15.000 litros.
- 6) Propor melhorias no sistema do bioparque, caso sejam identificadas limitações de desempenho ou eficiência durante os cálculos e análises.
- 7) Desenvolver uma análise técnica e econômica detalhada sobre a viabilidade do sistema projetado, considerando os custos de implantação, operação, consumo de energia e benefícios sociais.
- 8) Testar e ajustar os parâmetros de projeto, considerando amostras locais de água, caso não seja possível obter amostras de Gana, para garantir que o sistema seja eficiente em diferentes condições.

- 9) Avaliar o impacto ambiental e os benefícios sociais da implementação do sistema, considerando a mitigação dos efeitos da contaminação por mineração ilegal e o fornecimento de água potável para a comunidade beneficiada.
- 10) Redigir e publicar um artigo científico com os resultados, desafios e soluções do projeto, visando disseminar o conhecimento e incentivar a aplicação de tecnologias similares em outras regiões afetadas.

1.4 Estrutura do Projeto

O projeto segue uma estrutura organizada em etapas bem definidas para garantir um desenvolvimento eficiente do sistema de purificação de águas residuais. A introdução apresentará a problemática central e a importância do tema, destacando os motivos que justificam a criação do sistema, além dos objetivos gerais e específicos. A revisão bibliográfica terá como foco a identificação das tecnologias mais recentes no tratamento de águas contaminadas, abordando processos como coagulação, floculação, filtração, ozonização e radiação UV.

A metodologia será dividida em três etapas principais. Primeiramente, será realizado o dimensionamento técnico do sistema, incluindo cálculos de vazão, perdas de carga e eficiência de bombas e filtros, utilizando equações reconhecidas, como Darcy-Weisbach e Churchill. Também será elaborado um modelo detalhado no AutoCAD para representar o sistema. Na segunda etapa, será conduzido um estudo de caso no Bioparque, avaliando o sistema de tratamento de água já em funcionamento e comparando suas tecnologias com as necessidades específicas do tratamento de águas contaminadas por mineração num barro chamado Bonsa em Gana. Essa análise permitirá adaptações e aprimoramentos no projeto. A terceira etapa envolverá experimentação prática, com coleta e análise de amostras de água contaminada, testes laboratoriais para ajustes do sistema. Os resultados serão analisados com base na eficiência do sistema, considerando os testes laboratoriais, o desempenho mecânico e energético e os impactos ambientais e sociais das soluções propostas.

A conclusão trará um panorama dos achados do estudo, destacando contribuições e sugestões para aprimoramentos futuros. Além disso, um artigo científico será elaborado para documentar os resultados e submetido para publicação. Para assegurar um desenvolvimento estruturado, as atividades serão organizadas em um cronograma detalhado, com reuniões periódicas para monitorar o progresso e realizar ajustes conforme necessário. Essa abordagem busca garantir que o sistema proposto seja tecnicamente eficiente e contribua positivamente para a mitigação dos impactos da contaminação da água por mineração.

2 REVISÃO TEÓRICA

Nos últimos anos, avanços significativos no tratamento de águas residuais têm sido alcançados por meio da aplicação de Processos Avançados de Oxidação (AOPs). Esses processos utilizam oxidantes altamente reativos, como os radicais hidroxila, para decompor poluentes orgânicos persistentes de forma eficiente. Segundo (HAMMAM, 2022) De maneira similar, (Ma, 2024) enfatiza a versatilidade dos AOPs, evidenciando sua capacidade de transformar poluentes orgânicos em subprodutos inertes, como água e dióxido de carbono, tornando essa abordagem promissora para a purificação de águas residuais. Além disso, (CAO, 2021) investigam variações dos AOPs, incluindo processos fotocatalíticos e baseados em ozônio, que se mostraram eficazes na remoção de substâncias orgânicas prejudiciais.

Outro avanço importante é a adoção de tecnologias eletroquímicas, destacadas por sua capacidade de recuperar recursos e gerar energia durante o tratamento da água. (CHEN, 2022) fornecem uma análise detalhada sobre o uso de células de combustível microbianas (MFCs) e outros sistemas eletroquímicos, que não apenas purificam águas residuais, mas também permitem a recuperação de metais valiosos e a geração de eletricidade. (E., 2023) examina a eletrocoagulação como um método inovador para a remoção de contaminantes, melhorando a eficiência geral dos sistemas de tratamento de água.

A tecnologia de membranas também tem evoluído, mostrando-se altamente eficaz na remoção de contaminantes como corantes e sais em efluentes industriais. (Jiang, 2018) demonstram que a ultrafiltração convencional é uma solução eficiente para separar esses poluentes, contribuindo para um tratamento mais sustentável. (EGUZBE; RATHILAL, 2020) destacam a relevância dessa tecnologia na recuperação de água para reuso em indústrias, agricultura e residências. Membranas nanocompostas, segundo (Nthunya; Mhlanga; Mbakop, 2021), representam um grande avanço no aumento da eficiência e sustentabilidade desses sistemas de filtração.

O reuso de águas tratadas tem sido uma estratégia essencial na conservação dos recursos hídricos. (Singha *et al.*, 2022) investigam fatores sociais e psicológicos que influenciam a aceitação do público ao reuso de águas residuais tratadas, mostrando que os avanços tecnológicos têm permitido a utilização segura da água para diversas finalidades. (E., 2023) apresenta casos de sucesso no uso dessas águas na agricultura, evidenciando os benefícios ambientais e econômicos dessa prática. A combinação de biofiltração e biorreatores de membrana demonstra a importância de soluções inovadoras para a gestão eficiente dos recursos hídricos.

A aplicação da Inteligência Artificial (IA) tem revolucionado o tratamento de águas residuais, otimizando processos por meio de monitoramento e gestão avançados. (Zhao, 2022) exploram como a IA pode tornar os sistemas de tratamento mais flexíveis e eficazes, aumentando a eficiência das operações.

A desinfecção por radiação ultravioleta (UV) tem sido amplamente utilizada devido à

sua alta eficiência na eliminação de microrganismos patogênicos sem a necessidade de produtos químicos. (ZHANG, 2020) afirmam que, quando combinada com AOPs, a radiação UV melhora significativamente a remoção de contaminantes, tornando-se uma solução eficaz para indústrias que lidam com altos volumes de efluentes contaminados.

A biofiltração tem ganhado espaço como uma alternativa ecológica no tratamento de águas residuais. Segundo (CHEN, 2022), esse processo utiliza microrganismos para remover compostos orgânicos complexos, além de reduzir concentrações de nitrogênio e fósforo, minimizando impactos ambientais e custos operacionais.

As técnicas de adsorção também se destacam pela eficácia na remoção de metais pesados e compostos orgânicos. (Li; Wu, 2019) demonstram que materiais como carvão ativado e zeólitas possuem alta capacidade adsorvente, permitindo a remoção de poluentes de forma eficiente e econômica. A combinação da adsorção com outros processos, como coagulação e filtração, tem mostrado resultados promissores na otimização dos sistemas de tratamento de águas.

Os biorreatores de membrana representam uma abordagem inovadora ao unir o tratamento biológico à filtração por membranas. Conforme (Zhao, 2022), essa tecnologia proporciona a remoção simultânea de sólidos suspensos e de matéria orgânica, sendo especialmente vantajosa para aplicações em larga escala, como em sistemas municipais e industriais. Uma de suas vantagens é a redução da produção de lodo, tornando o processo mais eficiente e sustentável.

A implementação de tecnologias avançadas e sustentáveis no tratamento de águas residuais é essencial para a conservação dos recursos hídricos e a redução dos impactos ambientais. Como destacado por (Ma, 2024), o desenvolvimento contínuo dessas soluções é crucial para enfrentar desafios globais de gestão da água, promovendo sustentabilidade e melhoria da qualidade de vida.

2.1 Filtração, Ozônio e UV no Tratamento de Águas

A filtração lenta, embora por vezes subestimada, continua sendo uma alternativa eficaz para o tratamento de águas residuais. Sua simplicidade na construção e operação a tornam uma solução viável, especialmente em regiões com recursos limitados. Conforme apontado por (al., 2019), esse método representa uma opção sustentável de baixo custo e reduzido impacto ambiental. Quando associada a outras técnicas, como a ozonização, sua eficiência pode ser amplificada, melhorando significativamente a qualidade da água tratada (al., 2020). Essa combinação permite que sistemas de purificação se tornem mais eficazes, especialmente em cenários onde a água apresenta altos níveis de contaminação.

O ozônio (O₃) destaca-se como um potente agente oxidante, amplamente utilizado no tratamento de águas devido à sua capacidade de decompor compostos orgânicos complexos e inativar patógenos. Estudos conduzidos por (D.; BENETTI, 2021) demonstram

sua eficácia na remoção de contaminantes microbiológicos e químicos, incluindo pesticidas e corantes. Além disso, seu uso em sistemas de recirculação na aquicultura tem apresentado resultados positivos, contribuindo para a melhoria da qualidade da água e garantindo condições mais saudáveis para os organismos aquáticos (MAQUINÉ, 2024) Essa técnica tem se mostrado essencial no controle de patógenos e na promoção de um ambiente aquático mais seguro.

A combinação da ozonização com a radiação UV potencializa o processo de desinfecção da água. A radiação UV, reconhecida por sua capacidade de inativar uma ampla variedade de microrganismos, incluindo vírus, bactérias e protozoários, opera sem a necessidade de aditivos químicos (MICHELAN, 2019) De acordo com (P.; A, 2021) a sinergia entre essas duas tecnologias aumenta a vulnerabilidade dos patógenos, tornando a desinfecção mais eficiente. Esse modelo de tratamento em múltiplas etapas é particularmente indicado para águas que contêm uma combinação de contaminantes orgânicos e inorgânicos.

Pesquisas indicam que a ozonização também contribui para a remoção de compostos orgânicos persistentes e para a redução do carbono orgânico dissolvido, especialmente quando associada à adsorção em carvão ativado. Estudos de (P.; A, 2021) mostram que essa combinação melhora a qualidade da água ao minimizar a formação de subprodutos indesejáveis nos tratamentos convencionais. O carvão ativado, por sua vez, auxilia na estabilização da água tratada, reduzindo o risco de formação de biofilmes nas redes de distribuição, tornando o sistema mais eficiente e seguro.

Além da desinfecção, a ozonização desempenha um papel relevante na remoção de sólidos suspensos e na redução de nitritos em sistemas de tratamento de água, sendo especialmente vantajosa para a aquicultura e estações de tratamento. (MAQUINÉ, 2024) ressalta que esse processo eleva os níveis de oxigênio dissolvido, beneficiando a vida aquática e otimizando os processos biológicos de tratamento. A maior disponibilidade de oxigênio facilita a degradação de matéria orgânica, contribuindo para a eficiência geral dos sistemas biológicos de purificação.

Outro aspecto relevante é a aplicação do ozônio em outros setores além do tratamento de águas, como na medicina veterinária e no cuidado de feridas. Segundo (NOGUEIRA, 2020), a água ozonizada tem sido utilizada com sucesso para acelerar a cicatrização e reduzir infecções, mostrando-se promissora para diferentes condições clínicas. O potencial dessa tecnologia continua a ser explorado, ampliando suas aplicações em diversos campos.

A integração de processos como filtração lenta, ozonização e radiação UV representa uma solução abrangente para garantir a qualidade da água, cumprindo os padrões de potabilidade e promovendo um tratamento sustentável. Essa abordagem pode ser aplicada tanto no abastecimento público quanto em setores industriais e de saúde (al., 2019) O avanço das pesquisas e das inovações tecnológicas desempenha um papel essencial na evolução dessas técnicas, assegurando sua implementação eficaz em diferentes contextos.

A integração entre ozônio, filtração e radiação UV tem demonstrado excelentes resultados no tratamento de águas contaminadas, especialmente quando se busca remover uma alta carga de poluentes. Júnior e (P.; A, 2021) enfatizam que essa combinação permite uma remoção mais eficiente de compostos tóxicos e patógenos, elevando consideravelmente a qualidade da água. Assim, a integração dessas tecnologias se apresenta como uma alternativa robusta e eficiente para diversos contextos de tratamento, abrangendo desde águas residuais até sistemas de abastecimento potável.

2.2 Filtros de Areia e Carvão Ativado

A eficiência do carvão ativado no tratamento de água não depende apenas de sua área superficial, mas também de outras propriedades, como o volume e o diâmetro dos poros, bem como das características químicas do material (FRANCO, 2021). O carvão ativado granular (CAG) é amplamente utilizado em sistemas de filtração, sendo eficaz na remoção de compostos indesejados, incluindo subprodutos da desinfecção e contaminantes emergentes, conforme demonstrado por (FALDA, 2023). Sua versatilidade torna o carvão ativado uma solução eficiente para diversas aplicações de purificação de água.

A produção de carvão ativado pode ser realizada a partir de diversos materiais orgânicos, incluindo resíduos agrícolas como caroços de frutas e borra de café (LIMA, 2022). Pesquisas indicam que o carvão ativado originado de fontes alternativas, como caroços de pêssego e borra de café, tem desempenho similar ao carvão ativado comercial (HEYLMANN, 2021b). A ativação química, utilizando agentes como NaOH ou KOH, é um processo comum que aumenta a porosidade e a capacidade de adsorção do carvão ativado (MADALENO, 2021). Além disso, a funcionalização do carvão ativado com nanopartículas, como prata ou óxido de ferro, tem mostrado resultados promissores, aumentando sua eficiência na remoção de contaminantes (PAIXÃO, 2021); (SILVA, 2022).

Filtros de areia são tradicionalmente empregados no tratamento de águas, sendo eficientes na remoção de sólidos suspensos e na redução da turbidez. Quando combinados com carvão ativado, esses filtros podem alcançar resultados ainda mais eficazes. A areia remove partículas maiores, enquanto o carvão ativado adsorve moléculas menores e compostos orgânicos, como evidenciado por (SANTOS, 2020). A combinação desses materiais oferece uma solução de purificação de água com desempenho superior em comparação com sistemas que utilizam apenas um desses materiais (FALDA, 2023); (SANTOS, 2020).

A biofiltração, que combina materiais como areia e carvão ativado, tem sido estudada como uma solução eficaz para o tratamento de águas residuais e a remoção de contaminantes emergentes. A imobilização de culturas bacterianas no carvão ativado pode acelerar a biodegradação de poluentes, aumentando a eficiência do processo de tratamento (FALDA, 2023). A eficácia desse processo depende de fatores como a taxa de fluxo da água, o tempo de contato e a composição do material filtrante, conforme discutido por (FALDA, 2023) e (P.;

A, 2021)

O uso de carvão ativado em sistemas de tratamento de água não se limita à remoção de contaminantes químicos, também desempenhando um papel importante na eliminação de microrganismos patogênicos e contribuindo para a desinfecção da água (SILVA, 2022). A combinação de carvão ativado com processos de pré-oxidação, como a ozonização, tem mostrado resultados promissores na remoção de carbono orgânico dissolvido e na melhoria da qualidade da água tratada (P.; A, 2021). Essa abordagem integrada tem se mostrado especialmente eficaz em áreas com águas contaminadas por compostos orgânicos complexos.

A pesquisa sobre o uso de carvão ativado e filtros de areia continua a avançar, com novos estudos explorando diferentes combinações de materiais e métodos de ativação. A busca por soluções de baixo custo e sustentáveis para o tratamento de água é um tema crescente na literatura científica. O uso de materiais alternativos, como resíduos agrícolas, não só reduz os custos de produção do carvão ativado, mas também contribui para a gestão de resíduos e a sustentabilidade ambiental (LIMA, 2022); (ALVES, 2023).

A avaliação da eficácia de filtros de areia e carvão ativado pode ser feita por meio de parâmetros físico-químicos da água tratada, como turbidez, cor e concentração de contaminantes. Diversos estudos demonstram que a combinação de areia e carvão ativado resulta em uma redução significativa desses parâmetros, melhorando a qualidade da água para consumo humano (CORRÊA, 2023). Além disso, a análise estatística dos dados obtidos em experimentos de filtração pode fornecer informações valiosas sobre a eficiência dos diferentes sistemas de tratamento (CORRÊA, 2023).

A combinação de carvão ativado e filtros de areia não só melhora a eficácia na remoção de contaminantes, mas também oferece uma alternativa sustentável, principalmente quando associada a tecnologias de baixo custo. Conforme apontado por (SANTOS, 2020), o uso conjunto desses materiais pode gerar sistemas de tratamento de água mais acessíveis, adequados para áreas com limitações econômicas e recursos escassos. A utilização de carvão ativado proveniente de fontes alternativas, como resíduos agrícolas, também contribui para uma gestão mais eficiente dos resíduos, promovendo a sustentabilidade ambiental e atendendo à crescente demanda por soluções acessíveis para a purificação de água (LIMA, 2022).

O carvão ativado, quando empregado em sistemas de filtração, não se limita à adsorção de compostos orgânicos, mas também pode desempenhar um papel importante na remoção de substâncias inorgânicas e metais pesados. (PAIXÃO, 2021) indicam que, ao ser funcionalizado com nanopartículas como prata ou óxido de ferro, o carvão ativado pode ampliar significativamente sua capacidade de adsorção, tornando-se mais eficaz na remoção de uma ampla gama de poluentes. Essas inovações expandem as possíveis aplicações do carvão ativado, consolidando-o como uma ferramenta versátil e altamente eficaz no tratamento de águas residuais.

A combinação de carvão ativado com processos de pré-oxidação, como a ozonização, mostra um aumento significativo na eficiência da remoção de carbono orgânico dissolvido, contribuindo para a melhoria da qualidade da água tratada. (P.; A, 2021) observam que, quando utilizados juntos, esses processos facilitam a degradação de compostos orgânicos complexos, proporcionando uma água mais limpa. Essa sinergia potencializa a eficácia geral do tratamento de água, sendo particularmente útil em regiões com altos níveis de contaminantes orgânicos, onde as tecnologias convencionais não são suficientes para garantir a potabilidade.

Nos sistemas de aquicultura, a combinação de carvão ativado e ozonização tem gerado resultados positivos não apenas na remoção de contaminantes, mas também na melhoria da qualidade da água, especialmente em sistemas de recirculação. (MAQUINÉ, 2024) destaca que a ozonização, associada ao carvão ativado, resulta no aumento da concentração de oxigênio dissolvido, essencial para a saúde dos organismos aquáticos. Esse aumento no oxigênio beneficia não apenas os organismos cultivados, mas também otimiza o processo de filtração biológica, criando um ambiente aquático mais saudável e equilibrado.

A eficácia do uso combinado de carvão ativado e filtros de areia também foi confirmada em contextos de tratamento de água em grande escala, como em estações de tratamento de água urbanas. (FALDA, 2023) sugerem que a combinação desses materiais pode melhorar substancialmente a capacidade de remoção de contaminantes e a qualidade da água, reduzindo a dependência de produtos químicos e aumentando a sustentabilidade do processo. Essa abordagem oferece uma solução mais ecológica, atendendo aos padrões de qualidade da água sem gerar subprodutos prejudiciais ou tóxicos.

A pesquisa sobre o uso de carvão ativado e filtros de areia no tratamento de água continua avançando, com novas investigações buscando otimizar esses processos e explorar formas de aplicá-los de maneira mais eficiente. Estudos futuros podem revelar maneiras de combinar esses materiais com outras tecnologias, como radiação UV ou biofiltração, para atender a demandas específicas de purificação de água. Como destacado por (ALVES, 2023), a inovação nesse campo poderá resultar em sistemas de tratamento mais eficazes e acessíveis, especialmente para regiões com recursos limitados, além de promover práticas sustentáveis na gestão da água.

3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Neste capítulo, serão abordados os fundamentos teóricos essenciais para a seleção e dimensionamento da bomba, incluindo os critérios técnicos envolvidos e as equações utilizadas no cálculo do projeto. Serão apresentadas as principais variáveis que influenciam o desempenho do sistema, bem como os métodos para análise das curvas características e das perdas de carga

3.1 Tipos e Classificação das Bombas

As bombas são dispositivos hidráulicos responsáveis por transferir energia de uma fonte motriz para um fluido, permitindo seu transporte entre diferentes pontos dentro de um sistema. Essa transferência de energia deve atender às condições operacionais específicas do processo. A classificação das bombas pode ser feita com base em sua aplicação ou no mecanismo pelo qual transferem energia ao fluido (Falco; Mattos, 1998). A Figura 3 apresenta um diagrama ilustrando os principais tipos de bombas segundo essa última categorização.

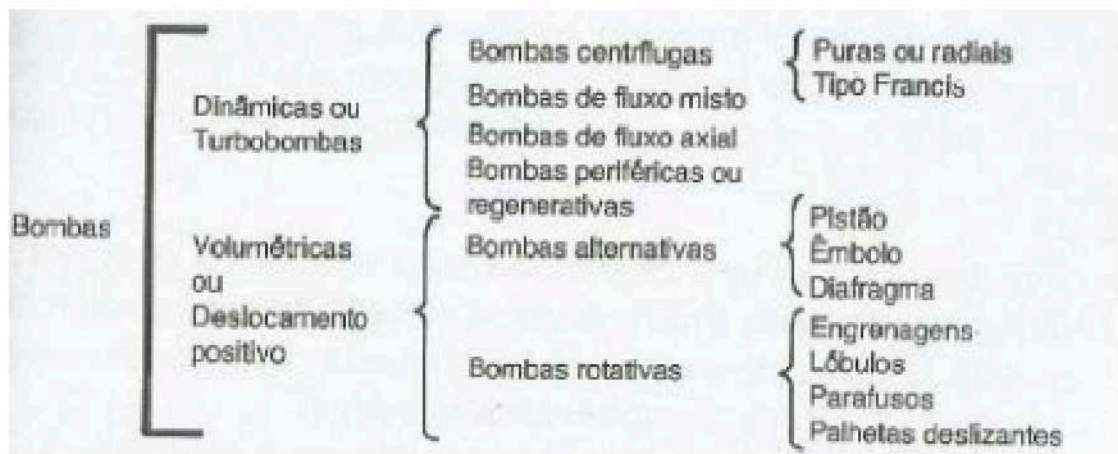


Figura 1 – Os tipos de Bombas

Fonte: (Reinaldo De Falco, Edason Ezequiel De Mattos, 1998)

As bombas hidráulicas são categorizadas em dois grupos principais: **bombas dinâmicas** e **bombas volumétricas**. No caso das bombas dinâmicas, o fluido é impulsionado por meio da conversão de energia cinética em energia de pressão. Já nas bombas volumétricas, também conhecidas como bombas de deslocamento positivo, o movimento do fluido é diretamente forçado por um mecanismo interno, garantindo um fluxo mais constante, independentemente da variação de carga (Falco; Mattos, 1998)

A diferença essencial entre esses dois tipos está no modo como a energia é transmitida ao fluido. Nas bombas dinâmicas, a aceleração do fluido gera velocidade, que posteriormente é transformada em pressão. Por outro lado, as bombas volumétricas operam de maneira cíclica, deslocando quantidades fixas de fluido a cada movimento do mecanismo interno, o que resulta em uma entrega contínua de pressão ao sistema (Falco; Mattos, 1998)

3.1.1 Princípios de funcionamento das Bombas Centrífugas

As bombas centrífugas operam transferindo energia ao fluido na forma de energia cinética, que posteriormente é convertida em pressão. Esse processo ocorre devido à rotação do impelidor, que impulsiona o líquido em direção à periferia da bomba. A geração dessa energia pode ocorrer por efeito centrífugo, por arrasto, ou por uma combinação de ambos, dependendo do design do impelidor (Falco; Mattos, 1998)

A Figura 2 apresenta um modelo típico de bomba centrífuga, destacando seus principais componentes e a forma como o fluido percorre o sistema.

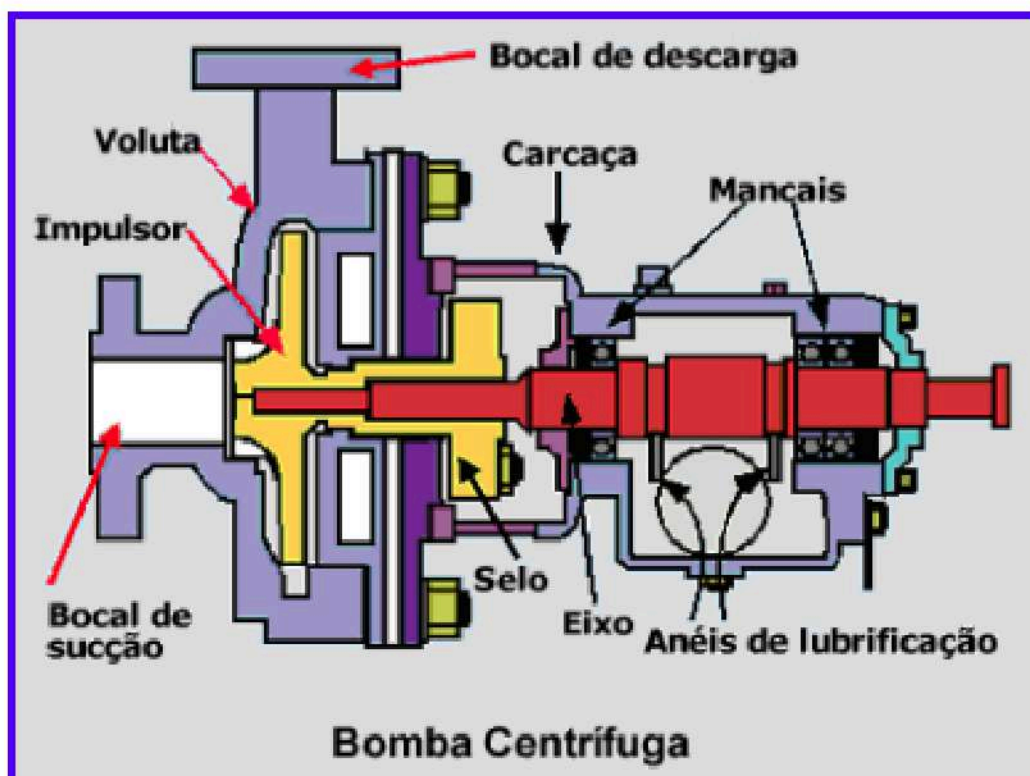


Figura 2 – Bomba Centrífuga

(Reinaldo De Falco, Edason Ezequiel De Mattos, 1998)

As **bombas de fluxo axial** transferem energia ao fluido principalmente por arrasto, com escoamento ao longo do eixo. São ideais para aplicações que requerem **altas vazões e baixas alturas manométricas**, como drenagem, irrigação e resfriamento industrial, com **alta eficiência energética**.

As **bombas de fluxo misto** combinam as ações centrífuga e axial, operando com **vazões elevadas e alturas moderadas**. São apropriadas para **abastecimento de água, drenagem e circulação de líquidos industriais**, oferecendo bom equilíbrio entre desempenho e eficiência (Falco; Mattos, 1998)

As **bombas periféricas (ou regenerativas)** utilizam recirculação interna para aumentar gradualmente a pressão do fluido. São recomendadas para **sistemas compactos**

com alta pressão, como caldeiras e tubulações longas, mas não são indicadas para líquidos com sólidos (Falco; Mattos, 1998).

As **bombas alternativas** (o texto repete a descrição das bombas periféricas), também visam aplicações de **alta pressão em sistemas de pequeno porte**, com o mesmo princípio de funcionamento das regenerativas (Falco; Mattos, 1998).

Por fim, as **bombas rotativas** operam com elementos móveis como engrenagens e lóbulos, oferecendo **fluxo constante, baixa pulsação e controle preciso da vazão**. São muito usadas com **fluidos viscosos** em setores como o **alimentício, farmacêutico e petroquímico** (Falco; Mattos, 1998).

3.2 Conceitos Essenciais da Mecânica dos Fluidos

3.2.1 Classificação dos regimes de escoamento

O escoamento de fluidos viscosos pode ser classificado com base no comportamento das partículas dentro do fluido e na regularidade das trajetórias seguidas. Essa classificação é fundamental para a análise da perda de carga e para o correto dimensionamento de sistemas hidráulicos e de bombeamento.

3.2.1.1 Tipos de Escoamento

- **Escoamento Laminar:** Ocorre quando as partículas do fluido movem-se de maneira ordenada, em trajetórias bem definidas e predominantemente paralelas. Nesse regime, não há mistura significativa entre as camadas do fluido, resultando em um escoamento suave e previsível. Esse tipo de escoamento ocorre tipicamente em baixas velocidades ou quando a viscosidade do fluido é elevada, como em óleos e polímeros de alta viscosidade (Livi, 2004)
- **Escoamento Turbulento:** Caracteriza-se pelo movimento caótico das partículas do fluido, com formação de vórtices e redemoinhos de diferentes escalas. Nesse regime, há intensa mistura das camadas do fluido, resultando em maiores taxas de transferência de quantidade de movimento, calor e massa. O escoamento turbulento é mais comum em fluidos de baixa viscosidade e em altas velocidades de escoamento, como em sistemas de tubulação industrial e canais abertos (Livi, 2004)
- **Escoamento Transitório:** Representa a região intermediária entre os regimes laminar e turbulento, ocorrendo quando há variações nas condições de escoamento. Nessa faixa, o comportamento do fluido pode oscilar entre laminar e turbulento, tornando a análise do escoamento mais complexa. Esse regime é comum em sistemas sujeitos a variações de vazão ou mudanças bruscas na geometria da tubulação.

3.2.2 Número de Reynolds e Influência na Perda de Carga

O Número de Reynolds (Re) é um parâmetro adimensional utilizado para caracterizar a natureza do escoamento e determinar a predominância dos efeitos viscosos ou inerciais em um sistema de escoamento. Ele é definido como a razão entre as forças inerciais e as forças viscosas no fluido, expresso pela seguinte equação (FOX; MCDONALD; PRITCHARD, 2014)

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (3.1)$$

Onde:

Re = Número de Reynolds (adimensional);

ρ = Massa específica do fluido (kg/m^3);

v = Velocidade média do escoamento (m/s);

D = Diâmetro interno da tubulação (m);

μ = Viscosidade dinâmica do fluido ($\text{Pa}\cdot\text{s}$ ou $\text{N}\cdot\text{s/m}^2$).

O significado físico do Número de Reynolds está associado à predominância das forças atuantes no fluido: Para valores altos de Re , as forças inerciais dominam e os efeitos viscosos são desprezíveis, favorecendo o escoamento turbulento. Para valores baixos de Re , as forças viscosas são dominantes, resultando em um escoamento laminar.

Com base no valor de Re , o escoamento dentro de uma tubulação pode ser classificado da seguinte forma:

$Re < 2000 \rightarrow$ Escoamento laminar (fluxo ordenado, baixa turbulência);

$2000 < Re < 4000 \rightarrow$ Escoamento transitório (transição entre regimes);

$Re > 4000 \rightarrow$ Escoamento turbulento (fluxo caótico, elevada mistura).

A determinação correta do regime de escoamento é essencial para prever perdas de carga, otimizar projetos hidráulicos e definir estratégias para o dimensionamento de bombas, válvulas e tubulações. A correta estimativa do regime de escoamento é, portanto, essencial para a seleção dos métodos de cálculo de perda de carga. (BANSAL, 2018) complementa que o número de Reynolds também auxilia na definição do coeficiente de atrito adequado, sobretudo em regimes de transição, onde pequenas variações podem impactar significativamente os resultados do dimensionamento hidráulico.

3.2.3 Aplicação do Teorema de Bernoulli em sistemas de bombeamento

O Teorema de Bernoulli estabelece a conservação da energia mecânica ao longo de uma linha de corrente em um fluido em escoamento, considerando um regime permanente,

incompressível e sem a influência de trabalho de eixo ou dissipação significativa de calor. Esse princípio é fundamental para a análise de sistemas hidráulicos, permitindo a determinação da pressão, velocidade e altura de um fluido em diferentes pontos de um sistema (Livi, 2004)

A equação de Bernoulli é expressa como:

$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + h_p \quad (3.2)$$

Onde:

Z = Energia de pressão por unidade de peso do fluido (m);

P/γ = Energia cinética por unidade de peso do fluido (m);

$v^2/2g$ = Energia potencial por unidade de peso do fluido (m);

h_p = Perda de carga por unidade de peso do fluido ao se deslocar do ponto 1 ao ponto 2 (m).

As perdas de carga h_p representam a dissipação de energia devido ao atrito com as paredes da tubulação e às perdas localizadas causadas por conexões, válvulas e mudanças bruscas de direção do fluxo. A equação de Bernoulli é amplamente utilizada no dimensionamento de tubulações, cálculo de bombas e análise de sistemas hidráulicos

3.3 Elementos Fundamentais de um sistema hidráulico

Um sistema hidráulico é composto por tubulações, bombas, válvulas e outros componentes que regulam o transporte de fluidos. A eficiência do sistema depende da análise de variáveis como vazão, velocidade de escoamento e perdas de carga.

3.3.1 Relação entre vazão, velocidade e diâmetro do sistema

Em sistemas prediais, o dimensionamento de tubulações e acessórios deve seguir diretrizes normativas para garantir segurança, funcionalidade e durabilidade. A norma *ABNT NBR 5626:2020*, por exemplo, estabelece critérios específicos para instalações prediais de água fria, contemplando aspectos como pressão mínima, velocidade admissível e reservação adequada, sendo aplicável especialmente em contextos urbanos e construções civis.

A vazão volumétrica Q é definida como a quantidade de fluido que atravessa uma determinada seção transversal por unidade de tempo, expressa pela equação:

$$Q = \frac{V}{t} \quad (3.3)$$

Onde:

Q = Vazão volumétrica (m^3/s);

V = Volume do fluido escoado (m^3);

t = Tempo (s).

A vazão mássica (m) é a quantidade de massa de fluido que passa por uma seção por unidade de tempo, determinada por:

$$\dot{m} = \rho Q \quad (3.4)$$

Onde:

$\dot{m}$ = Vazão mássica (kg/s);

ρ = Massa específica do fluido (kg/m^3);

Q = Vazão volumétrica (m^3/s).

A velocidade de escoamento (v) do fluido pode ser determinada pela relação entre a vazão volumétrica e a área da seção transversal da tubulação:

$$v = \frac{Q}{A} \quad (3.5)$$

Onde:

v = Velocidade do fluido (m/s);

A = Área da seção transversal da tubulação (m^2).

A correta determinação da vazão e da velocidade de escoamento é essencial para o dimensionamento de tubulações e a seleção de bombas, garantindo que o sistema opere de forma eficiente e sem risco de cavitação ou perdas excessivas.

3.3.2 Perdas de Carga do Sistema

Denomina-se perda de carga de um sistema a energia dissipada por unidade de peso do fluido devido ao atrito entre o fluido e a parede interna da tubulação ao longo de seu escoamento (Livi, 2004) As perdas de carga são classificadas em:

1) Perda de Carga Distribuída (h_f):

- a) Ocorre ao longo da tubulação devido ao atrito contínuo entre o fluido e as paredes internas.
- b) É uniforme em trechos de mesmo diâmetro, independentemente da posição na tubulação (Livi, 2004)

2) Perda de Carga Localizada (h_L):

- a) Ocorre devido à presença de acessórios, conexões e mudanças de direção na tubulação.

- b) Não é uniforme, pois depende da geometria e do tipo de componente presente no sistema (Livi, 2004)

A perda de carga total (h_T) do sistema é a soma da perda de carga distribuída com a perda de carga localizada:

$$h_t = h_f + h_L \quad (3.6)$$

3.3.2.1 Cálculo das Perdas de Carga Distribuídas e Localizadas

As perdas de carga em sistemas hidráulicos podem ser classificadas em perdas de carga distribuídas, que ocorrem ao longo do comprimento da tubulação devido ao atrito entre o fluido e a parede do tubo, e perdas de carga localizadas, que são associadas a elementos como válvulas, conexões, cotovelos e mudanças bruscas de seção.

Essas perdas podem ser determinadas experimentalmente por meio de medições de pressão em diferentes pontos do sistema. No entanto, o método mais comum na prática da engenharia é o uso de modelos matemáticos baseados em equações empíricas ou semi-empíricas, considerando as dimensões da tubulação, características do fluido e dos acessórios presentes no sistema.

A seguir, são apresentadas as principais fórmulas utilizadas para o cálculo das perdas de carga distribuídas.

3.3.2.2 Fórmulas para Perda de Carga Distribuída

- Fórmulas de Flamant

A fórmula de Flamant é utilizada para escoamento de água em tubos de paredes lisas, sendo válida para diâmetros entre 10 mm e 1000 mm (FRANK LAMBERTO LENGSELD; RONALDO DUARTE; CLAUDIO ALTIERI, 2003)

$$h_f = \frac{H_P}{L} = \frac{4b}{D} \sqrt[4]{\frac{v^7}{D}} \quad (3.7)$$

Em que:

h_f = perda de carga distribuída em relação ao comprimento do tubo [m/m]

H_P = perda de carga distribuída total [m]

L = comprimento do trecho reto do tubo [m]

D = diâmetro interno da tubulação [m]

v = velocidade média do escoamento [m/s]

K = coeficiente de Flamant [adimensional]

Esse método é útil para aplicações industriais e prediais, especialmente em redes de abastecimento de água. Entretanto, sua precisão é limitada quando há variações significativas na rugosidade da tubulação.

Tabela 1 – Coeficiente de Farnant

Material	b
Ferro fundido ou aço	0,00023
Concreto	0,000185
Chumbo	0,000140
Plástico (PVC)	0,000135

Fonte: (Frank Lamberto Lengsfeld et al. (2003))

- Fórmula de Fair – Whipple – Hsiao

Essas fórmulas são mais aplicáveis para tubos de pequeno diâmetro (até 100 mm), conduzindo água. Elas diferenciam os coeficientes dependendo do material da tubulação (FRANK LAMBERTO LENGSELD; RONALDO DUARTE; CLAUDIO ALTIERI, 2003)

Para tubos de aço galvanizado:

$$h_f = \frac{H_p}{L} = 0,002021 \cdot \frac{Q^{1,88}}{D^{4,88}} \quad (3.8)$$

Para tubos de cobre ou latão:

$$h_f = \frac{H_p}{L} = 0,0086 \cdot \frac{Q^{1,75}}{D^{4,75}} \quad (3.9)$$

Em que:

h_f = perda de carga distribuída em relação ao comprimento do tubo [m/m]

H_p = perda de carga distribuída total [m]

L = comprimento do trecho reto do tubo [m]

Q = vazão [m³/s]

D = diâmetro interno do tubo [m]

Essa equação é comumente utilizada em sistemas de distribuição de água em edifícios residenciais e comerciais

- Fórmula de Hazen-Williams

A equação de Hazen-Williams é amplamente utilizada em aplicações industriais e prediais, sendo válida para diâmetros acima de 50 mm e escoamento de água em tubos lisos (FRANK LAMBERTO LENGSELD; RONALDO DUARTE; CLAUDIO ALTIERI, 2003)

$$h_f = \frac{H_p}{L} = \frac{10,643 \cdot L}{C^{1,85} \cdot D^{4,87}} \cdot Q^{1,85} \quad (3.10)$$

Em que:

hf = perda de carga distribuída em relação ao comprimento do tubo [m/m]

H_p = perda de carga distribuída total [m]

L = comprimento do trecho reto do tubo [m]

Q = vazão [m³/s]

D = diâmetro interno do tubo [m]

C = coeficiente de Hazen-Williams [adimensional]

A principal vantagem da equação de Hazen-Williams é sua simplicidade e aplicabilidade em sistemas de água potável e incêndio. Entretanto, seu uso não é recomendado para fluidos viscosos ou escoamentos com variações significativas de temperatura.

Tabela 2 – Coeficiente de Hazen -Williams

MATERIAL	C
Aço corrugado (chapa ondulada)	060
Aço com juntas "Look-Bar" novas	130
Aço galvanizado novo e em uso	125
Aço rebitado novo	110
Aço rebitado em uso	085
Aço soldado novo	120
Aço soldado em uso	090
Aço soldado com revestimento esp. novo e em uso	130
Chumbo	130
Cimento amianto	140
Cobre	130
Concreto bem acabado	130
Concreto acabamento comum	120
Ferro fundido novo	130
Ferro fundido em uso	090
Ferro fundido revestido de cimento	130
Grés cerâmico vidrado (Manilha)	110
Latão	130
Madeira em aduelas	120
Tijolos condutos bem executados	100
Vidro	140
Plástico	140

Fonte: (Frank Lamberto Lengsfeld et al. (2003))

Tabela 3 – Coeficiente de Hazen-Willians (Material e tempo de uso)

TIPO DE TUBO	IDADE / ANOS	DIÂMETRO (mm)	C
FERRO FUNDIDO PICHADO	Novo	Até 100	118
		100 - 200	120
		200 - 400	125
		400 - 600	130
	10 anos	Até 100	107
		100 - 200	110
		200 - 400	113
		400 - 600	115
	20 anos	Até 100	89
		100 - 200	93
		200 - 400	95
		400 - 600	100
	30 anos	Até 100	65
		100 - 200	75
		200 - 400	80
		400 - 600	85
FERRO FUNDIDO CIMENTO AMIANTO	Novo ou usado	Até 100	120
		100 - 200	130
		200 - 400	135
		400 - 600	140
AÇO REVESTIDO INTERNAMENTE	Novo ou usado	500 - 1000	135
		> 1000	140
PVC	Novo ou usado	Até 50	125
		50 - 100	135
		100 - 300	140
TUBO DE CONCRETO ARMADO	Novo ou usado	Até 600	= Ferro fundido c/ cimento
PROTENDIDO CENTRIFUGADO		> 600	= Aço revestido internamente
AÇO S/ REVESTIMENTO SOLDADO	Novo	—	= Ferro fundido novo pichado
	Usado	—	= Ferro fundido usado pichado
AÇO S/ REVESTIMENTO REBITADO	Novo	—	= Ferro fundido com 10 anos
	Usado	—	no mín. = Ferro fundido com 20 anos

- Fórmula de Darcy-Weisbach

A equação de Darcy-Weisbach é a mais abrangente e precisa para perda de carga distribuída, pois considera a rugosidade da tubulação e o regime de escoamento. Ela é válida para qualquer fluido incompressível e qualquer diâmetro de tubulação (Munson *et al.*, 2013).

$$h_f = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (3.11)$$

Em que:

hf = perda de carga distribuída [m]

L = comprimento do trecho reto do tubo [m]

D = diâmetro interno da tubulação [m]

v = velocidade média do escoamento [m/s]

f = coeficiente de atrito [adimensional]

g = aceleração da gravidade [m/s²]

O coeficiente de atrito f depende do número de Reynolds (Re) e da rugosidade relativa (ε/d), sendo determinado por: $f = \frac{64}{Re}$, para escoamento laminar ($Re < 2000$)

A equação de Darcy-Weisbach é amplamente utilizada em projetos de engenharia de tubulações, sendo o modelo padrão para cálculos precisos em diferentes indústrias, como petróleo, gás, saneamento e processos industriais

Para regime turbulento, f é obtido pelo Diagrama de Moody-Rouse ou pela Equação de Colebrook-White:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2,0 \log_{10} \left(\frac{\varepsilon/D}{3,7} + \frac{2,51}{Re\sqrt{f}} \right) \quad (3.12)$$

Tabela 4 – Rugosidade de parede do tubo

MATERIAL	k (m) - TUBOS NOVOS	k (m) - TUBOS VELHOS
Aço galvanizado	0,00015 – 0,00020	0,0046
Aço rebitado	0,0010 – 0,0030	0,0060
Aço revestido	0,0004	0,0005 – 0,0012
Aço soldado	0,00004 – 0,00006	0,0024
Chumbo	lisos	lisos
Cimento amianto	0,000013	———
Cobre ou latão	lisos	lisos
Concreto bem acabado	0,0003 – 0,0010	———
Concreto ordinário	0,0010 – 0,0020	———
Ferro forjado	0,00004 – 0,00006	0,0024
Ferro fundido	0,00025 – 0,00050	0,0030 – 0,0050
Madeira com aduelas	0,0002 – 0,0010	———
Manilhas cerâmicas	0,0006	0,0030
Vidro	lisos	lisos
Plástico	lisos	lisos

Fonte: (Frank Lamberto Lengsfeld et al. (2003))

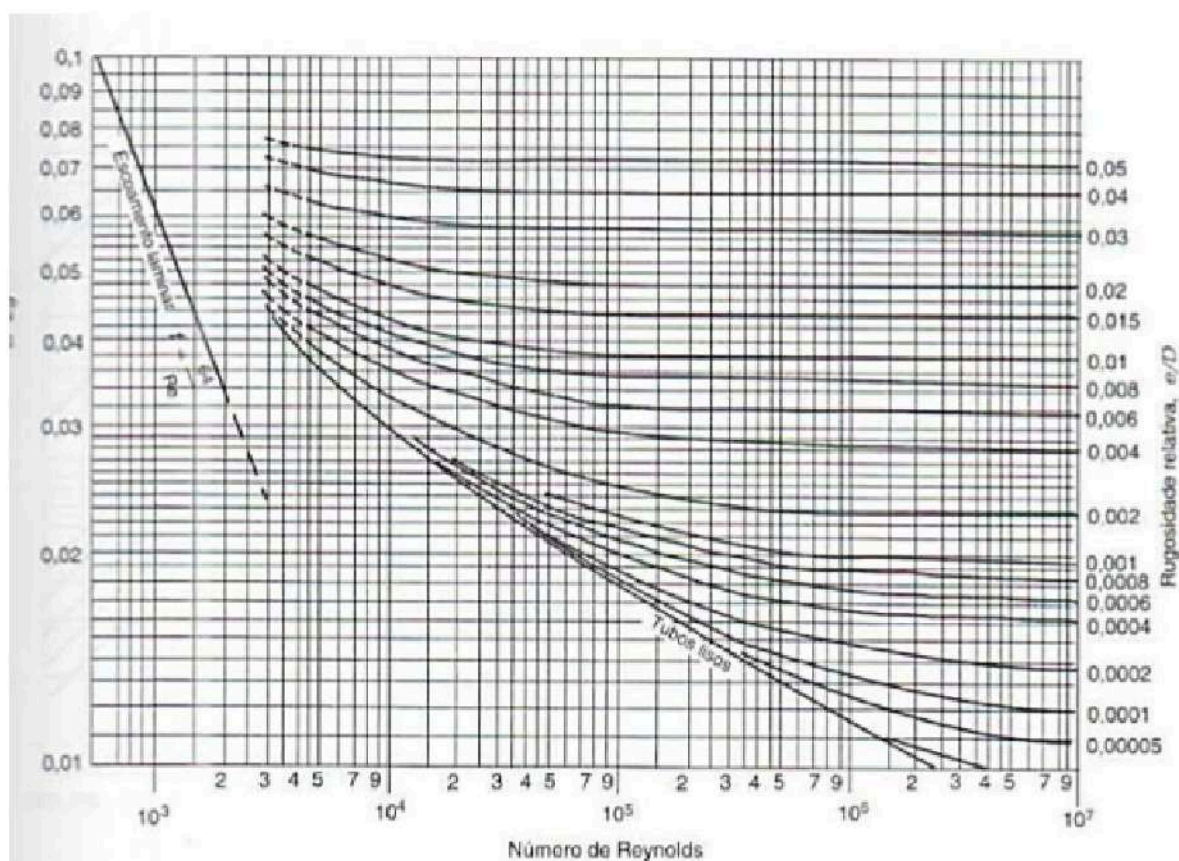


Figura 3 – Diagrama de Moody - Rouse

(Frank Lamberto Lengsfeld et al. (2003))

Para escoamentos totalmente turbulentos, o coeficiente de atrito torna-se independentemente do número de Reynolds, sendo determinado a partir do gráfico apresentado na Figura 4

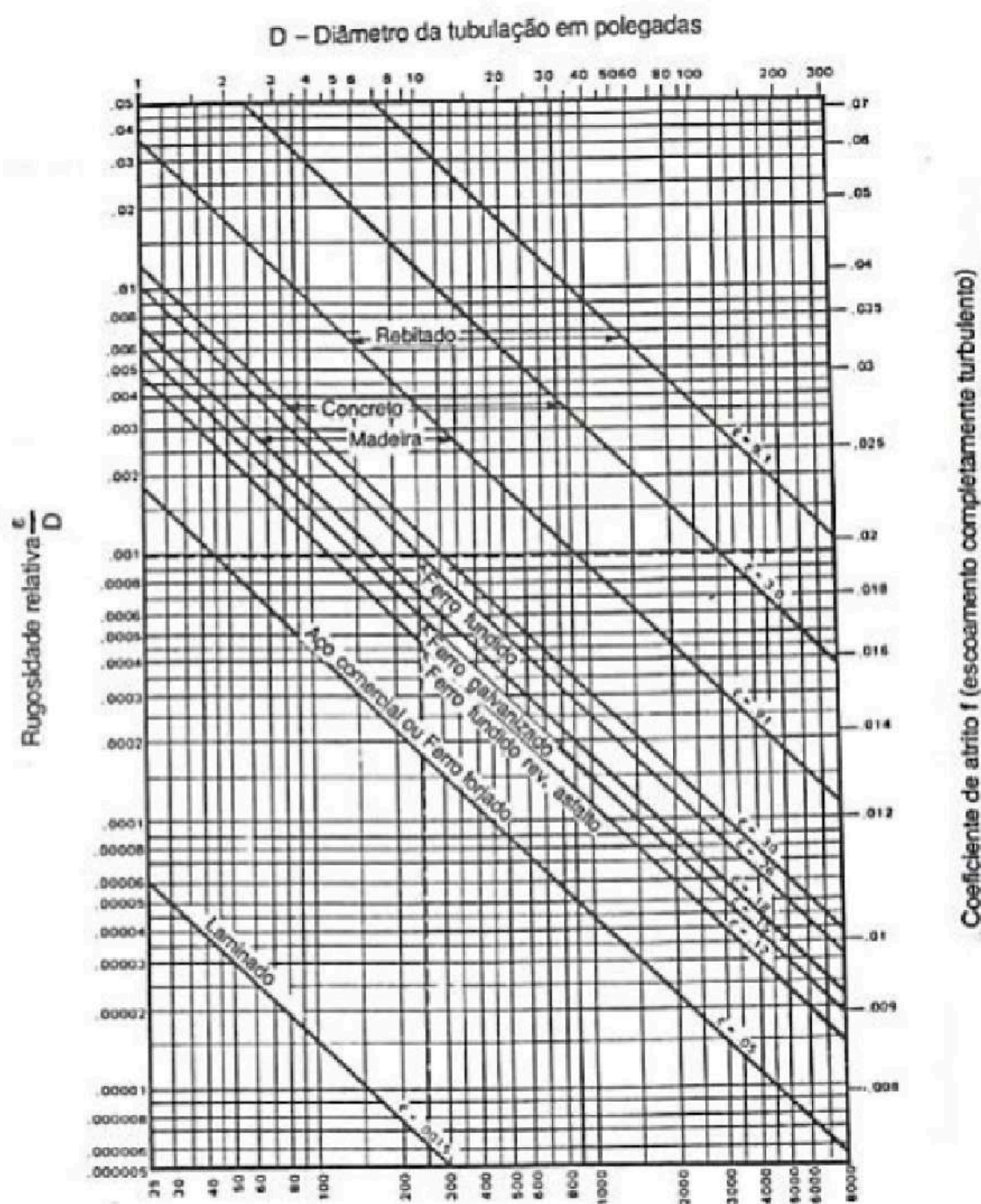


Figura 4 – Coeficiente de Atrito para Escoamento Completamente Turbulento
Falco, R D.; Mattos 1998

As equações apresentadas possuem diferentes aplicações, vantagens e limitações. Para projetos mais detalhados e que exigem alta precisão, a equação de Darcy-Weisbach deve ser priorizada, pois leva em conta a rugosidade do tubo e o regime de escoamento. Já a equação de Hazen-Williams é mais utilizada em sistemas de abastecimento de água devido à sua simplicidade.

A seleção da fórmula mais adequada depende dos dados disponíveis, da precisão necessária e da aplicação específica do sistema hidráulico.

3.3.2.2.1 Métodos de cálculo para perdas de carga localizada

O método do comprimento equivalente consiste em atribuir um comprimento adicional à tubulação para representar a perda de carga causada pelos acessórios presentes no sistema. Dessa forma, o comprimento total efetivo da tubulação é obtido somando-se o comprimento dos trechos retos ao comprimento equivalente de cada acessório.

A determinação do comprimento equivalente dos acessórios pode ser realizada experimentalmente. No entanto, tabelas padronizadas, como a 5, fornecem valores típicos para os principais componentes utilizados em sistemas de tubulação, facilitando a estimativa das perdas de carga

CONEXÃO		Diâmetro nominal X Equivalência em metros de canalização									
		MATERIAL	3/4"	1"	1 1/4"	1 1/2"	2"	2 1/2"	3"	4"	5"
Curva 90°		PVC	0,5	0,6	0,7	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,9
		Metal	0,4	0,5	0,6	0,7	0,9	1,0	1,3	1,6	2,1
Curva 45°		PVC	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1
		Metal	0,2	0,2	0,3	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,9
Joelho 90°		PVC	1,2	1,5	2,0	3,2	3,4	3,7	3,9	4,3	4,9
		Metal	0,7	0,8	1,1	1,3	1,7	2,0	2,5	3,4	4,2
Joelho 45°		PVC	0,5	0,7	1,0	1,3	1,5	1,7	1,8	1,9	2,5
		Metal	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	0,9	1,2	1,5	1,9
Tê de passagem direta		PVC	0,8	0,9	1,5	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	3,3
		Metal	0,4	0,5	0,7	0,9	1,1	1,3	1,6	2,1	2,7
Tê de saída lateral		PVC	2,4	3,1	4,6	7,3	7,6	7,8	8,0	8,3	10,0
		Metal	1,4	1,7	2,3	2,8	3,5	4,3	5,2	6,7	8,4
Tê de saída bilateral		PVC	2,4	3,1	4,6	7,3	7,6	7,8	8,0	8,3	10,0
		Metal	1,4	1,7	2,3	2,8	3,5	4,3	5,2	6,7	8,4
União		PVC	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,15	0,2	0,25
		Metal	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,03
Saída de canalização		PVC	0,9	1,3	1,4	3,2	3,3	3,5	3,7	3,9	4,9
		Metal	0,5	0,7	0,9	1,0	1,5	1,9	2,2	3,2	4,0
Luva de redução (*)		PVC	0,3	0,2	0,15	0,4	0,7	0,8	0,85	0,95	1,2
		Aço	0,29	0,16	0,12	0,38	0,64	0,71	0,78	0,9	1,07
Registro de gaveta ou esfera aberto		PVC	0,2	0,3	0,4	0,7	0,8	0,9	0,9	1,0	1,1
		Metal	0,1	0,2	0,2	0,3	0,4	0,4	0,5	0,7	0,9
Registro de globo aberto		Metal	6,7	8,2	11,3	13,4	17,4	21,0	26,0	34,0	43,0
Registro de ângulo aberto		Metal	3,6	4,6	5,6	6,7	8,5	10,0	13,0	17,0	21,0
Válvula de pé com crivo		PVC	9,5	13,3	15,3	18,3	23,7	25,0	26,8	28,8	37,4
		Metal	5,6	7,3	10,0	11,6	14,0	17,0	22,0	23,0	30,0
Válvula de Retenção	Horizontal	Metal	1,6	2,1	2,7	3,2	4,2	5,2	6,3	6,4	10,4
	Vertical	Metal	2,4	3,2	4,0	4,8	6,4	8,1	9,7	12,9	16,1

Figura 5 – Perdas de cargas localizadas em conexões.

(Frank Lamberto Lengsfeld et al. (2003))

- Método Direto

De acordo com o (FRANK LAMBERTO LENGSELD; RONALDO DUARTE; CLAUDIO ALTIERI, 2003) as perdas de carga localizadas podem ser calculadas diretamente pela seguinte equação:

$$h_L = \frac{KV^2}{2g} \quad (3.13)$$

onde:

h_L = perda de carga localizada [m];

K = coeficiente de perda de carga, obtido experimentalmente;

V^2 = velocidade média do fluido na entrada do acessório [m/s];

g = aceleração da gravidade [m/s²].

A 5 apresenta valores típicos do coeficiente K para diferentes tipos de acessórios.

Tabela 5 – Valores de K de acordo com a peça

PEÇAS	K
Ampliação gradual	0,30
Bocais	2,75
Comporta aberta	2,50
Controlador de vazão	2,50
Cotovelo de 90°	0,90
Cotovelo de 45°	0,75
Crivo	0,40
Curva de 90°	0,40
Curva de 45°	0,20
Curva de 22,5°	0,10
Entrada normal em canalização	0,50
Entrada de borda	1,00
Pequena derivação	0,03
Junção	0,40
Medidor Venturi	2,50
Redução gradual	0,15
Registro de ângulo aberto	5,00
Registro de gaveta aberto	0,20
Registro de globo aberto	10,0
Tê, passagem direta	0,60
Tê, passagem de lado	1,30
Tê, saída de lado	1,30
Tê, saída bilateral	1,80
Válvula de pé	1,75
Válvula de retenção	2,50
Velocidade	1,00

(Frank Lamberto Lengsfeld et al. (2003))

Embora o método direto seja uma abordagem precisa, sua aplicação pode ser trabalhosa, pois exige a determinação individual da perda de carga para cada acessório do sistema. Por esse motivo, o método do comprimento equivalente é frequentemente preferido na prática, especialmente em projetos hidráulicos de grande escala, onde simplificações são desejáveis para agilizar os cálculos.

3.3.3 Altura manométrica total do sistema: definição e cálculo

A altura manométrica de um sistema representa a quantidade de energia por unidade de peso que a bomba deve fornecer para garantir o transporte do fluido de um ponto a outro, considerando uma determinada vazão. Essa altura é composta pela altura estática e pela altura dinâmica (FRANK LAMBERTO LENGSELD; RONALDO DUARTE; CLAUDIO ALTIERI, 2003).

3.3.3.1 *Altura Estática*

A altura estática é a soma da altura geométrica e da carga de pressão.

Altura geométrica (H_g): corresponde à diferença de cota entre o nível do líquido no reservatório de sucção e o nível no reservatório de descarga (FRANK LAMBERTO LENGSELD; RONALDO DUARTE; CLAUDIO ALTIERI, 2003), sendo expressa pela equação:

$$H_g = Z_r - Z_s \quad (3.14)$$

onde:

Z_r = cota do nível do líquido no reservatório de descarga [m];

Z_s = cota do nível do líquido no reservatório de sucção [m].

Carga de pressão (H_p): representa a diferença de pressão entre os reservatórios de sucção e descarga. Em sistemas fechados, essa parcela deve ser considerada, enquanto em sistemas abertos ela é nula (FRANK LAMBERTO LENGSELD; RONALDO DUARTE; CLAUDIO ALTIERI, 2003).

$$H_p = \frac{P_r - P_s}{\gamma} \quad (3.15)$$

onde:

P_r = pressão no reservatório de recalque [Pa];

P_s = pressão no reservatório de sucção [Pa];

γ (gamma) = peso específico do fluido [N/m³].

3.3.3.2 *Altura Dinâmica*

A altura dinâmica corresponde à soma da perda de carga total e da carga de velocidade.

- **Perda de carga total (H_f):** é a soma de todas as perdas de carga ao longo do sistema, incluindo tanto a sucção quanto o recalque.
- **Carga de velocidade (H_v):** diferença entre a carga de velocidade do fluido nos reservatórios de sucção e recalque. Na prática, essa parcela pode ser desprezada

devido ao pequeno impacto na altura total (FRANK LAMBERTO LENGSEFELD; RONALDO DUARTE; CLAUDIO ALTIERI, 2003)

Assim, a altura manométrica total do sistema pode ser determinada pelas equações:

$$H_m = H_g + H_p + H_f + H_v \quad (3.16)$$

ou, considerando a altura manométrica de sucção (H_{ms}) e a altura manométrica de recalque (H_{mr}):

$$H_m = H_{mr} - H_{ms} \quad (3.17)$$

Para sistemas abertos, onde a carga de pressão é desprezível, a equação simplificada fica:

$$H_m = H_g - H_f \quad (3.18)$$

- *Determinação da altura de sucção (H_{ms})*

A altura manométrica de sucção representa a energia por unidade de peso disponível no flange de sucção da bomba. Seu cálculo pode ser feito por duas abordagens:

- 1) Aplicação do Teorema de Bernoulli entre a superfície livre do reservatório de sucção e o flange de sucção da bomba;
- 2) Medição direta da energia disponível no flange de sucção (FRANK LAMBERTO LENGSEFELD; RONALDO DUARTE; CLAUDIO ALTIERI, 2003)

Utilizando Bernoulli:

$$H_{ms} = \frac{P_s}{\gamma} + Z_s + \frac{V_s^2}{2g} - H_{fs} \quad (3.19)$$

onde:

P_s = pressão no reservatório de sucção [Pa];

Z_s = cota do nível do líquido no reservatório de sucção [m];

V_s = velocidade do fluido na sucção [m/s];

g = aceleração da gravidade [m/s²];

H_{fs} = perdas de carga na sucção [m].

- *Determinação da altura de descarga (H_m)*

A altura manométrica de recalque representa a energia que deve estar disponível no flange de recalque para que o fluido atinja o ponto final de recalque com as condições exigidas de vazão e pressão.

Analogamente ao cálculo da altura de sucção, pode-se aplicar o Teorema de Bernoulli entre o flange de recalque e a superfície livre do reservatório de recalque:

$$H_{mr} = \frac{P_r}{\gamma} + Z_r + \frac{V_r^2}{2g} - H_{fr} \quad (3.20)$$

onde:

P_r = pressão no reservatório de recalque [Pa];

Z_r = cota do nível do líquido no reservatório de recalque [m];

V_r = velocidade do fluido no recalque [m/s];

H_{fr} = perdas de carga no recalque [m].

- *Cálculo da Altura Manométrica Total*

A altura manométrica total do sistema pode ser expressa como:

$$H_m = H_{mr} - H_{ms} \quad (3.21)$$

ou, substituindo as equações anteriores:

$$H_{ms} = \left(\frac{P_r}{\gamma} + Z_r + \frac{V_r^2}{2g} - H_{fr} \right) - \left(\frac{P_s}{\gamma} + Z_s + \frac{V_s^2}{2g} - H_{fs} \right) \quad (3.22)$$

Se o sistema for aberto, onde as pressões nos reservatórios são aproximadamente iguais e desprezíveis, a equação pode ser simplificada para:

$$H_m = H_g + H_f \quad (3.23)$$

Essa equação destaca a importância das perdas de carga na definição da altura manométrica total do sistema e, consequentemente, na seleção adequada da bomba.

3.3.4 Construção da curva do sistema e ponto de operação

A curva do sistema representa a variação da altura manométrica total (H_m) em função da vazão (Q), ou seja, a quantidade de energia por unidade de peso que o sistema requer em diferentes condições operacionais. Essa curva é essencial para analisar sistemas que envolvem:

- Associações de bombas (séries ou paralelas);
- Variações nos níveis dos reservatórios ao longo do tempo;
- Sistemas com vazões variáveis devido a demandas flutuantes (Falco; Mattos, 1998)

3.3.4.1 Procedimento para Obtenção da Curva do Sistema

O método para traçar a curva do sistema consiste nos seguintes passos:

- 1) Definir valores arbitrários de vazão:
 - a) Devem ser escolhidos cerca de seis valores de vazão, incluindo:
 - i) Vazão zero (condição de shut-off);
 - ii) Vazão de projeto (ponto de operação desejado);
 - iii) Duas vazões abaixo da vazão de projeto;
 - iv) Duas vazões acima da vazão de projeto (Falco; Mattos, 1998).
- 2) Calcular a altura manométrica total (H_m) para cada vazão, utilizando a equação:

$$H_m = H_g + H_f \quad (3.24)$$

onde:

H_g = altura geométrica [m];

H_f = perdas de carga totais no sistema [m].

- 2) Construir a curva do sistema:
 - a) Após calcular os pares (Q, H) para cada ponto, os dados são plotados em um gráfico $H \times Q$.
 - b) A curva do sistema geralmente tem um comportamento parabólico, pois as perdas de carga variam aproximadamente com o quadrado da vazão.

A 6 ilustra um exemplo típico da curva do sistema.

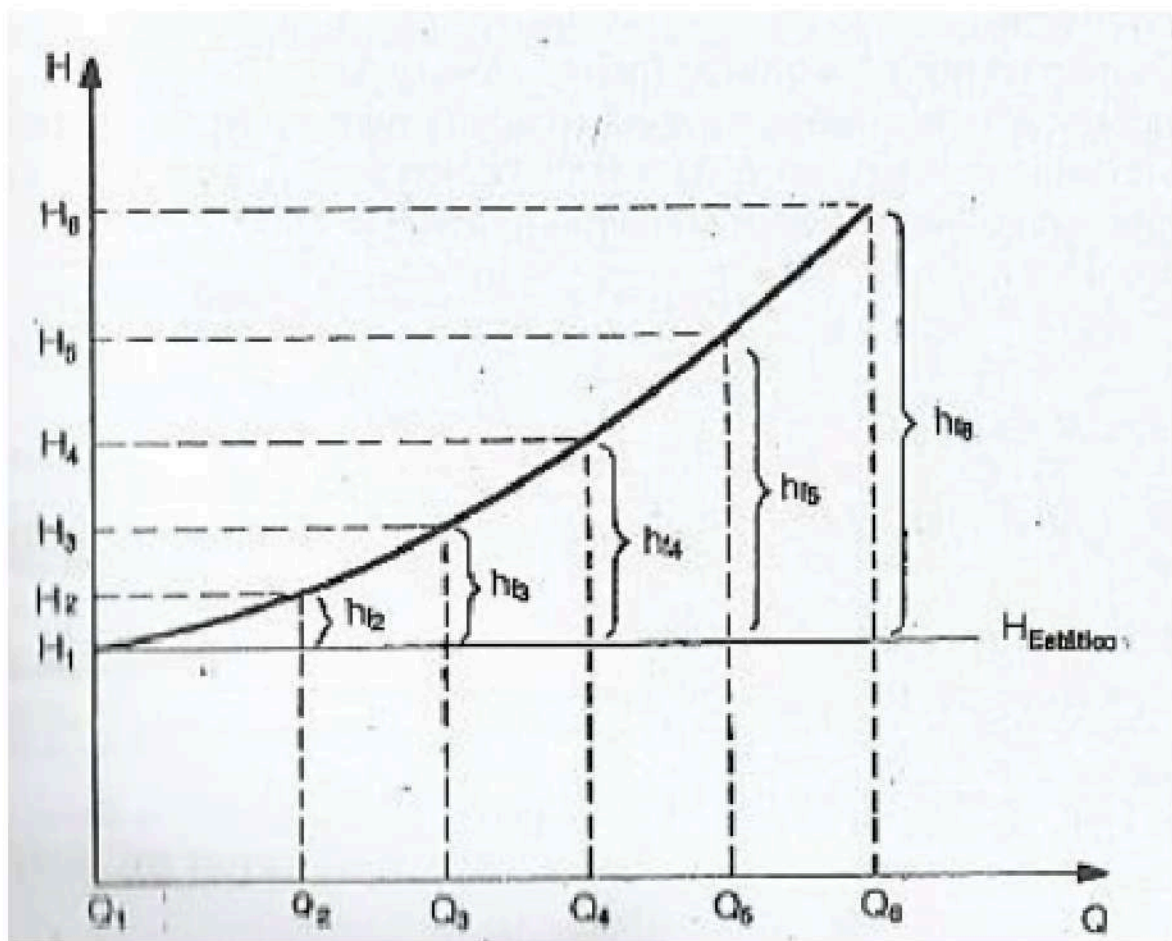


Figura 6 – Curva de Sistema

(Reinaldo De Falco, Edason Ezequiel De Mattos, 1998)

3.3.4.2 Determinação do Ponto de Trabalho

O ponto de trabalho é determinado pela interseção da curva característica da bomba com a curva do sistema. Essa interseção representa as condições reais de operação do sistema, indicando a vazão e a altura manométrica fornecidas pela bomba.

- Se a curva do sistema muda (por exemplo, devido a variações nos níveis dos reservatórios ou aumento das perdas de carga), o ponto de operação também se desloca.
- O ponto de trabalho ideal deve garantir que a bomba opere com eficiência máxima, evitando cavitação e consumo excessivo de energia.

A 7 apresenta um exemplo da interseção das curvas, determinando o ponto de trabalho.

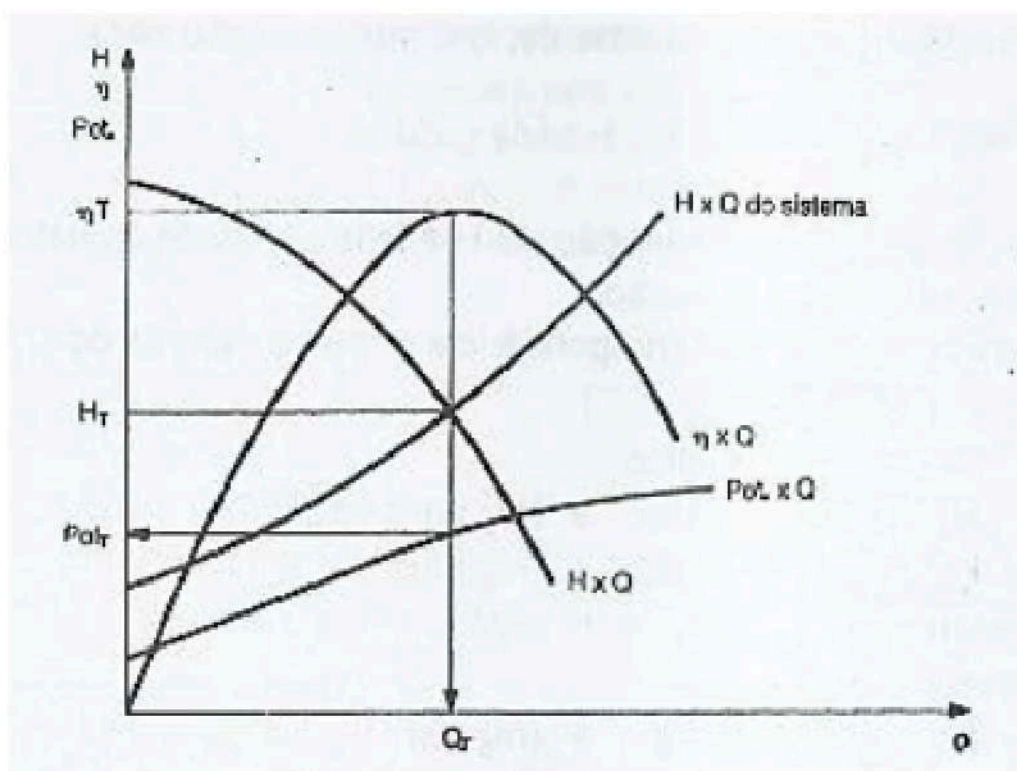


Figura 7 – Ponte de Trabalho

(Reinaldo De Falco, Edason Ezequiel De Mattos, 1998)

3.4 Curvas Características das Bombas

Cada bomba possui uma curva característica ou curva de performance, fornecida pelo fabricante. Essas curvas são obtidas considerando o bombeamento de água em um único estágio e podem necessitar de correções caso o fluido bombeado tenha uma viscosidade diferente da água.

A partir dessas curvas, é possível determinar três principais parâmetros operacionais:

- **Vazão (Q);**
- **Potência (P);**
- **Eficiência (η | *eta*).**

Essas informações são essenciais para identificar o ponto de operação da bomba dentro de um sistema (FERREIRA FILHO; RODRIGUES, 2003)

As curvas mais comuns são:

- Curva de Head (Altura Manométrica) x Vazão;
- Curva de Potência Absorvida x Vazão;

- Curva de Eficiência x Vazão;
- Curva de NPSH Requerido x Vazão.

3.4.1 Relação entre altura manométrica e vazão

A altura manométrica total (H), ou head, representa a energia por unidade de massa que a bomba fornece ao fluido para uma determinada vazão (Falco; Mattos, 1998)

Na teoria, a carga fornecida ao líquido varia linearmente com a vazão, resultando em uma curva teórica reta. No entanto, na prática, ocorrem diversas perdas hidráulicas devido a:

- **Atrito interno** do fluido;
- **Choques e turbulência** dentro da bomba;
- **Interações entre o rotor e a carcaça.**

Por isso, a curva real da bomba apresenta um comportamento não linear (FERREIRA FILHO; RODRIGUES, 2003), conforme ilustrado na 8

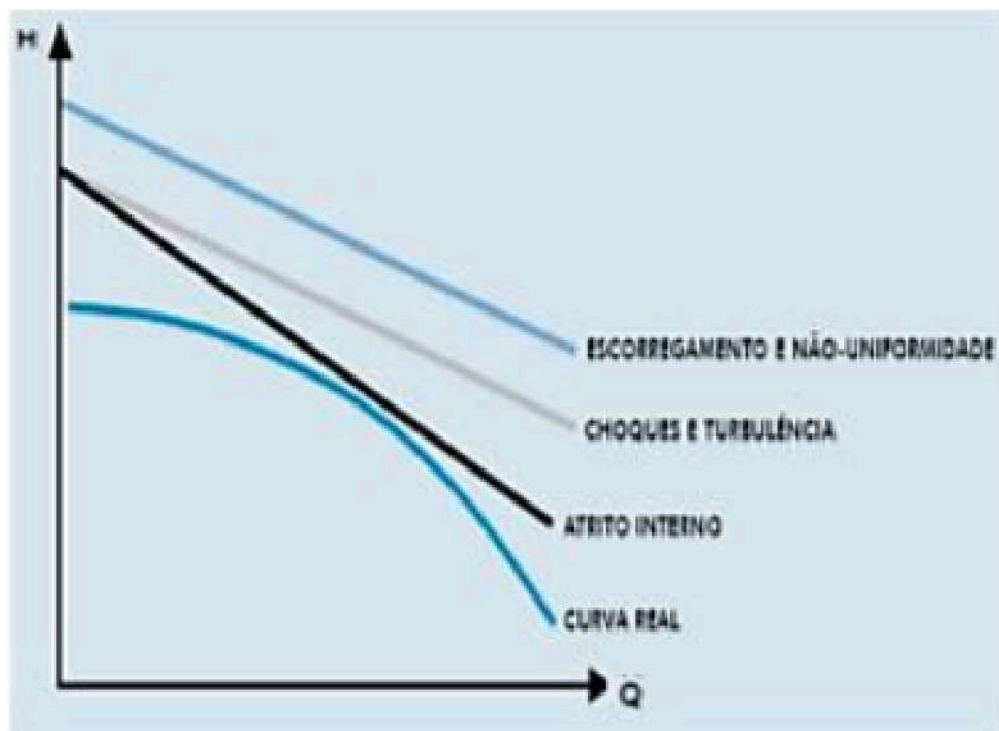


Figura 8 – Altura Manométrica (curva Head) x (Vazão)
(FERREIRA FILHO, J., RODRIGUES, R. C, 2003)

3.4.2 Potência absorvida pela bomba em função da vazão

A potência absorvida (P) pela bomba é fornecida pelo fabricante e representa a quantidade de energia elétrica consumida para operar a bomba (Falco; Mattos, 1998)

A relação entre potência, vazão e altura manométrica é expressa por:

$$Pot_{abs} = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot h}{\eta} \quad (3.25)$$

P = potência absorvida [W];

ρ = massa específica do fluido [kg/m³];

g = aceleração da gravidade [m/s²];

Q = vazão [m³/s];

H = altura manométrica total (head) [m];

η = eficiência da bomba [adimensional].

A 9 apresenta a curva típica de potência absorvida em função da vazão, obtida a partir de testes em bancada pelo fabricante

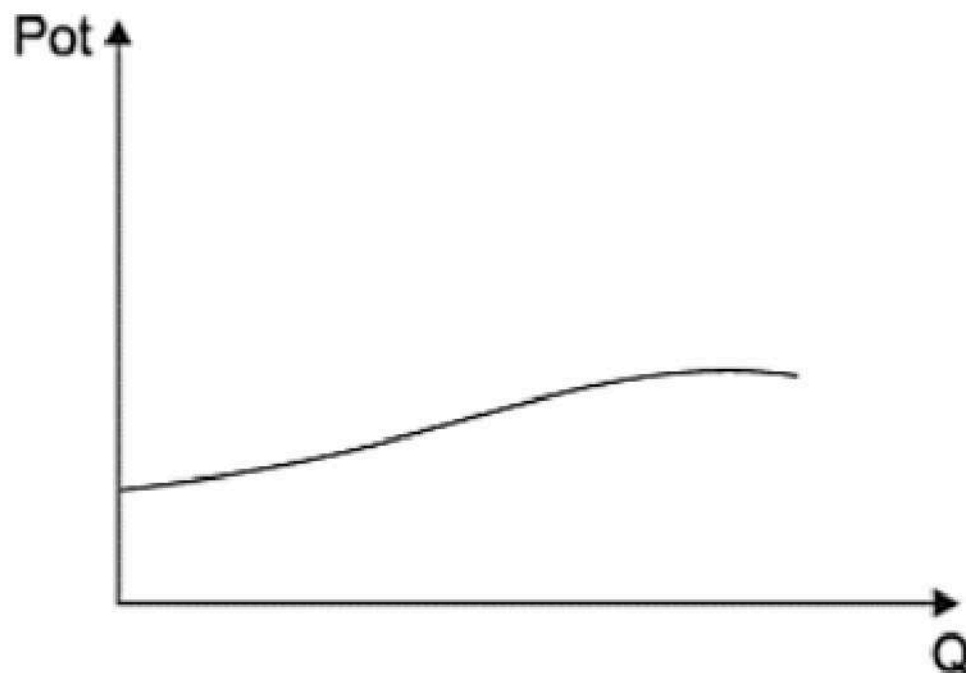


Figura 9 – Curva Potência Absorvida x Vazão
(Reinaldo De Falco, Edason Ezequiel De Mattos, 1998)

3.4.3 Eficiência da bomba e seu comportamento operacional

A eficiência total da bomba (η_{total}) representa a fração da energia fornecida ao fluido em relação à energia consumida pela bomba. É determinada pela equação:

$$\eta = \frac{Pot_{util}}{Pot_{abs}} \quad (3.26)$$

onde:

η = eficiência total da bomba [adimensional];

Pot_{util} = potência hidráulica efetivamente transmitida ao fluido [W];

Pot_{abs} = potência elétrica consumida pela bomba [W].

A curva de eficiência permite identificar a faixa ideal de operação da bomba, que é a região de maior eficiência energética. A 10 ilustra essa relação.

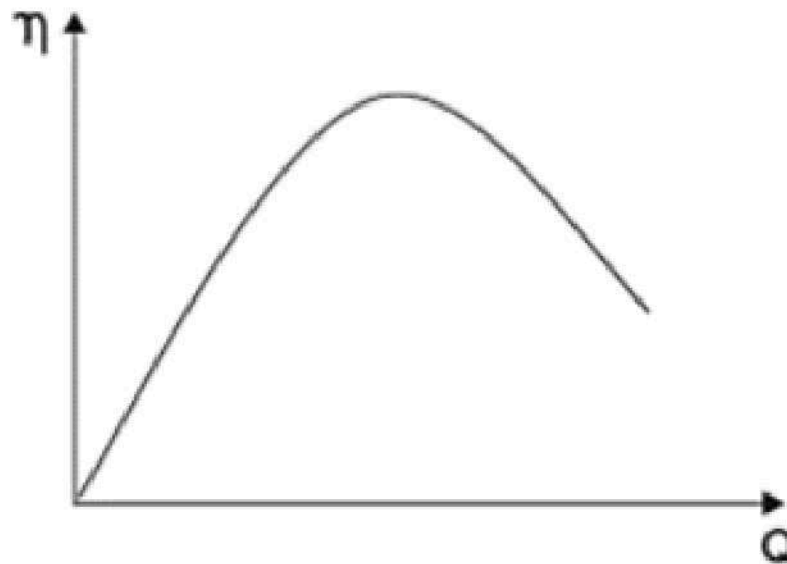


Figura 10 – Curva Eficiência x Vazão
(Reinaldo De Falco, Edason Ezequiel De Mattos, 1998)

3.4.4 Curva NPSH Requerido x Vazão

O NPSH Requerido (Net Positive Suction Head – $NPSH_{req}$) é a pressão mínima que deve estar disponível na sucção da bomba para evitar cavitação.

Ele é determinado por meio de testes de bancada realizados pelo fabricante (Falco; Mattos, 1998) A 11 ilustra a relação entre $NPSH_{req}$ e a vazão.

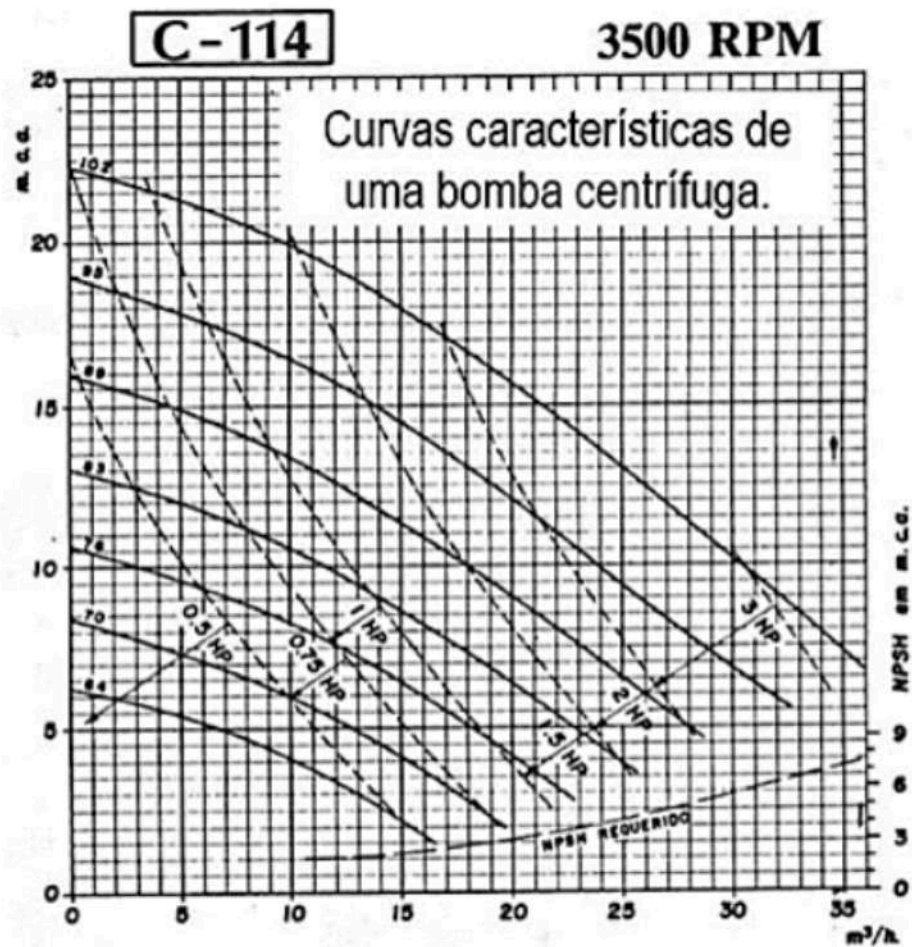


Figura 11 – Curva de NPSH Requerido x Vazão
(Reinaldo De Falco, Edason Ezequiel De Mattos, 1998)

3.5 Fatores que influenciam as Curvas Características

3.5.1 Variação do Diâmetro do Rotor

A modificação do diâmetro do rotor pode ocorrer por substituição ou usinagem do componente para reduzir seu diâmetro externo. Essa adaptação permite ajustar a curva característica da bomba ao ponto de operação desejado. Para cada modelo de bomba, há uma série de rotores disponíveis com diferentes diâmetros, possibilitando uma adequação mais precisa ao sistema (Falco; Mattos, 1998)

A relação matemática para estimar as novas condições de operação é dada por:

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{D_2}{D_1}$$

$$\frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^2 \quad (3.27)$$

Onde:

H_2, H_1 = Alturas manométricas inicial e final

Q_2, Q_1 = Vazões inicial e final

D_2, D_1 = Diâmetros do rotor inicial e final

3.5.2 Variação da Rotação do Rotor

A alteração da rotação do rotor afeta diretamente as curvas de altura manométrica e vazão, sendo um método eficiente para adequar a capacidade da bomba às necessidades do sistema. Esse ajuste pode ser realizado por meio de inversores de frequência, proporcionando maior controle sobre o desempenho da bomba (Falco; Mattos, 1998)

A relação matemática que descreve essa variação é:

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 \quad (3.28)$$

$$\frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 \quad (3.29)$$

$$\sqrt[3]{\frac{Pot_2}{Pot_1}} = \sqrt[3]{\frac{N_2}{N_1}} \quad (3.30)$$

Onde:

- N_1, N_2 = Rotações inicial e final do rotor
- Pot_1, Pot_2 = Potências inicial e final

Essa técnica é amplamente utilizada para otimizar o consumo energético e aumentar a vida útil da bomba, reduzindo esforços mecânicos e minimizando perdas hidráulicas.

3.5.3 Variação nas Propriedades do Fluido

As propriedades físicas do fluido, como a massa específica, influenciam diretamente no desempenho da bomba. Embora a variação da densidade não altere a energia hidráulica transferida ao fluido, ela impacta diretamente na potência absorvida pela bomba (Falco; Mattos, 1998)

A potência necessária para o bombeamento de um fluido com densidade diferente pode ser estimada por:

$$P_2 = P_1 \cdot \left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right) \quad (3.31)$$

Onde:

- P_2, P_1 = Potências inicial e final
- ρ_2, ρ_1 = Massas específicas inicial e final do fluido

Fluidos mais densos exigem maior potência para serem bombeados, o que pode impactar no dimensionamento do motor e na eficiência operacional do sistema.

3.5.4 Ponto de Melhor Eficiência (BEP – Best Efficiency Point)

O ponto de melhor eficiência (BEP) é a condição operacional em que a bomba atinge seu maior rendimento, convertendo a maior parte da energia mecânica em energia hidráulica. Esse ponto ocorre em uma vazão específica onde as forças hidráulicas ao redor do rotor estão mais balanceadas, reduzindo desgastes e aumentando a vida útil do equipamento.

A maioria das bombas centrífugas de estágio único apresenta o BEP entre 70% e 85% da vazão máxima. Operar longe desse ponto reduz a eficiência, aumenta vibrações e esforços mecânicos no eixo da bomba, podendo levar a falhas prematuras (HENN, 2012). A identificação e o controle da operação próxima ao BEP são fundamentais para maximizar a eficiência e reduzir custos operacionais do sistema de bombeamento.

3.6 Seleção e Operação de Bombas

3.6.1 Critérios para escolha da bomba ideal para cada aplicação

De acordo com (Falco; Mattos, 1998) a seleção de uma bomba inicia-se pela definição das condições operacionais do sistema de bombeamento, incluindo:

- Vazão requerida;
- Pressão de sucção;
- Pressão de descarga ou recalque;
- Altura manométrica total;
- Tipo de fluido bombeado;
- Temperatura do fluido;
- Outras condições específicas do sistema.

Após a definição dessas variáveis, elabora-se a curva do sistema, que considera a altura manométrica total estática e a altura manométrica dinâmica em função das perdas de carga. Com essas informações, é possível selecionar o modelo da bomba a partir de uma

carta de seleção de bombas. Em seguida, define-se o diâmetro do rotor, o NPSH requerido e a potência necessária para que a bomba opere dentro das condições estabelecidas.

3.6.2 Modos de operação e ajustes para eficiência energética

Um sistema de bombeamento pode operar com uma única bomba, desde que esta atenda à altura manométrica de recalque e à vazão desejada. No entanto, quando as características do sistema exigem capacidades superiores, torna-se necessário o uso de duas ou mais bombas operando simultaneamente. Essas podem ser dispostas em:

- **Série:** para aumentar a altura manométrica total;
- **Paralelo:** para aumentar a vazão disponível.

Ambas as configurações são utilizadas de acordo com as necessidades específicas do sistema (Falco; Mattos, 1998)

3.6.3 Fenômeno da cavitação e análise do NPSH disponível

Se a pressão absoluta em qualquer ponto do sistema de bombeamento atingir um valor igual ou inferior à pressão de vapor do líquido na temperatura de bombeamento, ocorrerá a vaporização parcial do fluido, formando bolhas de vapor. Caso essas bolhas sejam transportadas para uma região onde a pressão seja superior à pressão de vapor, elas colapsam abruptamente, gerando ondas de choque. Esse fenômeno é conhecido como cavitação (Falco; Mattos, 1998)

Os principais inconvenientes da cavitação são:

- Ruído excessivo;
- Vibração da bomba;
- Alteração das curvas características;
- Danificação de componentes internos.

Para evitar esse problema, é fundamental garantir uma boa aspiração do fluido. Para isso, utiliza-se o conceito de NPSH (Net Positive Suction Head), que representa a energia disponível para que o líquido entre na bomba sem cavitatar. Esse parâmetro é dividido em:

- NPSH disponível: característica da instalação, calculada por:

$$NPSH_{disp} = P_{atm} \pm H_{suc} - P_{vap} - h_f \quad (3.32)$$

Onde:

P_{atm} = Pressão atmosférica (m de coluna de água);

H_{suc} = Altura geométrica de sucção (m);

P_{vap} = Pressão de vapor do fluido (m de coluna de água);

h_f = Perda de carga na tubulação de sucção (m).

Os valores de pressão de vapor e pressão atmosférica são tabelados, como demonstrado nas 6 e 7.

Tabela 6 – Valores de Pressão de Vapor e peso da água em função da temperatura

t (°C)	p (kgf/m ²)	p (kPa)	γ (kgf/m ³)
15	174	1,707	999
20	238	2,335	998
25	322	3,159	997
30	429	4,208	996
35	572	5,611	994
40	750	7,358	992
45	974	9,555	990
50	1255	12,312	988
55	1602	15,716	985
60	2028	19,895	983
65	2547	24,986	981
70	3175	31,147	978
75	3929	38,543	975
80	4828	47,363	972
85	5894	57,820	970
90	7149	70,132	965
95	8620	84,562	962
100	10333	101,367	958
105	12320	120,859	955
110	14609	143,314	951

(HENN, E. A. L (2012))

Tabela 7 – Pressão Atmosférica

Altitude em Relação ao Mar (metros)	0	150	300	450	600	750	1.000	1.250	1.500	2.000
Pressão Atmosférica (mca)	10,33	10,16	9,98	9,79	9,58	9,35	9,12	8,83	8,64	8,08

(HENN, E. A. L (2012))

- NPSH requerido: determinado pelo fabricante, indica a pressão mínima necessária na sucção da bomba para evitar a cavitação. O NPSH requerido é obtido a partir da curva fornecida pelo fabricante em função da vazão.

Para evitar a cavitação, o NPSH disponível deve ser maior que o NPSH requerido. Na prática, adota-se uma margem de segurança de pelo menos 0,6 m (Falco; Mattos, 1998)

4 METODOLOGIA

No primeiro projeto, realizamos um estudo de caso baseado no sistema de tratamento de água do Bioparque, onde foi analisado o desempenho da bomba Sodramar BM100 de 1 CV no abastecimento de um tanque de 15.200 litros (15,2 m³). O objetivo foi avaliar a eficiência do sistema de filtração e propor melhorias para otimizar o desempenho, considerando as alturas manométricas e as características dos filtros utilizados.

Estudo de Caso: Tratamento de Água do Bioparque com Ozônio e UV

No bioparque, uma bomba de 1 CV abastece um tanque de 15.200 L com água proveniente de um lago ornamental, que sofre acúmulo de matéria orgânica, fezes de animais, folhas e partículas em suspensão.

A bomba instalada é centrífuga, com potência de 1 CV, e apresenta desempenho adequado para a aplicação. No entanto, o sistema não conta com redundância (bomba reserva), representando um risco de interrupção total em caso de falha.

Tabela 8 – Dados Técnicos do Sistema Existente no Bioparque

Item	Valor
Tipo de bomba	Centrífuga monofásica
Potência da bomba	1 CV
Tensão elétrica	220 V
Vazão média estimada	2,3 m ³ /h (0,64 L/s)
Altura manométrica total (HMT)	13,8 metros
Comprimento da tubulação	240 metros
Diâmetro da tubulação	1" (25 mm)
Reservatório abastecido	15.000 litros (PVC elevado)
Altura do reservatório	4 metros
Fonte de captação	Rio (água limpa)
Sistema de tratamento	Filtro de areia, ozônio, UV
Potência estimada requerida	0,34 kW (0,45 CV)
Eficiência operacional	Operando com folga
Redundância	Não possui
Risco operacional	Interrupção total em falha

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apesar da bomba operar com folga suficiente para atender à demanda de altura e vazão do sistema, o estudo identificou pontos críticos relacionados à confiabilidade e manutenção:

- A bomba atende perfeitamente à altura manométrica total de 12 metros, mantendo vazão constante e estável.
- A água captada é limpa, reduzindo o risco de entupimento e desgastes por partículas abrasivas.
- Não há bomba reserva nem linha de redundância. Isso significa que qualquer falha exige a paralisação total do sistema até o reparo.
- O sistema também não possui sensores de pressão ou vazão, dificultando o monitoramento proativo de obstruções ou falhas.

Aplicação no Sistema Projetado para Gana

Com base nas limitações identificadas neste sistema, o projeto de tratamento de água para Gana foi elaborado com as seguintes melhorias:

- Instalação de duas bombas em paralelo, operando com controle alternado ou simultâneo (em horários de pico).
- Sistema com bypass e válvulas de retenção, permitindo manutenção sem parada total.

Essas medidas visam aumentar a confiabilidade, reduzir a necessidade de intervenção técnica frequente e garantir o abastecimento contínuo para uma comunidade de até 1.000 pessoas.

Amostras Coletadas:

Foram coletadas 3 amostras em dias distintos, antes e depois do tratamento com ozônio e UV. A água passou por um pré-filtro de areia, seguido por injeção de ozônio e desinfecção por radiação UV.

Tabela 9 – Comparação dos resultados d'água após passar pelo ozônio e UV

Parâmetro	Antes do Tratamento	Após Ozônio + UV	Redução (%)
Turbidez (NTU)	28 – 33 NTU	2 – 3 NTU	~91% ↓
Coliformes fecais (NMP/100mL)	>2400	<1	~100% ↓
E. coli (NMP/100mL)	800 – 1100	<1	~100% ↓
Matéria orgânica (DQO)	120 – 140 mg/L	35 – 40 mg/L	~71% ↓
Oxigênio dissolvido (mg/L)	2,4 – 2,8 mg/L	6,0 – 6,5 mg/L	~135% ↑
Cor aparente (uH)	120 – 160 uH	15 – 20 uH	~87% ↓

Autor (2025)

Interpretação dos Resultados:

- A radiação UV foi eficaz na destruição de microrganismos patogênicos, com eliminação de 100% dos coliformes fecais e E. coli.
- O ozônio oxidou matéria orgânica, reduziu cor e aumentou o oxigênio dissolvido, promovendo uma água mais limpa e inodora.
- A turbidez residual ficou abaixo dos limites da Portaria GM/MS nº 888/2021, garantindo qualidade visual e microbiológica da água.

Conclusão da Situação:

Este estudo comprova que a combinação de ozônio e radiação UV, aplicada após filtração em areia, é altamente eficaz no tratamento de águas superficiais contaminadas por matéria orgânica e esgoto de origem natural (como acontece no bioparque).

A tecnologia é adequada, sustentável, e replicável, podendo ser utilizada também em áreas remotas como Bonsa, Gana — com resultados esperados semelhantes.

Agora, no segundo projeto, aplicaremos os princípios estudados para dimensionar um sistema de filtração para a distribuidora nacional de água em Gana que realizará a distribuição da água de um do abastecimento para o povo. O sistema será projetado com duas bombas em paralelo para captar a água do rio até o primeiro tanque, onde ocorrerá o processo de coagulação. Em seguida, duas bombas adicionais serão responsáveis por transportar a água para passar por um conjunto de filtros, composto por dois filtros de areia, dois filtros de carvão ativado, quatro filtros UV e um painel de ozônio. Todo o sistema de filtragem será dimensionado para garantir que os equipamentos sejam adequados às necessidades do projeto.

Após o tratamento, a água será direcionada para um tanque final, de onde será distribuída para a população. Além do dimensionamento do sistema, realizaremos uma análise comparativa entre o sistema projetado, o sistema do Bioparque e outros modelos já implementados no país, buscando validar a eficiência da solução proposta e identificar oportunidades de otimização.

Estudo de Caso: Comunidade de Bonsa – Gana

A comunidade de Bonsa, localizada em Gana, enfrenta há anos um grave problema de contaminação das fontes de água devido à mineração ilegal, prática conhecida localmente como *galamsey*. Essa atividade causa a presença de metais pesados na água do rio chamado Rio Bonsa, tornando-a imprópria para o consumo humano. Recentemente, o governo ganês interveio de forma mais rígida para interromper a mineração clandestina na região, abrindo espaço para iniciativas de recuperação ambiental. Uma universidade local realizou um estudo que conseguiu remover os metais pesados da água, porém ainda não foi definida uma solução acessível e sustentável para manter a água potável de forma contínua e segura para a população local, estimada entre 800 a 900 habitantes.

Neste contexto, foi lançado um desafio pela distribuidora nacional de água do país para encontrar propostas viáveis de tratamento de água. A solução proposta neste trabalho visa atender a essa demanda por meio de uma tecnologia de baixo custo, sustentável e livre de químicos artificiais, utilizando recursos naturais e métodos consagrados de filtração. Considerando que a área disponível para a instalação do sistema é uma terra plana e desobstruída, não haverá a necessidade de realizar escavações complexas, desviar tubulações, nem contornar edificações existentes. Essa condição topográfica favorável permite a implantação direta da estrutura, otimizando tempo e recursos. Além disso, está prevista a construção de uma estrada de recalque com aproximadamente 2 km de extensão, ligando a captação ao primeiro tanque de armazenamento, garantindo a viabilidade logística e operacional do sistema. Com isso a minha proposta como engenheiro contempla:

- A aplicação de sementes de moringa (*Moringa oleífera*) e limão como agentes naturais de coagulação e floculação, promovendo a aglutinação de partículas e facilitando a decantação;
- A adoção de um sistema de filtração por camadas, composto por filtros de areia e carvão ativado, seguidos de tecnologias modernas como radiação ultravioleta (UV) e um sistema de ozonização por painel solar, garantindo a desinfecção da água sem a necessidade de produtos químicos perigosos;
- A viabilidade de operação com baixo consumo energético e manutenção simplificada, ideal para contextos de comunidades com infraestrutura limitada.

Esta abordagem busca não apenas restaurar a qualidade da água, mas oferecer à comunidade de Bonsa uma alternativa segura, acessível e replicável, contribuindo para a saúde pública e o desenvolvimento sustentável da região.

4.1 Dimensionamento dos Filtros de Areia e Carvão Ativado

Para garantir a eficiência na remoção de turbidez e compostos orgânicos, o dimensionamento dos filtros de areia e carvão ativado foi realizado considerando a taxa de filtração adequada para cada meio filtrante.

A seleção da velocidade de filtração seguiu valores recomendados na literatura para cada tipo de meio filtrante. Para filtros de areia, adotam-se taxas entre 10 e 20 m/h, enquanto para filtros de carvão ativado, a faixa recomendada é de 5 a 15 m/h.

4.1.1 Considerações sobre o Sistema de Retro lavagem dos Filtros

Para garantir a manutenção do desempenho dos filtros de areia e carvão ativado, foi prevista a implementação de um sistema de retro lavagem. Esse sistema permite a remoção das partículas acumuladas nos meios filtrantes, prolongando a vida útil e garantindo a eficiência da filtração. A retro lavagem é realizada por meio da inversão do fluxo de água e pode ser automatizada com o uso de válvulas de controle.

4.1.2 Dimensionamento do Sistema de Desinfecção por Ultravioleta (UV)

A radiação ultravioleta (UV) é amplamente utilizada para desinfecção da água, eliminando microrganismos patogênicos sem a adição de produtos químicos.

A dose de radiação UV foi selecionada conforme os padrões para desinfecção de água potável. Conforme a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (U.S. Environmental Protection Agency (EPA)), a dose mínima eficaz para inativação de vírus, bactérias e protozoários é de 40 mJ/cm² (Gulliford, 2006)

4.1.3 Dimensionamento do Sistema de Ozonização

A aplicação de ozônio no tratamento da água tem como objetivo a desinfecção e a remoção de compostos orgânicos. O dimensionamento do sistema de ozonização foi realizado considerando a demanda de ozônio necessária para a água a ser tratada.

A concentração de ozônio utilizada foi definida com base nas recomendações para desinfecção de água potável. De acordo com a Organização Mundial da Saúde (OMS), a dosagem recomendada de ozônio para tratamento de água potável varia entre 0,4 e 0,6 mg/L, com um tempo de contato de pelo menos 4 minutos para garantir eficiência microbiológica e oxidativa (WHO, 2011).

A dose de radiação UV foi selecionada conforme os padrões para desinfecção de água potável. De acordo com a U.S. Environmental Protection Agency (EPA), a dose mínima eficaz para inativação de vírus, bactérias e protozoários é de 40 mJ/cm² (EPA, 2006).

4.2 Considerações sobre a Operação Contínua do Sistema

O sistema de tratamento de água foi projetado para operar 24 horas por dia, garantindo um abastecimento contínuo para a comunidade. A captação da água do rio ocorre diretamente por bombeamento para um primeiro tanque, onde ocorre a coagulação e floculação. Em seguida, duas bombas operam em paralelo para transferir a água do tanque de coagulação para os filtros e posteriormente para o reservatório final de distribuição. A redundância no bombeamento assegura a operação contínua em caso de falha de um dos equipamentos.

A distância entre a captação e o primeiro tanque é um fator determinante para a configuração do sistema, sendo analisadas soluções para reduzir os custos energéticos, incluindo o uso de gravidade sempre que possível. O dimensionamento das bombas e das tubulações foi realizado considerando as perdas de carga e a eficiência energética, garantindo um sistema otimizado para a vazão necessária.

4.2.1 Perda de Carga no Sistema de Bombeamento

A perda de carga em sistemas hidráulicos representa a resistência ao escoamento da água devido ao atrito com as paredes da tubulação e às perdas localizadas em conexões, válvulas e equipamentos. Essa resistência influencia diretamente a potência necessária das bombas para garantir a vazão desejada.

Segundo a literatura técnica, a perda de carga total pode ser classificada da seguinte forma:

- Baixa (0 a 10 m): sistema eficiente, menor consumo energético;
- Média (10 a 25 m): requer bombas mais potentes, custo operacional moderado;
- Alta (25 a 50 m): aumento do consumo energético, risco de cavitação e necessidade de bombas robustas;
- Muito Alta (acima de 50 m): inviável em muitos casos, devido ao elevado desgaste e consumo energético (BANSAL, 2018)

Para minimizar perdas excessivas, é recomendável otimizar o sistema por meio de:

- 1) Aumento do diâmetro das tubulações, reduzindo a velocidade do fluxo e, consequentemente, a perda de carga;

- 2) Escolha de materiais com menor rugosidade interna, como PVC ou aço inoxidável, em vez de ferro galvanizado;
- 3) Minimização de conexões e válvulas desnecessárias, além do uso de cotovelos de 45° em vez de 90° para suavizar o escoamento;
- 4) Uso de filtros e equipamentos em paralelo, quando possível, para dividir a vazão e reduzir a perda total (ASHRAE, 2016)(CIBSE, 2015)

Conforme a norma (TÉCNICAS, 2020) recomenda-se que a perda de carga total não ultrapasse 30 a 40 m, a fim de garantir a eficiência energética e a vida útil do sistema de bombeamento.

4.2.2 Cálculo da Altura Manométrica Total (H_m)

A altura manométrica total (H_m) representa a energia que a bomba precisa fornecer ao fluido para vencer todas as resistências do sistema e garantir o transporte adequado da água. Sua expressão geral é:

$$H_m = H_g + h_f + h_l \quad (4.1)$$

Onde:

H_g = altura geométrica entre o nível de sucção e o ponto de recalque (m);

h_f = perdas de carga distribuídas (m);

h_l = perdas de carga localizadas (m).

Esse cálculo é essencial para determinar se a bomba possui capacidade suficiente para atender à demanda ou se são necessárias modificações no sistema.

4.2.3 Cálculo do NPSH – Garantia de Operação sem Cavitação

A cavitação ocorre quando a pressão no lado de sucção da bomba cai abaixo da pressão de vapor do líquido, formando bolhas que implodem e podem danificar a bomba. Para evitar esse problema, o cálculo do NPSH (Net Positive Suction Head) é fundamental.

Existem dois valores a serem comparados:

- NPSH Disponível (NPSH_d): refere-se à energia disponível no lado de sucção da bomba, calculado por:

$$NPSH_d = \frac{P_{atm} - P_v}{\rho g} + \frac{V_s^2}{2g} - h_s \quad (4.2)$$

Onde:

P_{atm} = pressão atmosférica (Pa);

P_v = pressão de vapor do líquido (Pa);

ρ = densidade do fluido (kg/m^3);

g = aceleração da gravidade (m/s^2);

V_s = velocidade na tubulação de sucção (m/s);

h_s = perdas na linha de sucção (m).

- NPSH Requerido (NPSH_r): é um valor fornecido pelo fabricante da bomba, indicando a mínima energia necessária para evitar cavitação.

A condição de segurança para evitar cavitação é:

$$NPSH_d > NPSH_r \quad (4.3)$$

Se essa condição não for atendida, será necessário modificar a instalação, reduzindo as perdas na sucção (tubulações mais curtas, maior diâmetro) ou reavaliando a altura de instalação da bomba.

4.2.4 Cálculo da Potência da Bomba

Para garantir que a bomba tenha potência suficiente para o bombeamento, calcula-se a potência hidráulica (P_h) e a potência útil da bomba (P_u), considerando a eficiência do equipamento:

$$P_h = \rho g Q H_m \quad (4.4)$$

$$P_u = \frac{P_h}{\eta} \quad (4.5)$$

Onde:

- Q = vazão volumétrica (m^3/s);
- η = eficiência da bomba.

Esse cálculo permitirá verificar se a bomba do estudo de caso tem potência suficiente para a operação ou se precisará de ajustes.

4.3 Importância da Análise Comparativa

Após obter os valores das perdas de carga, altura manométrica, NPSH e potência, será possível construir a curva do sistema e compará-la com a curva da bomba fornecida pelo fabricante. Essa análise permitirá verificar se a bomba atual é suficiente para a demanda

ou se necessita de ajustes, garantindo que o sistema opere de forma eficiente e segura, sem risco de cavitação ou desperdício energético.

Caso o sistema apresente ineficiências, algumas possíveis soluções incluem:

- Ajuste na altura de instalação da bomba para evitar cavitação;
- Redimensionamento das tubulações para reduzir perdas de carga;
- Seleção de uma bomba mais eficiente para minimizar consumo de energia.

Dessa forma, os cálculos apresentados são essenciais para garantir que o sistema hidráulico atenda às exigências operacionais de forma eficiente, econômica e segura, evitando falhas e prolongando a vida útil dos equipamentos.

4.4 Cálculos Hidráulicos (Do Rio até o Tanque 1) Passo a Passo e Seleção de bomba

- *Determinação da vazão*

Como nós precisamos que o nosso reservatório final esteja com 150m³, para poder abastecer o reservatório e abastecer o povo sem parar, decidimos a fazer o tanque 1 que receberá a água bruta do rio 300m³ sendo o dobro do reservatório final, assim para poder calcular a nossa vazão;

$$Q = \frac{\text{volume}}{\text{tempo}} \quad (4.6)$$

$$= \frac{300\text{L}}{8\text{h}} = 37\,500\text{L/h} = 10,42\text{L/s} = 35\text{m}^3/\text{h}$$

Como teremos 2 bombas funcionando em paralelo, a vazão será dividida entre as bombas então será 18,75m³/h para cada bomba.

- *A velocidade do escoamento*

Para um diâmetro de 160 mm (0,154m) diâmetro nominal:

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \quad (4.7)$$

$$= \frac{\pi(0,154)^2}{4} = 0,01863\text{m}^2$$

$$v = Q/A \quad (4.8)$$

$$= (0,0052083\text{m/s})/(0,01863\text{m}^2) = 0,28\text{m/s}$$

Velocidade média do fluido = 0,28m/s

- *Número de Reynolds*

Sendo $\nu = 1,14 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ viscosidade cinemática da água 20°C

$$Re = \frac{vD}{\nu} \quad (4.9)$$

$$= \frac{0,28 \cdot 0,154}{1,14 \times 10^{-6}} = 43\,061,40$$

Escoamento turbulento, pois, $Re > 4000$

- *Fator de Atrito*

Usando a fórmula do Churchill

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = \left[\left(\frac{8}{Re} \right)^{12} + \frac{1}{(A+B)^{3/2}} \right]^{1/12} \quad (4.10)$$

$$A = \frac{1}{\sqrt{f}} = -2,457 \cdot \ln \left[\left(\frac{7}{Re} \right)^{0,9} + \frac{0,27 \cdot \frac{\varepsilon}{D}}{1 + 10\sqrt{Re}} \right]$$

$$A = -2,457 \ln \left[\left(\frac{7}{42889,84} \right)^{0,9} + \left(\frac{0,27 \cdot \frac{0,000015}{0,154}}{1 + 10(42889,84)^{0,5}} \right) \right] = 3,6063 \times 10^{20}$$

$$B = \left(\frac{37,530}{Re} \right)^{16} \quad (4.12)$$

$$B = \left(\frac{37,530}{42889,84} \right)^{16} = 0,111813643$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = \left[\left(\frac{8}{42889,84} \right)^{12} + \frac{1}{(3,6063 \times 10^{20} + 0,111813643)^{3/2}} \right]^{1/12} = 0,02153$$

O fator de atrito adotado para os trechos de sucção e recalque foi considerado igual, visto que ambos utilizam tubulações do mesmo material, diâmetro e rugosidade, operando sob a mesma vazão e com escoamento plenamente turbulento. Nessas condições, o valor do número de Reynolds é semelhante nos dois trechos, o que justifica a adoção de um único valor de fator de atrito para ambos.

- *Perda de carga por atrito*

Perda de Carga por Atrito – Sucção

Depois foram calculadas as perdas lineares no trecho de sucção (do rio até a entrada da bomba).

Os principais parâmetros considerados foram:

- Comprimento total da linha de sucção (L);
- Diâmetro interno da tubulação (D);
- Velocidade média do fluido (v) calculada a partir da vazão e área da seção;

- Fator de atrito (f) obtido na aba anterior.

Usando a fórmula do Darcy-Weisbach;

Perda de carga na sucção;

$$h_{fs} = f \times \frac{L}{D} \times \frac{V^2}{2g} \quad (4.13)$$

$$0,02153 \times \frac{240,5}{0,154} \times \frac{0,28^2}{2 \times 9,81} = 0,133996147 \text{ m}$$

Altura da sucção(hs) é 8 m então o hmts = hs+hfs que no caso será

$$hmts = 8 + 0,13399 = 8,13 \text{ m}$$

Tabela 10 – Parâmetros da Sucção

Parâmetro Sucção	Valor	K	Ktotal	unid
Gravidade (g)	9,81	-	-	m/s ²
Densidade (ρ)	1000	-	-	kg/m ³
Viscosidade (μ)	0,001	-	-	Pa·s
Rugosidade (ϵ)	0,0000015	-	-	m
Vazão (Q) por bomba	0,00521	-	-	m ³ /s
Diametro (D)	0,154	-	-	m
Comprimento do tubo (160mm) - Leq	12	-	-	m
Curvas de 90° (PVC)	6	2,1	12,6	m
Registro globo aberto	3	56,7	170,1	m
Valvula de retenção	2	21,4	42,8	m
Pré-filtro	1	3	3	m
leqtotal suc	240,5			m
f(suc)	0,02153089			

Autor (2025)

Perda de carga no recalque:

$$h_{fr} = f \times \frac{L}{D} \times \frac{V^2}{2g} \quad (4.14)$$

$$0,2153 \times \frac{2197,6}{0,154} \times \frac{0,28^2}{2 \times 9,81} = 1,2220667149 \text{ m}$$

Tabela 11 – Parâmetros do recalque

Parâmetro recalque	Valor	K	Ktotal	unid
Gravidade (g)	9,81	-	-	m/s ²
Densidade (ρ)	1000	-	-	kg/m ³
Viscosidade (μ)	0,001	-	-	Pa·s
Rugosidade (ϵ)	0,0000015	-	-	m
Vazão (Q)	0,00521	-	-	m ³ /s
Diametro (D)	0,154	-	-	m
Comprimento do tubo (160mm) - Leq (recal)	2000	-	-	m
Curvas de 90° (PVC)	4	2,1	8,4	m
Registro Gaveta	2	56,7	113,4	m
Valvula de retenção	2	37,9	75,8	m
Pré-filtro	0	37,9	0	m
f(recal)	0,02153089			
leqtotal recal	2193,4			m

Autor (2025)

- *Perda de carga Localizado:*

Na sucção

$$h_{ls} = \frac{8 \sum K_i}{\pi^2} \cdot \frac{Q^2}{g} \quad (4.15)$$

= 0,332

No recalque

$$h_{lr} = \frac{8 \sum K_i}{\pi^2} \cdot \frac{Q^2}{g} \quad (4.16)$$

= 0,386

4.4.1 Comparação entre métodos de cálculo de perda de carga

Perdas de carga das 2 bombas usados para captação da água do rio.

Para o dimensionamento das perdas de carga em sistemas de bombeamento e adução de água, foram utilizadas três diferentes equações: Darcy-Weisbach, Hazen-Williams e Fair-Whipple-Hsiao. A seguir, é apresentada uma comparação gráfica entre as perdas estimadas por esses métodos para diferentes valores de vazão, mantendo fixos o diâmetro

da tubulação (160 mm), o comprimento da sucção 240,5 m e do recalque 2193,4 m e demais parâmetros operacionais.

Para validar os cálculos e garantir maior confiabilidade ao projeto, utilizou-se também o software Voima Toolbox, ferramenta voltada à hidráulica computacional, que permitiu a verificação dos resultados obtidos manualmente. As ??,45,46,47,48 mostram as telas de simulação com os valores calculados pelo software.

Em seguida, os valores de perda de carga foram organizados em uma tabela para cada vazão analisada.

Tabela 12 – Comparação das perdas de carga calculadas por diferentes métodos da bomba de captação do rio

<i>Vazão m³/s</i>	<i>PDC sucção Hazen- Williams</i>	<i>PDC sucção Darcy- Weisbach</i>	<i>PDC sucção Fair -Whipple</i>	<i>PDC recalque Darcy- Weisbach</i>	<i>PDC recalque Hazen- Williams</i>	<i>PDC recalque Fair -Whipple</i>
0	0,000	0,000	0,0000000	0,000	0,0000	0
0,000521	0,002	0,001	0,0000058	0,011	0,0168	5,7774E-06
0,001042	0,007	0,005	0,0000208	0,045	0,0606	2,08276E-05
0,001563	0,014	0,012	0,0000441	0,100	0,1282	4,40968E-05
0,002084	0,024	0,021	0,0000751	0,178	0,2183	7,50834E-05
0,002605	0,036	0,034	0,0001135	0,279	0,3299	0,000113456
0,003126	0,051	0,048	0,0001590	0,401	0,4623	0,000158969
0,003647	0,067	0,066	0,0002114	0,546	0,6148	0,000211429
0,004168	0,086	0,086	0,0002707	0,714	0,7871	0,000270676
0,004689	0,107	0,109	0,0003366	0,903	0,9788	0,000336575
0,00521	0,130	0,134	0,0004090	1,115	1,1894	0,000409009

Autor (2025)

Com base nesses dados, foi possível construir o gráfico comparativo apresentado na Figura abaixo:

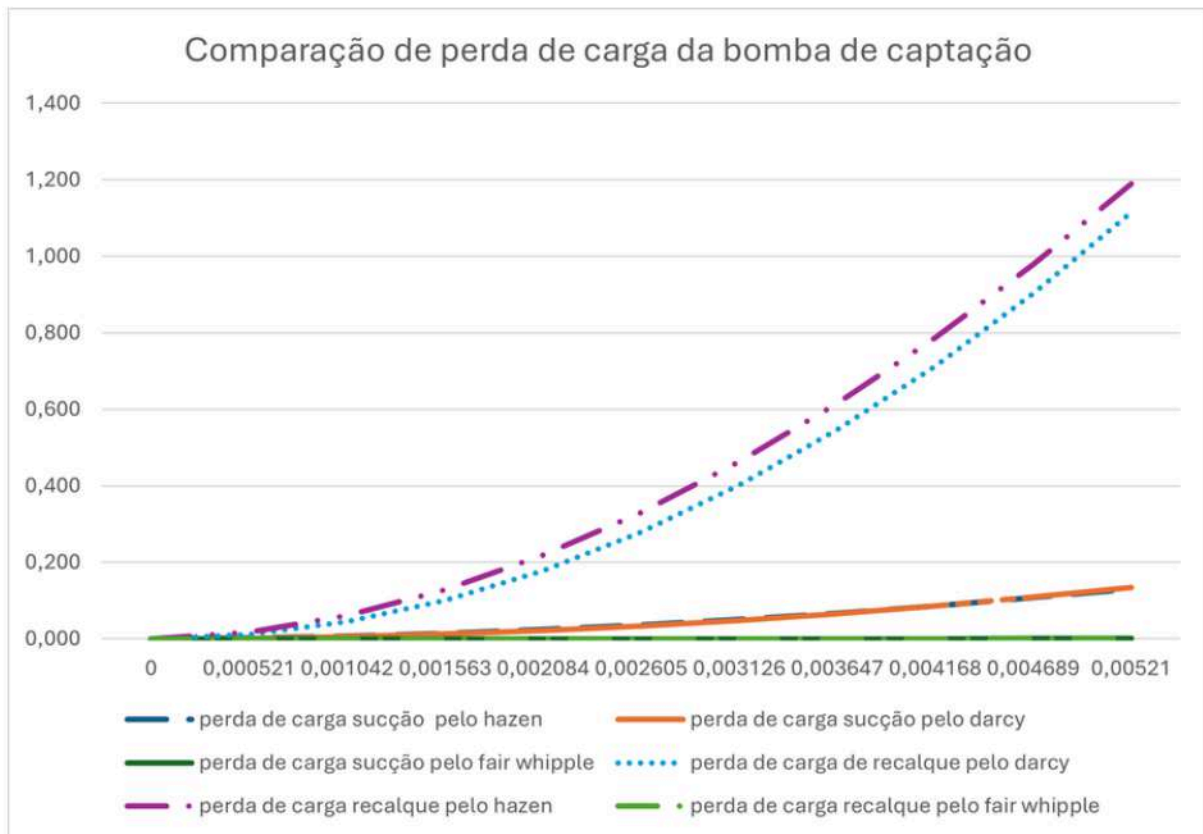


Gráfico 1 – Comparação de Perda de carga da bomba de captação da água do rio

Autor (2025)

- *Altura manométrica (HMT)*

$$HMT = H_{mr} + H_{ms} + H_{lsuc} + H_{lrec} \quad (4.17)$$

$$HMT = 8,13 + 1,22 + 0,33 + 0,37 = 10,07m$$

Essas perdas lineares representam a resistência contínua da tubulação sendo somadas posteriormente às perdas localizadas para determinar a altura manométrica total (HMT). Com a perda de carga do recalque deu 1,22 m e esse valor de perda de carga é considerado baixa com menor consumo energético. (BANSAL, 2018)

- *Perda de Carga Localizada*

Aqui foram calculadas as perdas localizadas associadas a cada elemento do sistema, como:

- Curvas e cotovelos;
- Válvulas;
- Conexões e reduções;

- Entradas e saídas.
- Pre-filtro

Cada elemento foi associado a um coeficiente K, e as perdas foram calculadas por:

$$h_l = \frac{8 \sum K_i}{\pi^2 g} \cdot \frac{Q^2}{D^2} \quad (4.18)$$

As perdas localizadas foram calculadas separadamente para o trecho de sucção e o trecho de recalque, garantindo que todas as resistências do sistema fossem consideradas. A altura manométrica depois das somas de tudo deu o resultado de 10,7 m

Com isso a nossa curva de sistema;

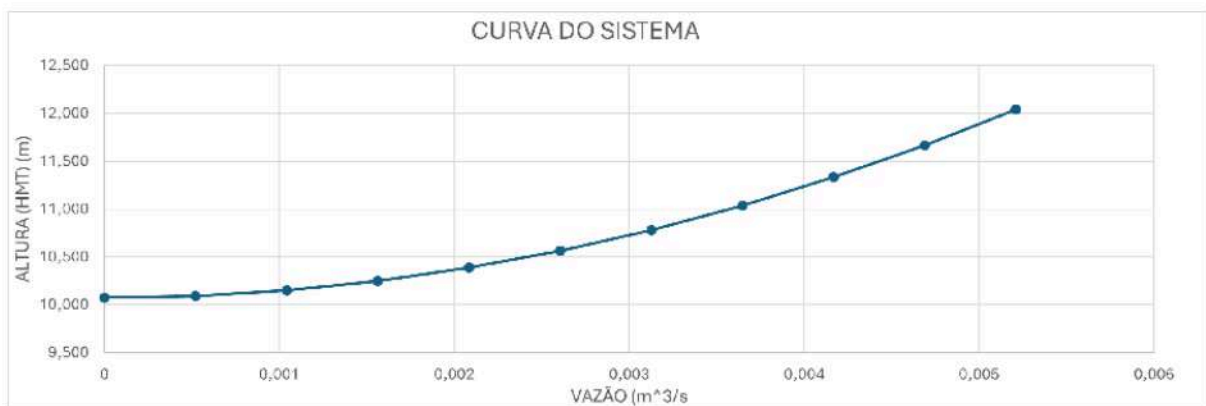


Gráfico 2 – Curva do sistema do rio ao Tanque 1

Autor (2025)

4.4.2 Escolha da Bomba Utilizando o Software KSB EasySelect

Para a seleção da bomba ideal do sistema de captação e bombeamento de água do rio até o tanque de armazenamento, foi utilizado o (EasySelect,), ferramenta oficial da KSB para dimensionamento e escolha de equipamentos de bombeamento. Esse software é amplamente reconhecido no setor industrial e de saneamento por sua confiabilidade, precisão técnica e integração direta com os modelos e curvas reais dos fabricantes.

O KSB EasySelect permite que o usuário insira dados como:

- Vazão (m³/h ou L/s);
- Altura manométrica total (m);
- Tipo de fluido e suas propriedades físicas (densidade, viscosidade, temperatura);
- Configuração da instalação (aspiração afogada, recalque livre, etc.).
- O local da instalação, a temperatura e altitude acima do mar do local

- O motivo do uso (abastecimento, tratamento etc.)

Com base nesses dados, o software gera automaticamente:

- A curva característica da bomba recomendada;
- O ponto de operação ideal (próximo ao ponto de melhor eficiência – BEP);
- Informações de rendimento, NPSHr, potência absorvida e características construtivas da bomba.

A principal vantagem do uso do KSB EasySelect é a segurança no processo de escolha, pois a ferramenta considera tanto critérios hidráulicos quanto construtivos e energéticos. Isso evita a seleção incorreta de equipamentos e permite que a bomba opere dentro da faixa de maior eficiência, reduzindo o consumo de energia e aumentando a vida útil do sistema.

Além disso, o software disponibiliza relatórios técnicos e gráficos completos, que foram utilizados como base para os cálculos de verificação e a documentação do projeto.

4.4.3 *Por que o KSB EasySelect?*

A escolha pelo KSB EasySelect em vez de outros softwares ou métodos manuais se justifica por várias vantagens importantes:

- Base de dados atualizada: contém todas as bombas da linha KSB, com dados atualizados diretamente da fabricante, garantindo que as curvas de desempenho sejam precisas e reais.
- Simulação completa: o software permite inserir parâmetros específicos do sistema (vazão, altura manométrica, tipo de fluido, temperatura, densidade, viscosidade) e fornece uma seleção filtrada das bombas que atendem a essas condições.
- Cálculo automático de rendimento, NPSHr e potência absorvida: elimina erros de cálculo e facilita a visualização do ponto de operação em relação às curvas de desempenho.
- Consideração de normas técnicas: o KSB EasySelect aplica os critérios de tolerância da norma ISO 9906, garantindo que as bombas selecionadas estejam dentro dos padrões de qualidade exigidos.
- Facilidade de documentação: o software gera relatórios completos com as curvas características, desempenho esperado, informações de motor e outras especificações, prontos para anexar em projetos.

Outros softwares de mercado podem não ter acesso direto às curvas atualizadas de fabricantes específicos, ou podem exigir maior customização manual dos dados. O KSB EasySelect garante uma integração completa entre teoria, prática e aplicação real do equipamento e além de tudo isso, eles têm fornecimento de equipamentos para o país em que o sistema está sendo projetado que no caso, é Gana e faz com que você conseguir usar as condições ambientais para selecionar uma bomba bem adequado para o ambiente. Na figura 50 demonsta o interface.

4.4.4 *Como foi feita a seleção da bomba*

Com base nos requisitos do sistema, foram inseridos no software os seguintes parâmetros:

- Vazão pretendida: 18,75 m³/h
- Altura manométrica total: 10,07 m
- Densidade do fluido: 998 kg/m³ (água)
- Viscosidade: 1,00 mm²/s
- Rotação nominal: 3410 rpm

Inserindo esses dados no software com aparece na figura 51

4.4.4.1 Resultados Do Software Para Bomba De Captação



Figura 12 – Imagem ilustrativa da bomba de captação
KSB EasySelect (2025)

Para garantir a seleção correta da bomba no processo de transferência de água do rio até o tanque de coagulação e decantação, foi analisada a curva característica da bomba modelo ETCB050-032-1251CCSAA10D100112, fornecida pelo software KSB EasySelect:

Tabela 13 – Parâmetros da bomba de captação

Parâmetro	Resultado
Vazão nominal	18,74 m³/h
Altura manométrica	10,07 m
Rendimento	63,7%
Potência absorvida	0,80 kW
NPSHr	2,82 m
Rotação	2884 rmp
Diâmetro do rotor	113,0 mm

Esses resultados garantem que a bomba opere próxima ao ponto de melhor eficiência (BEP), minimizando o consumo de energia e evitando condições críticas de operação como cavitação.

Além disso, o software gerou automaticamente as curvas características da bomba (altura manométrica vs. vazão, rendimento, NPSHr e potência), garantindo uma visão completa do comportamento hidráulico do equipamento no sistema.

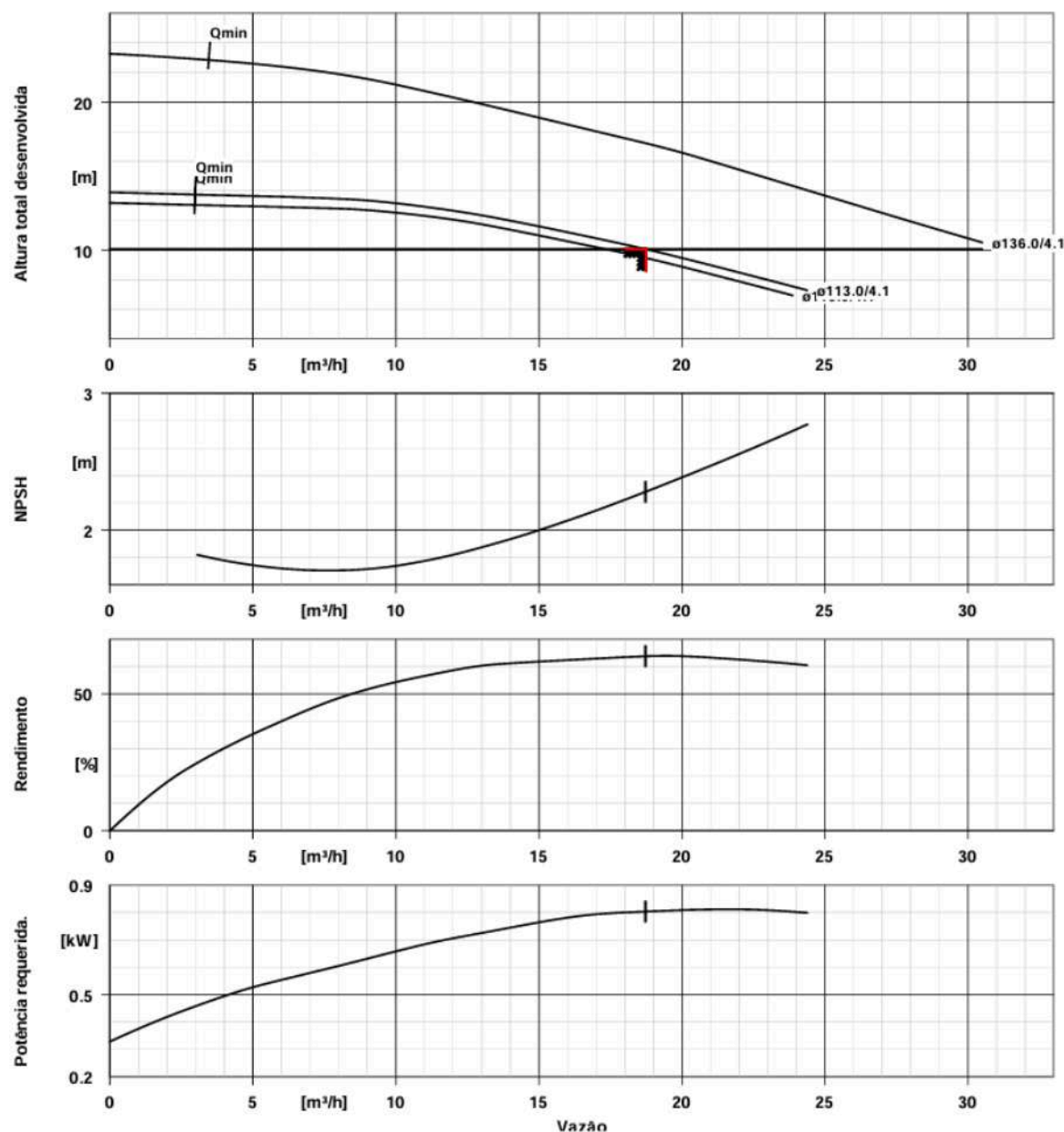


Figura 13 – As curvas de característica da bomba 1 e 2 da captação

KSB EasySelect (2025)

4.4.4.2 Importância da seleção correta

A utilização de uma ferramenta especializada como o KSB EasySelect assegura que a bomba escolhida:

- Operará com alto rendimento na faixa desejada;
- Estará segura contra cavitação (desde que o NPSH disponível seja verificado);
- Terá vida útil ampliada por trabalhar próximo ao BEP;
- Evitará sobredimensionamento ou subdimensionamento.

Essa abordagem evita custos desnecessários, reduz consumo de energia elétrica, e garante maior confiabilidade e durabilidade para o sistema de bombeamento.

4.4.4.3 Análise e Interpretação das Curvas da Bomba Selecionada

Após a seleção da bomba utilizando o software KSB EasySelect, foram geradas as curvas características da bomba, fundamentais para entender o desempenho hidráulico e energético do equipamento no sistema. Cada curva fornece informações específicas sobre o comportamento da bomba em diferentes condições de operação.

Abaixo, descrevem-se detalhadamente às quatro principais curvas obtidas:

1) Curva Característica (Altura Manométrica x Vazão)

Essa curva apresenta a relação entre a vazão bombeada (m^3/h) no eixo horizontal e a altura manométrica total (m) no eixo vertical.

Interpretação:

- Mostra como a altura (pressão gerada pela bomba) diminui conforme a vazão aumenta.
- Cada linha representa o desempenho com um diâmetro diferente de rotor.
- A curva indica a capacidade da bomba de superar a altura manométrica do sistema para uma dada vazão.

O ponto marcado em vermelho no gráfico representa o ponto de operação da bomba no sistema.

Esse ponto está localizado na curva do rotor $\varnothing 113.0/4.1$, com:

- Vazão 18,75 m^3/h
- Altura manométrica 10,07 m

A curva característica da bomba selecionada evidencia o comportamento hidráulico do equipamento frente às variações de vazão. Observa-se que a bomba, equipada com rotor de diâmetro $\varnothing 113.0$ mm, atinge com exatidão o ponto de operação desejado: 18,75 m³/h de vazão e 10,07 m de altura manométrica.

Esse ponto de operação encontra-se dentro da faixa eficiente de funcionamento, demonstrando que a bomba atende plenamente à necessidade do sistema, sem risco de cavitação ou sobrecarga. A curva confirma ainda que o equipamento está dimensionado de forma adequada e operará com confiabilidade e rendimento satisfatório.

2. Curva de NPSHr x Vazão

A curva de NPSHr (Net Positive Suction Head requerido) indica, no eixo vertical, o valor mínimo de energia de pressão na sucção que a bomba necessita para evitar cavitação, em função da vazão (eixo horizontal).

- **Interpretação:**

- Conforme a vazão aumenta, o NPSHr exigido pela bomba também aumenta.
- No ponto de operação (18,75 m³/h), o NPSHr é de 2,28 m.

Isso significa que o sistema precisa garantir um NPSH disponível (NPSHa / NPSHr) maior ou igual a 2,28 m para evitar cavitação.

Essa curva é essencial para validar se o sistema de sucção da bomba está adequado. Caso o NPSHr (ou NPSHa) real do sistema seja menor que 2,28 m, ocorrerá cavitação, danificando a bomba. Portanto, a curva orienta ajustes no projeto para garantir segurança operacional.

Fazendo o cálculo; Usando a fórmula 4.2

$$NPSH_d = \frac{101325 - 3169}{998 \times 9,81} + \frac{0,28^2}{2 \times 9,81} - 1,613 = 8,40 \text{ m}$$

O NPSHd = 8,40 m é maior que o NPSHr da bomba (2,28 m), logo: Não há risco de cavitação.

3. Curva de Rendimento x Vazão

A curva de rendimento mostra o aproveitamento energético da bomba (%) no eixo vertical em função da vazão (m³/h) no eixo horizontal.

- **Interpretação:**

- Apresenta um ponto de máximo rendimento (BEP – Best Efficiency Point), próximo de 63,2% na vazão nominal.
 - O rendimento cai se a bomba operar muito acima ou abaixo desse ponto.
- No ponto de operação (18,75 m³/h), a bomba opera exatamente no ponto de maior rendimento (63,7%), representando uma operação altamente eficiente.

Essa curva evidencia que a bomba trabalhará com o melhor aproveitamento de energia possível, minimizando custos operacionais e desgaste prematuro.

4. Curva de Potência Requerida x Vazão

A curva de potência indica, no eixo vertical, a potência elétrica que o motor precisa fornecer (kW) para diferentes vazões (eixo horizontal).

• Interpretação:

- A potência aumenta com o aumento da vazão.
- No ponto de operação (18,75 m³/h), a potência requerida é de 0,80 kW.

A curva de rendimento da bomba demonstra que o ponto de operação do sistema, com vazão de 18,75 m³/h, está localizado exatamente no ponto de maior eficiência da bomba (BEP), com rendimento de 64%. Isso garante uma operação energeticamente eficiente e prolonga a vida útil do equipamento.

Já a curva de potência requerida indica que a bomba exige aproximadamente 0,80 kW para operar nessa vazão. Considerando fatores de segurança e variações operacionais, recomenda-se o uso de um motor de 1,1 kW (1,5 CV), garantindo funcionamento contínuo e sem risco de sobrecarga.

Fazendo o cálculo;

$$P_{\text{hidráulica}} = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H_{mt}}{1000} \quad (4.19)$$

Onde;

$$\rho = 998 \text{ kg/m}^3$$

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$Q = 18,75 \text{ m}^3/\text{h} = 18,75/3600 = 0,0052 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$H_{mt} = 10,07 \text{ m}$$

$$P_{\text{hidráulica}} = \frac{998 \times 9,81 \times 0,0052 \times 10,07}{1000} = \frac{512,843}{1000} = 0,513 \text{ kW}$$

Comparação com a potência requerida: A potência absorvida pela bomba é 0,80 kW como fornecida na curva, A eficiência total é

$$\eta = \frac{P_{\text{hidráulica}}}{P_{\text{absorvida}}} \quad (4.20)$$

$$= \frac{0,513}{0,80} \approx 64,13\%$$

Este valor confirma a eficiência mostrada na curva.

Resumo das Curvas

Essas quatro curvas juntas permitem:

- Confirmar que a bomba atende os requisitos de vazão e altura manométrica;
- Garantir operação no ponto de maior eficiência;

- Validar o sistema contra riscos de cavitação;
- Dimensionar corretamente o motor elétrico.

4.4.5 *Considerações sobre a Seleção de Bombas em Paralelo*

A análise apresentada foi anteriormente realizada considerando a seleção de uma única bomba que atendesse às condições de operação de 18,75 m³/h de vazão e 10,07 metros de altura manométrica total. Os gráficos de desempenho da bomba (altura manométrica, rendimento, NPSHr e potência) demonstraram que o modelo selecionado atende plenamente os requisitos de operação para uma bomba operando individualmente.

No entanto, o sistema projetado possui a necessidade de encher um reservatório de 300 m³ de capacidade em um intervalo de tempo pré-determinado, o que implica em uma vazão maior do que a fornecida por uma única bomba.

- Para atender essa demanda, optou-se pela instalação de duas bombas operando em paralelo.
- Essa decisão se baseia nos seguintes fatores:
 - Ao operar duas bombas em paralelo, a vazão total fornecida será aproximadamente o dobro da vazão de uma bomba individual, mantendo a altura manométrica.
 - Com duas bombas, é possível reduzir o tempo de enchimento do tanque de 300 m³ pela metade, garantindo maior eficiência no processo.
 - A operação em paralelo também oferece redundância e maior confiabilidade, permitindo que o sistema continue operando com uma bomba caso a outra precise de manutenção.

Portanto, a escolha final foi adotar duas bombas do mesmo modelo selecionado, operando em paralelo, garantindo que o sistema atenda a vazão necessária para o enchimento do tanque de 300 m³ dentro do prazo estipulado, sem comprometer o desempenho hidráulico ou energético do sistema.

4.5 **Automatização do Processo de Coagulação, Decantação e Extração da Água Clarificada**

No tanque de 300 m³ projetado para atuar como reator de coagulação e decantador, foi implementada uma estratégia de automação para garantir a eficiência do processo e o fluxo contínuo para as etapas seguintes de tratamento.

O processo ocorre da seguinte forma: inicialmente, o coagulante é dosado por meio de uma bomba dosadora controlada por tempo ou por volume de água tratado. Após a adição do coagulante, ocorre uma etapa de mistura rápida, seguida de uma fase de floculação com agitação lenta para favorecer a formação de flocos.

Finalizada a floculação, o sistema entra em repouso, permitindo a sedimentação dos flocos. Um sensor de nível ou temporizador programável controla o tempo de decantação e, após o período estabelecido, aciona automaticamente uma bomba de recalque conectada a um ponto de sucção posicionado na parte superior do tanque. Esse ponto de sucção, dotado de um tubo coletor flutuante ou boia regulável, garante que apenas a água clarificada da zona superior seja extraída, evitando o arraste de sólidos sedimentados.

A água clarificada bombeada é então direcionada para as próximas etapas de tratamento, que incluem filtração em areia e carvão ativado, além de processos de desinfecção por ozônio e radiação UV.

Essa automação do processo permite reduzir a necessidade de intervenções manuais, aumentar a confiabilidade e garantir a regularidade no fornecimento da água tratada, além de minimizar perdas e garantir melhor controle operacional.

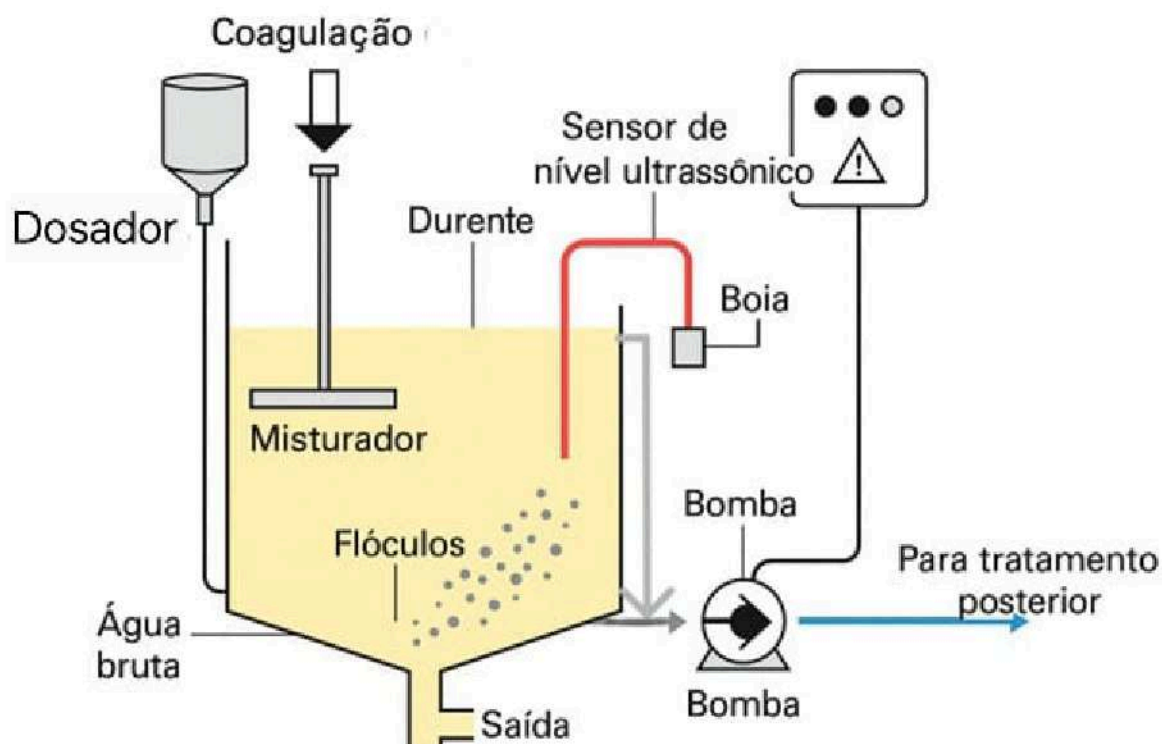


Figura 14 – Esquema de automação do processo de coagulação e floculação

Autor (2025)

4.5.1 *Explicação do Esquema de Automação*

O esquema apresentado representa um sistema automatizado de coagulação, floculação e decantação em um tanque de 300 m³, com extração automática da água clarificada pela parte superior do tanque. Ele contém os seguintes elementos principais:

1) Dosador de coagulante (Coagulante)

- Responsável por adicionar o coagulante no início do processo.
- Pode ser uma bomba dosadora peristáltica ou de pistão, controlada por tempo ou volume.

2) Misturador (Misturador)

- Equipamento mecânico (pás ou hélice) que promove a mistura rápida e lenta para a formação dos flocos.
- Ele pode funcionar em duas fases: uma agitação mais intensa no início (coagulação) e depois mais suave (floculação).

3) Sensor de nível ultrassônico (Sensor de nível ultrassônico)

- Mede o nível da água no tanque sem contato direto, garantindo controle preciso do volume e ativação automática do sistema.
- Envia o sinal para o painel de controle.

4) Boia (Boia)

- Um mecanismo adicional de segurança ou controle redundante, que detecta nível alto/baixo e pode acionar alarmes ou travas.

5) 2 Bombas de extração (Bomba)

- Instalado no topo do tanque ou conectado a um tubo coletor flutuante, suga apenas a água clarificada (parte superior, sem arrastar lodo).
- Essas bombas transferirão a água decantada para as próximas etapas de tratamento: filtros, radiação UV e ozônio.

6) Painel de controle (Controlador)

- Onde são integrados os sinais dos sensores e os comandos automáticos das bombas e dosadores.
- Permite programar o tempo de cada etapa ou o acionamento automático conforme níveis e sensores.

4.5.2 *Funcionamento resumido:*

- I) A água bruta entra no tanque e recebe o coagulante via bomba dosadora automática.
- II) O misturador realiza a agitação inicial e posterior agitação lenta.
- III) O sistema aguarda o tempo necessário de decantação.
- IV) O sensor de nível ultrassônico (ou temporizador) detecta o momento adequado e aciona a bomba de extração para retirar a água da superfície (já clarificada) e enviar para o próximo tratamento. Tudo isso ocorre sem necessidade de abertura manual de válvulas ou acionamento manual de bombas, garantindo regularidade e redução de erro humano.

4.6 Dimensionamento e seleção dos filtros

Do tanque 1 até reservatório final; Configuração do Sistema de Filtragem

Objetivo: Tratamento de água de rio para consumo humano.

Vazão por bomba: 9,4 m³/h.

Configuração:

- Filtros de Areia: 1 unidade por bomba (total de 2), operando em paralelo.
- Filtros de Carvão Ativado: 1 unidade por bomba (total de 2), operando em paralelo
- Filtros UV: 4 unidades, distribuídas conforme a necessidade de desinfecção.
- 1 Gerador de Painel de Ozônio

4.6.1 *Equipamentos Selecionados*

- 1) 1) *Filtro de Areia + Filtro de Carvão Ativado*

Com base do meu estudo de caso o Bioparque eles usam o filtro de areia da empresa Sodramar (um filtro SOPRAMAR do tipo piscina com válvula multivias), podemos afirmar que esse tipo de filtro é tecnicamente viável para o seu projeto, desde que se adote os modelos adequados para tratamento de água potável (com materiais aprovados para contato com água para consumo).

Esses filtros de corpo em fibra de vidro ou polietileno são amplamente utilizados em projetos de potabilização compactos em países como o Brasil e em vários países africanos, incluindo Gana, especialmente em projetos comunitários ou pré-fabricados por ONGs e iniciativas descentralizadas.

Presença em Gana

Embora a marca Sodramar (brasileira) não tenha distribuição oficial direta em Gana, filtros equivalentes com válvula multívias e tanques de fibra para areia e carvão ativado são facilmente encontrados no país, por exemplo:

- Polytank Ghana Ltd.,
- Doscar Ventures,
- Aquasafe Watercare Limited - Gana
- WaterHealth Ghana.

Eles trabalham com filtros de areia e carvão para purificação em vilarejos, hospitais e escolas.

A escolha dos filtros foi pela empresa Aquasafe Watercare Limited e é uma empresa sediada em Accra, Gana, especializada em soluções inovadoras de tratamento de água para residências e empresas. Eles oferecem uma variedade de produtos, incluindo filtros de areia e carvão ativado adequados para sistemas de tratamento de água potável.

Filtros Disponíveis

1) Filtro de Areia Multimídia – Modelo ASFM10

Características:

- Vazão nominal: até 10 m³/h
- Pressão de trabalho: 2 a 4 bar
- Conexão: 2"
- Tipo de mídia: areia, antracito e pedrisco
- Material: corpo em fibra de vidro reforçada (FRP)
- Perda de carga estimada (limpa): 2,5 a 3 m.c.a.

2. Filtro de Carvão Ativado – Modelo ASCA10

Características:

- Vazão nominal: até 10 m³/h
- Tipo de carvão: carvão ativado granulado de coco
- Vida útil: aproximadamente 10 meses, dependendo da qualidade da água
- Perda de carga estimada (limpa): 1,5 a 2 m.c.a.



Figura 15 – Imagem ilustrativa do filtro de areia e filtro de carvão ((2025),)
Techfilter (2025)

Tabela 14 – Perda de carga Estimadas por linha

Equipamento	Vazão (m³/h)	Perda de Carga (m.c.a.)
Filtro de Areia ASFM10	9,38	3,0
Filtro de Carvão ASCA10	9,38	1,5
Total por linha		4,5 m.c.a.

Autor (2025)

Justificativa Técnica da Escolha

- Compatibilidade com a vazão: Ambos os filtros suportam vazões superiores a 9,38 m³/h, garantindo operação eficiente.
- Baixa perda de carga: As perdas estimadas em regime limpo somam aproximadamente 4,5 m.c.a., dentro dos limites aceitáveis para sistemas de bombeamento.
- Material resistente: Os filtros são construídos em fibra de vidro reforçada, adequada para ambientes tropicais como o de Gana.
- Disponibilidade local: Os produtos são fornecidos localmente pela Aquasafe Water-care Limited, facilitando a aquisição e manutenção.
- Facilidade de manutenção: Os sistemas possuem retrolavagem manual com válvula multivias, comum em instalações comunitárias.

1) 3. Filtros UV (Ultravioleta)

Filtro Ultravioleta – Esterilizador UV Sodramar UVC 35W

Como etapa complementar de desinfecção, optamos pela utilização do filtro ultravioleta (UV) modelo UVC 35W da Sodramar, equipamento especialmente projetado para tratamento físico da água por radiação germicida. O uso da radiação UV visa garantir a eliminação de microrganismos patogênicos remanescentes, como vírus, bactérias e protozoários, após o processo de filtração mecânica e química.

Por que escolhemos essa marca e modelo

- 1) Eficácia comprovada: O modelo UVC 35W é capaz de tratar até 4,5 m³/h com eficiência de desinfecção de até 99,9%, ideal para aplicações em sistemas de água potável de pequeno e médio porte. O mesmo usado no Bioparque no caso de estudo
- 2) Compatibilidade com PVC e sistemas pressurizados: Pode ser integrado a tubulações de PVC com conexões universais, facilitando a montagem hidráulica.
- 3) Construção robusta e durável: Equipamento resistente, com corpo em ABS e reator eletrônico protegido, garantindo durabilidade mesmo em ambientes úmidos.
- 4) Baixa manutenção e operação contínua: Não utiliza produtos químicos, não altera o sabor da água e requer apenas troca periódica da lâmpada (geralmente a cada 8.000 horas de uso).
- 5) Tecnologia universal e suporte internacional facilitado: Apesar de ser fabricado no Brasil, o modelo UVC 35W utiliza lâmpadas, reatores e tubos de quartzo de especificação internacional padrão (35W/UV-C), o que permite reposição fácil via distribuidores globais, inclusive em Gana. Isso garante maior viabilidade para projetos de tratamento de água em países africanos, mesmo que o suporte técnico direto da marca não esteja presente localmente.



Figura 16 – Legenda
Sodramar (2025)

Perda de carga estimada

O modelo UVC 35W apresenta uma perda de carga relativamente baixa, o que o torna viável para instalações com bombas de média pressão.

Tabela 15 – Perda de carga Estimada do UV

Equipamento	Vazão Unitária (m³/h)	Perda de Carga Inicial (m.c.a.)	Perda de Carga Máxima (m.c.a.)
Filtro UV sodramar 35W	4,7	-	1,0

Autor (2025)

As perdas de carga máximas são estimativas baseadas em condições de operação próximas à saturação dos meios filtrantes. Recomenda-se monitoramento regular para determinar o momento adequado para retrolavagem ou substituição dos elementos filtrantes.

4. Gerador de Ozônio – Panozon Blue Star 4000

Para o processo de desinfecção final do sistema de filtragem de água, optamos pelo uso do gerador de ozônio Panozon Blue Star 4000, fabricado pela empresa Panozon, referência nacional em tecnologia de ozonização para tratamento de água. O equipamento será instalado em conjunto com um injetor venturi, conforme a configuração hidráulica mostrada na imagem 17 e 18.



Figura 17 – Imagem ilustrativa do Panozon Blue Star 4000 e Blue Star Fit. ((Technologia...,))
Technologia Panozon (2025)



Figura 18 – Tubulação de instalação do O3
Tecnologia Panazon (2025)

Por que escolhemos a marca Panazon

- 1) Confiabilidade e tradição no mercado: A Panazon atua há mais de 20 anos no setor de tratamento de água, sendo reconhecida pela qualidade e segurança de seus produtos e é o mesmo usado no meu estudo de caso no Bioparque.
- 2) Compatibilidade com sistemas pressurizados: O modelo Blue Star 4000 é indicado para aplicações em poços, sistemas de reuso e rios, sendo perfeitamente adequado para o nosso projeto de filtração de água de rio para consumo humano.
- 3) Tecnologia nacional com suporte técnico acessível: A empresa oferece suporte técnico e peças de reposição em todo o território nacional, o que facilita a manutenção e reduz o tempo de inatividade.
- 4) Eficiência no consumo de energia: Este modelo consome menos energia e apresenta maior eficiência de dissolução do ozônio na água, graças ao seu design com válvula antirretorno, filtro de ar integrado e baixa taxa de vazamento.

- 5) Facilidade de instalação: Suas dimensões compactas (43 cm x 23 cm x 13 cm) permitem fácil integração com o sistema hidráulico do projeto, ocupando pouco espaço físico.

Perda de carga associada (conjunto com venturi)

O gerador em si não provoca perda de carga hidráulica direta, mas seu sistema de injeção (venturi em bypass com válvula) impõe perdas relevantes ao sistema.

Tabela 16 – Perda de carga do sistema do painel do ozônio

Componente Hidráulico	Perda Estimada (m.c.a.)
Válvula de esfera (PVC)	~0,2
4 cotovelos 90° (em PVC)	~0,4
Injetor venturi (Panozon)	~3,0
Total aproximado do conjunto	~3,6 m.c.a.

Autor (2025)

4.7 Dimensionamento e seleção das Bombas

- *Bombas do Tanque 1 até Tanque Final*

Tabela 17 – Parâmetros Gerais do sistema

Parâmetro	Valor	Unidade	Explicação
Tempo desejado para encher	8	horas	Tempo estimado para encher o reservatório de 150.000 L
Desnível de sucção	8	metros	Altura entre o nível do rio e a bomba (elevação da sucção)
Material da tubulação	PVC		Tipo de material usado (PVC → rugosidade conhecida, $e = 0,0015$ mm)
Vazão do rio	200	m ³ /s	Dado informativo sobre a fonte de captação
Litragem requerida	150.000	L/h	Volume total a ser bombeado até o reservatório
Vazão necessária	18.750	L/h	Vazão de bombeamento considerando o tempo desejado (150.000 / 8)

Autor (2025)

Tubulação

Tabela 18 – Trecho de Sucção

Dado	Valor	Unidade
Diâmetro (D)	0,154	m
Comprimento (L)	12	m

Autor (2025)

Tabela 19 – Trecho do Recalque

Dado	Valor	Unidade
Diâmetro (D)	0,154	m
Comprimento (L)	600	m

4.7.1 Cálculos Hidráulicos (Do tanque 1 até o reservatório final) Passo a Passo

- *Determinação da vazão*

$$Q = \frac{\text{volume}}{\text{tempo}} \frac{150 \text{ L}}{8 \text{ h}} = 18,750 \text{ L/h} = 5.21 \text{ L/s} = 18.75 \text{ m}^3/\text{h} \quad 4.6$$

Como teremos 2 bombas funcionando em paralelo, a vazão será dividida entre as bombas então será 9,38 m³/h para cada bomba.

- *A velocidade do escoamento*

Para um diâmetro de 160 mm (0,154m) diâmetro nominal:

$$A = \frac{\pi \cdot (D)^2}{4} = 4.7 \quad A = \frac{\pi \cdot (0,154)^2}{4} = 0,01863 \text{ m}^2$$

$$= \frac{0,00260 \text{ m}^3/\text{s}}{0,01863 \text{ m}^2} \approx 0,14 \text{ m/s} \quad 4.8$$

Velocidade média do fluido = 0,14m/s

- *Número de Reynolds*

Sendo $\nu = 1,14 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ Viscosidade cinemática da água 20 °C

$$= \frac{0,14 \cdot 0,154}{1 \times 10^{-6}} = 21\,530,70 \text{ Usando equação 4.9}$$

A partir dessa equação 4.10

Achando o A usaremos essa equação 4.11

$$A = -2,457 \cdot \ln \left[\left(\frac{7}{21444,92} \right)^{0,9} + \left(\frac{0,27 \cdot \frac{0,0000015}{0,154}}{1 + 10^{(21444,92)^{0,5}}} \right) \right] = 9,72 \times 10^{19}$$

Para achar o B usaremos equação 4.12

$$B = \left(\frac{37,530}{21444,92} \right)^{16} = 7263,22$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = \left[\left(\frac{8}{21444,92} \right)^{12} + \frac{1}{(9,6309 \times 10^{20} + 7742,22)^{\frac{3}{2}}} \right]^{\frac{1}{12}} = 0,025389548$$

O fator de atrito adotado para os trechos de sucção e recalque foi considerado igual, visto que ambos utilizam tubulações do mesmo material, diâmetro e rugosidade, operando sob a mesma vazão e com escoamento plenamente turbulento. Nessas condições, o valor do número de Reynolds é semelhante nos dois trechos, o que justifica a adoção de um único valor de fator de atrito para ambos.

- *Perda de carga por atrito*

Perda de Carga por Atrito – Sucção

Depois foram calculadas as perdas lineares no trecho de sucção (do tanque 1 até a entrada da bomba).

Os principais parâmetros considerados foram:

- Comprimento total da linha de sucção (L);
- Diâmetro interno da tubulação (D);
- Velocidade média do fluido (v) calculada a partir da vazão e área da seção;
- Fator de atrito (f) obtido.

Usando a fórmula do Darcy-Weisbach;

Tabela 20 – Parâmetros da sucção Filtragem

Parâmetro Sucção	Valor	K	Ktotal	unid
Gravidade (g)	9,81	-	-	m/s ²
Densidade (ρ)	1000	-	-	kg/m ³
Viscosidade (μ)	0,001	-	-	Pa·s
Rugosidade (ϵ)	0,0000015	-	-	m
Vazão (Q) por bomba	0,00260	-	-	m ³ /s
Diametro (D)	0,154	-	-	m
Comprimento do tubo (160mm) - Leq	16	-	-	m
Curvas de 90° (PVC)	4	2,1	8,4	m
Registro Gaveta	2	56,7	113,4	m
Valvula de retenção	2	21,4	42,8	m
f(suc)	0,0253895			
leqtotal suc	180,6			m

Autor (2025)

Usando equação 3.11

$$= 0,0295389548 \times \frac{180,6}{0,154} \times \frac{0,14^2}{2 \times 9,81} = 0,029663876$$

Altura da sucção(hs) é 8m então o hmts = hs+hfs que no caso será

$$hmts = 15 + 0,0297 = 15,03m$$

Perda de carga no recalque =>

Como no recalque tem os filtros, nos pesquisamos os filtros que serão usados no projeto e pegamos as perdas de cargas de todos para poder somar com a perda de carga das tubulações.

Primeiramente calculamos a perda de carga por atrito;

Tabela 21 – Parâmetros do recalque Filtragem

Parâmetro recalque	Valor	K	Ktotal	unid
Gravidade (g)	9,81	-	-	m/s ²
Densidade (ρ \rho ₀)	1000	-	-	kg/m ³
Viscosidade (μ \mu ₀)	0,001	-	-	Pa·s
Rugosidade (ϵ)	0,0000015	-	-	m
Vazão (Q)	0,00260	-	-	m ³ /s
Diametro (D)	0,154	-	-	m
Comprimento do tubo (160mm) - Leq	600	-	-	m
Curvas de 90° (PVC)	19	2,1	39,9	m
Registro Globo aberto	2	56,7	113,4	m
Valvula de retenção esfera	20	13,9	278	m
canal de saida	1	5,6	5,6	
Tê 90° passagem direta	11	3,6	39,6	
f(recal)	0,02538955			
leqtotal recal	876,5			m

Autor (2025)

Com a equação $3.11 = 0,0295389548 \times \frac{600}{0,154} \times \frac{0,14^2}{2 \times 9,81} = 0,143966707$

Para os filtros da tabela 14,15, temos as perdas de cargas dos filtros selecionados para o projeto usamos a média das perdas de carga do filtro de areia e o carvão que no caso é 3,75mca, a do filtro UV usamos a perda de carga máxima dado pela empresa sodramar que é 1,0mca e do painel do ozônio da tabela 16.

Assim chegamos no final que

Tabela 22 – Perda de carga dos filtros

Filtros	Quantidade	Perda de carga
Areia	2	1,5 X 2 = 3 mca
Carvão	2	0,75 X 2 = 1,5 mca
UV	4	1 X 4 = 4mca
Painel de ozônio	1	3,6 mca

Autor (2025)

Totalizando 12,10mca = 12,10 m mais a perda de carga por atrito será 24,73 m.

Altura do recalque(hr) é 0 m porque será do mesmo nível da bomba com o tanque 1 que abastecerá então hmtr=hr+hfr que no caso será

$$hmtr = 20 + 12,10 = 32,43 \text{ m}$$

- *Perda de carga Localizado*

Na sucção;

Com a equação 4.15 = 0,080

No recalque;

Com a equação 4.16 = 0,072

4.7.2 *Perdas de carga das 2 bombas usados na filtração para o reservatório final.*

Para o dimensionamento das perdas de carga no sistema de bombeamento e adução de água destinado à etapa de filtração, foram utilizadas três diferentes equações consagradas na engenharia hidráulica: Darcy-Weisbach, Hazen-Williams e Fair-Whipple-Hsiao. A seguir, apresenta-se uma comparação gráfica entre as perdas estimadas por esses métodos para diferentes valores de vazão, mantendo-se fixos o diâmetro da tubulação (160 mm), o comprimento da linha de sucção (180,6 m) e o comprimento da linha de recalque (876,5 m), além dos demais parâmetros operacionais.

Visando validar os cálculos e assegurar maior confiabilidade ao projeto, também foi utilizado o software Voima Toolbox — uma ferramenta especializada em simulações de hidráulica computacional. Essa aplicação permitiu verificar os resultados obtidos manualmente. As Figuras 44,52,53,54, e 55 ilustram as telas de simulação com os valores calculados pelo software para o sistema de filtração.

Tabela 23 – Comparação das perdas de carga calculadas por diferentes métodos da bomba de filtração.

Vazão (m³/s)	perda de carga sucção Hazen Williams	perda de carga sucção Darcy Weisbach	perda de carga sucção pelo Fair Whipple	perda de carga de recalque Darcy Weisbach	perda de carga recalque Hazen Williams	perda de carga recalque Fair Whipple
0	0,000	0,000	0,0000000	0,000	0,000	0,0000000
0,00026	0,000	0,000	0,0000013	0,001	0,002	0,0000013
0,00052	0,001	0,001	0,0000048	0,004	0,007	0,0000048
0,00078	0,003	0,003	0,0000103	0,009	0,014	0,0000103
0,00104	0,005	0,005	0,0000175	0,016	0,024	0,0000175
0,0013	0,008	0,007	0,0000264	0,025	0,036	0,0000264
0,00156	0,011	0,011	0,0000370	0,035	0,051	0,0000370
0,00182	0,014	0,014	0,0000492	0,048	0,068	0,0000492
0,00208	0,018	0,019	0,0000630	0,063	0,087	0,0000630
0,00234	0,022	0,024	0,0000783	0,080	0,108	0,0000783
0,0026	0,027	0,030	0,0000952	0,098	0,131	0,0000952

Autor (2025)

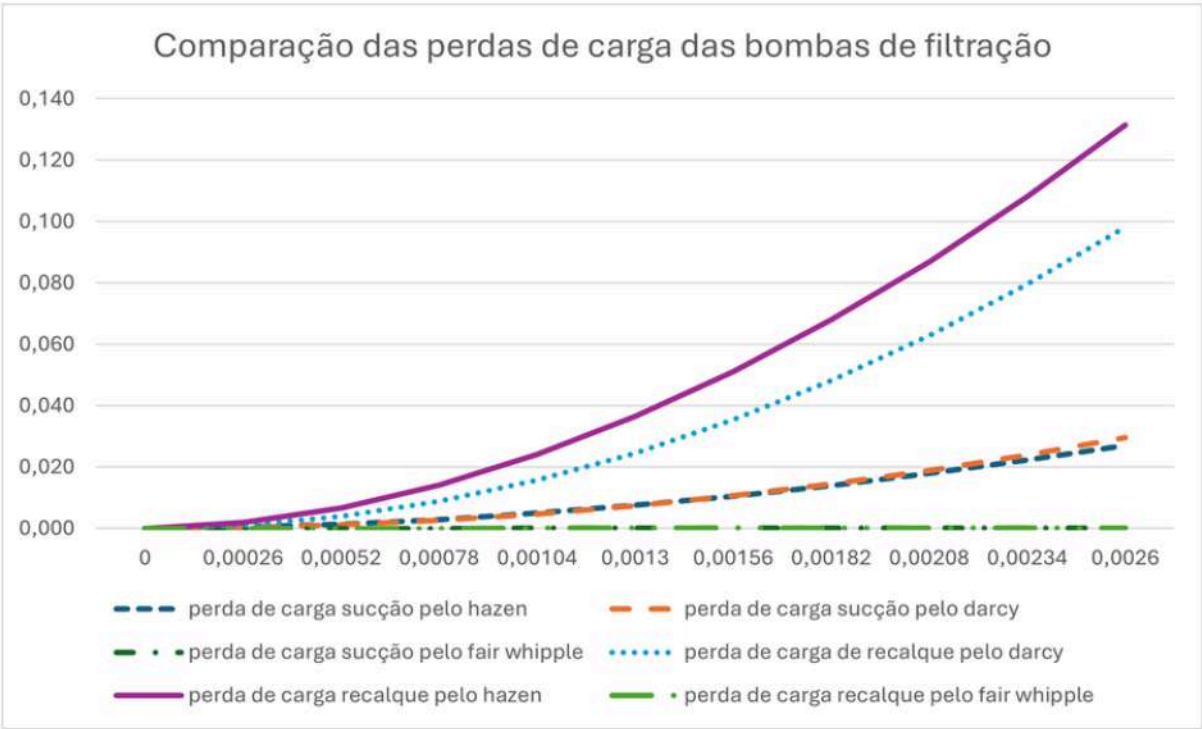


Gráfico 3 – Comparação de perda de carga das bombas de filtração
Autor (2025)

- *Altura manométrica (HMT)*

$$HMT = H_{mr} + H_{ms} + H_{lsuc} + H_{lrec} HMT = 15,357 + 29,73 + 0,080 + 0,07247,4m$$

Com isso geramos a curva do sistema

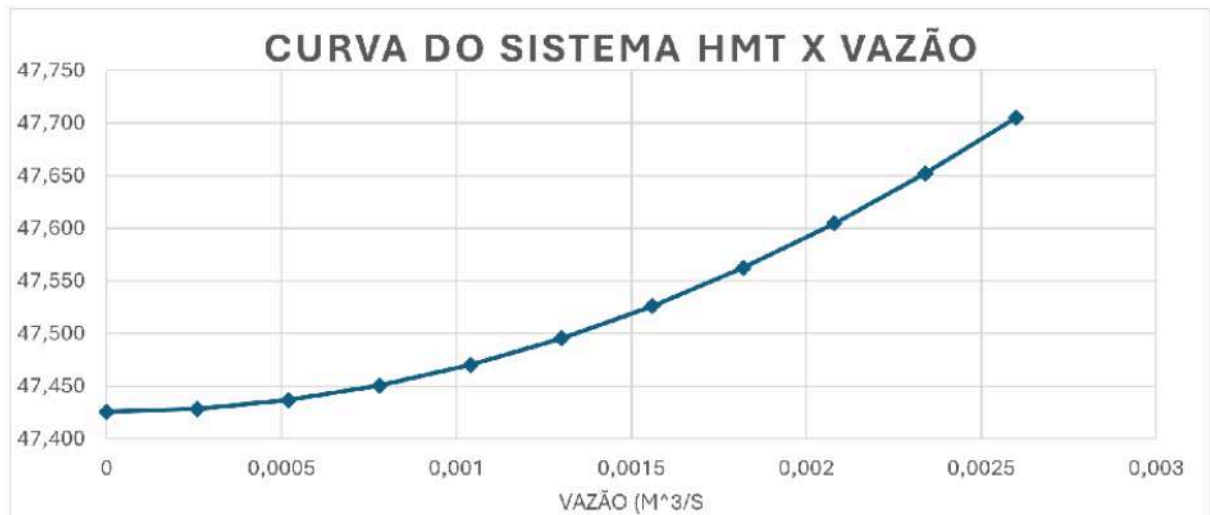


Gráfico 4 – Curva do sistemas para filtragem

Autor (2025)

4.7.3 Seleção da Bomba para a Etapa de Filtragem e Enchimento do Reservatório Final

Para garantir a seleção correta da bomba na etapa de filtragem e enchimento do reservatório de 150 m³, foi analisada a curva característica da bomba modelo ETCB050-025-200 CCSAA10D100402 B, fornecida pelo software de dimensionamento KSB EasySelect.



Figura 19 – Imagem ilustrativa da bomba de filtragem

KSB EasySelect (2025)

Tabela 24 – Parâmetros operacionais da bomba centrífuga selecionada

Parâmetro	Resultado
Vazão pretendida	9,38 m ³ /h
Vazão nominal	12,87 m ³ /h
Altura manométrica	47,43 m
Rendimento	45,0%
Potência absorvida	3,69 kW
NPSHr	2,08 m
Rotação	2910 rpm
Diâmetro do rotor	184,0 mm

Autor (2025)

Esses resultados asseguram que a bomba opera dentro da faixa operacional recomendada pelo fabricante, fornecendo pressão e vazão suficientes para vencer as perdas de carga impostas pelos filtros de areia, filtros de carvão ativado, sistemas UV e painel de ozônio. Embora o rendimento esteja em 45%, abaixo do ideal, a bomba foi selecionada para operar com segurança em uma configuração com duas unidades em paralelo, permitindo que o sistema alcance uma vazão total de 18,76 m³/h, suficiente para encher o reservatório de 150 m³ em aproximadamente 8 horas.

A proximidade entre a vazão de operação e a vazão nominal permite um desempenho estável e contínuo, mesmo com variações moderadas de pressão. A altura manométrica de 47,43 m corresponde à necessidade do sistema, e o NPSHr de 2,08 m indica que a instalação deve ser cuidadosamente projetada para evitar cavitação, especialmente na captação da água.

Além disso, o software de seleção gerou automaticamente as curvas características da bomba, incluindo altura manométrica vs. vazão, rendimento hidráulico, potência requerida e NPSHr, proporcionando uma visão completa do comportamento hidráulico do equipamento no sistema e assegurando sua compatibilidade com as condições de operação projetadas.

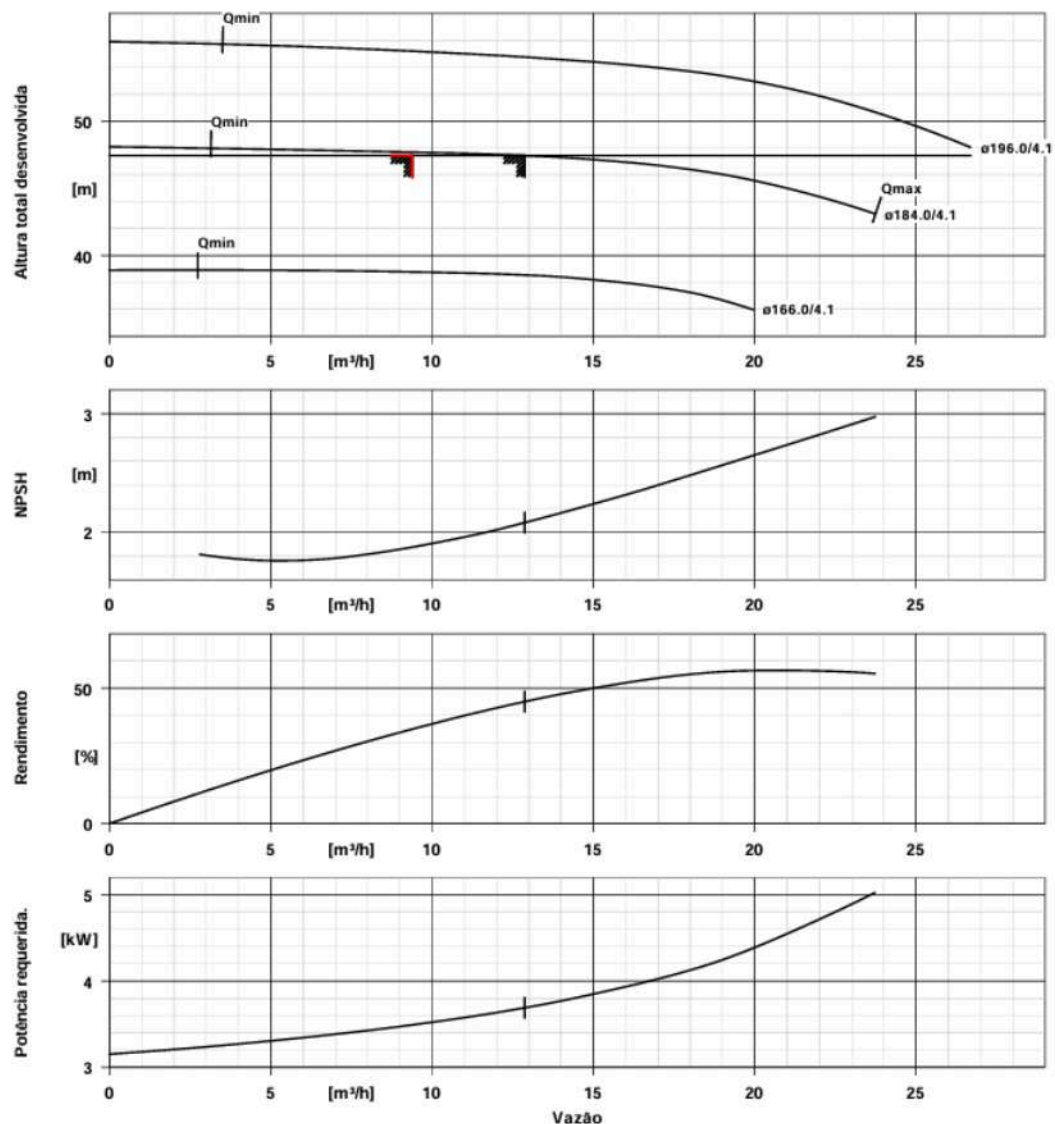


Figura 20 – Curva de característica da bomba de filtragem
KSB EasySelect (2025)

4.7.3.1 Análise e Interpretação das Curvas da Bomba Selecionada

Após a seleção da bomba utilizando o software KSB EasySelect, foram geradas as curvas características do modelo ETCB050-025-200 CCSAA10D100402 B, fundamentais para entender o desempenho hidráulico e energético do equipamento no sistema de filtragem e enchimento do reservatório final. Cada curva fornece informações específicas sobre o comportamento da bomba em diferentes condições de operação.

Abaixo, descrevem-se detalhadamente as quatro principais curvas obtidas:

I. Curva Característica (Altura Manométrica x Vazão)

Essa curva apresenta a relação entre a vazão bombeada (m^3/h) no eixo horizontal e a altura manométrica total (m) no eixo vertical.

Interpretação:

- Demonstra que a altura manométrica fornecida pela bomba diminui à medida que a vazão aumenta, comportamento típico de bombas centrífugas.
- A curva inclui várias linhas, cada uma representando o desempenho da bomba com diferentes diâmetros de rotor ($\varnothing 166$ mm, $\varnothing 184$ mm e $\varnothing 196$ mm).
- O ponto de operação da bomba no sistema está representado por um marcador visual (ponto vermelho) na curva com rotor de diâmetro $\varnothing 184$ mm, correspondendo a:
 - Vazão 9,38 m³/h
 - Altura manométrica 47,43 m

A curva confirma que a bomba equipada com rotor de $\varnothing 184$ mm atende com exatidão o ponto de operação projetado, superando as perdas de carga impostas pelos filtros de areia, carvão, sistema UV e painel de ozônio. Embora o ponto esteja fora do BEP, está dentro da faixa operacional segura, o que garante confiabilidade hidráulica.

II. Curva de NPSHr x Vazão

A curva de NPSHr (Net Positive Suction Head requerido) mostra, no eixo vertical, o valor mínimo de pressão absoluta na sucção necessário para evitar cavitação, em função da vazão.

Interpretação:

- O valor de NPSHr aumenta com a vazão, o que é esperado devido ao aumento da velocidade do fluxo.
- No ponto de operação de 9,38 m³/h, o valor de NPSHr é de 2,08 m.
- Isso indica que o NPSHa (NPSH disponível) do sistema deve ser maior que 2,08 m para evitar cavitação.

Com base no cálculo de NPSHd considerando uma sucção positiva (bomba instalada abaixo do nível da água) e boas condições atmosféricas, temos:

Fazendo o cálculo;

Utilizando 4.2 a fórmula

onde:

P_{atm} : pressão atmosférica = 101325 Pa

p_v : pressão de vapor da água a 25°C 3169 Pa

ρ : densidade da água = 998 kg/m³

g : aceleração da gravidade = 9,81 m/s²

v : velocidade = 0,14 m/s

h_s : sucção positiva = 1,61 m

$$NPSH_d = \frac{101325 - 3169}{998 \times 9,81} + \frac{0,14^2}{2 \times 9,81} - 0,029 = 9,98 \text{ m}$$

O NPSH_d = 9,98 m é maior que o NPSH_r da bomba (2,08 m), logo: Não há risco de cavitação.

III. Curva de Rendimento x Vazão

Essa curva mostra o rendimento hidráulico (%) da bomba em função da vazão bombeada.

Interpretação:

- O ponto de maior rendimento (BEP – *Best Efficiency Point*) se localiza em torno da vazão nominal (12,87 m³/h), onde o rendimento máximo é atingido.
- No ponto de operação (9,38 m³/h), o rendimento é de 45,0%, inferior ao ideal, mas ainda adequado para o funcionamento contínuo.
- A eficiência é prejudicada por operar abaixo do BEP, o que é comum em sistemas com margem de segurança.

Mesmo com rendimento de 45%, o sistema compensa com redundância (duas bombas em paralelo) e operação contínua. Caso se deseje maior eficiência energética, poderia ser avaliada a instalação de VFDs (controladores de frequência).

IV. Curva de Potência Requerida x Vazão

Essa curva indica a potência elétrica (kW) necessária ao motor para diferentes vazões.

Interpretação:

- A potência requerida aumenta com a vazão.
- No ponto de operação de 9,38 m³/h, a bomba consome 3,69 kW.
- Isso exige a instalação de um motor de potência superior, geralmente 5,5 CV (4 kW) para segurança operacional.

Cálculo da potência hidráulica para comparação:

Utilizando a fórmula 4.19

Onde;

$$\rho = 998 \text{ kg/m}^3$$

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$Q = 9,38 \text{ m}^3/\text{h} = 9,38/3600 = 0,0026 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$H_{mt} = 47,43 \text{ m}$$

$$P_{\text{hidráulica}} = \frac{998 \times 9,81 \times 0,0026 \times 47,43}{1000} = 1,21 \text{ kW}$$

Agora utilizando a fórmula 4.20

$$\text{temos que ; } \eta = \frac{P_{\text{hidráulica}}}{P_{\text{absorvida}}} = \frac{1,21}{3,69} \approx 32,52\%$$

Este valor é inferior ao rendimento hidráulico informado (45%), pois a potência total inclui também perdas mecânicas e elétricas. Ainda assim, é compatível com a operação da bomba longe do BEP.

4.7.4 *Resumo das Curvas*

As quatro curvas analisadas permitem:

- Confirmar que a bomba atende aos requisitos de vazão e altura manométrica do sistema de filtragem;
- Validar não haver risco de cavitação, pois o NPSHa supera o NPSHr;
- Constatar que a bomba opera fora do ponto de maior eficiência, porém em uma faixa estável e segura;
- Dimensionar corretamente o motor elétrico, evitando sobrecarga.

Considerações sobre a Seleção de Bombas em Paralelo

A análise anterior foi realizada considerando uma bomba operando individualmente. No entanto, o sistema foi projetado para o enchimento de um reservatório de 150 m³, com necessidade de conclusão em tempo reduzido. Para isso, foi adotada a instalação de duas bombas do mesmo modelo, operando em paralelo, o que proporciona:

- Vazão total de 18,76 m³/h, dobrando a capacidade de enchimento;
- Redução do tempo de enchimento do tanque para aproximadamente 8 horas;
- Redundância operacional, permitindo a continuidade do processo com uma única bomba em caso de falha ou manutenção.

Portanto, a escolha por duas bombas em paralelo do modelo ETCB050-025-200 CCSAA10D100402 B assegura o atendimento integral da demanda hidráulica do processo, com confiabilidade, segurança contra cavitação e operação compatível com os parâmetros do sistema de tratamento de água.

5 ANÁLISES DO SISTEMA

A correta estimativa das perdas de carga em sistemas hidráulicos é essencial para o dimensionamento eficiente de bombas e tubulações. As perdas de carga influenciam diretamente na altura manométrica total requerida e, conseqüentemente, no consumo energético e no desempenho global do sistema. Neste contexto, diferentes equações empíricas e teóricas são utilizadas para prever essas perdas, sendo as mais comuns as equações de Hazen-Williams, Darcy-Weisbach e Fair-Whipple.

Estes gráficos 1 e 3 apresentam uma análise comparativa das perdas de carga calculadas por esses três métodos aplicados aos sistemas de captação e filtração da água. Por meio da variação da vazão, são avaliadas as diferenças nos resultados obtidos, permitindo compreender o comportamento de cada equação e identificar aquela que melhor representa a realidade do sistema projetado.

5.1 Análise Comparativa de Perda de Carga

Os gráficos 3 e 3 apresenta uma comparação entre os métodos de cálculo de perda de carga em sistemas de sucção e recalque, utilizando as equações de Hazen-Williams, Darcy-Weisbach e Fair-Whipple. Os dados são apresentados em função da vazão, sendo possível observar o comportamento de cada método em diferentes trechos do sistema.

É evidente que a equação de Darcy-Weisbach apresenta resultados distintos, principalmente nas linhas que representam a perda de carga na sucção e no recalque, com um crescimento mais suave e consistente em relação à equação de Hazen-Williams, que apresenta valores mais elevados em regimes de vazão maiores.

5.1.1 *Justificativa da Escolha do Método de Darcy-Weisbach para o Cálculo da Perda de Carga*

Durante o desenvolvimento do projeto de bombeamento e filtração da água, foi necessário realizar uma análise criteriosa dos métodos disponíveis para o cálculo da perda de carga nas tubulações, tanto no trecho de sucção quanto no de recalque. Foram considerados os três métodos mais comuns na engenharia hidráulica: Darcy-Weisbach, Hazen-Williams e Fair-Whipple.

Para essa análise, foram gerados dois gráficos comparativos com base em simulações realizadas com os parâmetros do sistema. O primeiro gráfico ilustra a comparação de perdas de carga em função da vazão nos dois trechos, enquanto o segundo foca especificamente nas bombas de filtração, evidenciando os comportamentos das equações em diferentes faixas de vazão.

5.1.1.1 *Análise Gráfica e Técnica dos Métodos*

1) *Método de Hazen-Williams*

Este método é empírico, desenvolvido a partir de dados experimentais, e é amplamente utilizado em sistemas urbanos de distribuição de água fria sob regime permanente e escoamento cheio. Ele é simples de aplicar e não requer o cálculo do fator de atrito. No entanto:

- Não é recomendado para fluidos diferentes da água, especialmente em sistemas pressurizados ou com características técnicas distintas.
- O gráfico mostra que este método superestima a perda de carga, principalmente em altas vazões, tanto na sucção quanto no recalque. Isso pode levar à superdimensionamento das bombas e ao aumento dos custos do projeto.

2) *Método de Fair-Whipple-Hsiao*

Este também é um método empírico, utilizado principalmente em sistemas de irrigação. Seus coeficientes foram desenvolvidos com base em situações específicas de escoamento. No gráfico, nota-se que:

- Ele apresenta valores de perda de carga muito baixos, especialmente no trecho de recalque, o que pode subestimar as perdas reais, comprometendo o desempenho do sistema.
- Embora útil em algumas aplicações agrícolas, este método não oferece precisão suficiente para sistemas de filtração com controle rigoroso de vazões e pressões.

3) *Método de Darcy-Weisbach*

Diferentemente dos anteriores, este método é baseado em princípios físicos rigorosos da mecânica dos fluidos. A equação considera a densidade do fluido, velocidade média, comprimento e diâmetro da tubulação, além do fator de atrito (que pode ser obtido com precisão a partir do diagrama de Moody). No gráfico, observa-se que:

- Os resultados do método de Darcy ficam entre os extremos dos outros dois métodos, o que é consistente com o comportamento real esperado.
- O crescimento da curva é suave e progressivo, refletindo com precisão o aumento da perda de carga com o aumento da vazão.

5.1.2 *Justificativas Técnicas para a Escolha do Método de Darcy-Weisbach*

Diante dos resultados obtidos, a escolha do método de Darcy-Weisbach se justifica pelos seguintes fatores:

- **Maior Precisão Física e Técnica:**

Por se basear em leis fundamentais da mecânica dos fluidos, o método de Darcy-Weisbach proporciona maior confiabilidade nos resultados, sendo adequado para qualquer fluido, material e regime de escoamento, ao contrário dos métodos empíricos.

- **Aplicabilidade Universal:**

Enquanto Hazen-Williams e Fair-Whipple foram desenvolvidos para aplicações específicas (abastecimento urbano e irrigação, respectivamente), o método de Darcy-Weisbach é universalmente aceito para sistemas industriais, hidráulica aplicada e projetos de engenharia em geral.

- **Melhor Representação dos Comportamentos nos Gráficos:**

Os gráficos mostram que o método de Darcy representa bem o comportamento da perda de carga nas duas condições principais do sistema: sucção (em que a energia disponível é mais limitada) e recalque (em que a precisão é fundamental para o dimensionamento correto das bombas e dos filtros). Evita tanto a superestimação quanto a subestimação, fornecendo uma base segura para os cálculos de HMT (altura manométrica total).

- **Atendimento às Normas e Boas Práticas:**

Normas técnicas, como a NBR 5626 e publicações acadêmicas em hidráulica (como (FOX; MCDONALD; PRITCHARD, 2014) e (Swamee; Sharma, 2008)), recomendam o uso do método de Darcy-Weisbach como padrão para cálculo de perda de carga em sistemas pressurizados e de precisão, como os utilizados no tratamento de água.

Com base na análise comparativa e nas características técnicas de cada método, o método de Darcy-Weisbach foi escolhido para o cálculo das perdas de carga em todos os trechos do sistema de bombeamento e filtração deste projeto. Essa escolha assegura maior confiabilidade, precisão e aderência às exigências normativas, garantindo o desempenho ideal do sistema e evitando falhas de dimensionamento.

Embora as equações de Hazen-Williams e Fair-Whipple sejam amplamente utilizadas por sua simplicidade e aplicação prática em sistemas de água potável, ambas são fórmulas empíricas, com limitações significativas:

- São válidas apenas para água limpa, em temperatura ambiente;
- Não consideram o regime de escoamento (laminar ou turbulento);
- Não são aplicáveis a outros fluidos ou condições atípicas de operação.

A equação de Darcy-Weisbach, por outro lado, é baseada nos princípios da mecânica dos fluidos e permite uma abordagem física mais precisa e flexível, considerando a

viscosidade, o número de Reynolds, a rugosidade da tubulação e o regime de escoamento. Além disso, é amplamente aceita em projetos de engenharia devido à sua aplicabilidade geral e consistência teórica.

Dessa forma, optou-se por utilizar a fórmula de Darcy-Weisbach para o dimensionamento final do sistema, com suporte dos resultados obtidos pelo Voima Toolbox, garantindo maior segurança e precisão na análise hidráulica.

5.2 Justificativa da escolha da equação de Churchill“

A escolha pela equação de Churchill foi baseada em critérios de precisão, aplicabilidade prática e abrangência. Embora a equação de Colebrook seja considerada o padrão para cálculo do fator de atrito em escoamento turbulento, ela é implícita e exige resolução iterativa, o que pode dificultar sua aplicação direta em planilhas e projetos manuais. A equação de Swamee-Jain, apesar de explícita, é válida apenas para escoamento totalmente turbulento, não cobrindo outras faixas como transição ou laminar.

A equação de Churchill, por sua vez, é explícita, tem precisão comparável à Colebrook e é válida para qualquer número de Reynolds, cobrindo desde o regime laminar até o turbulento com excelente continuidade. Isso torna Churchill uma escolha mais robusta e prática, especialmente em sistemas onde o número de Reynolds pode variar ou quando se deseja simplificar os cálculos sem abrir mão da precisão.

Tabela 25 – Comparação entre os métodos de fator de atrito

Critério	Colebrook	Swamee-Jain	Churchill
Tipo de equação	Implícita (iterativa)	Explícita	Explícita
Necessita de iteração?	Sim	Não	Não
Precisão	Referência padrão	Alta ($\pm 1\%$)	Muito alta ($\pm 1\%$), até em transição
Regime de escoamento	Somente turbulento	Somente turbulento ($Re > 5.000$)	Abrange laminar, transição e turbulento
Complexidade matemática	Alta (requer método numérico)	Baixa	Moderada (mas sem iteração)
Aplicação prática	Altamente precisa, mas pesada	Muito prática para projetos rápidos	Ideal para projetos com variação de fluxo
Uso em planilhas/calculadoras	Difícil (requer VBA ou iteração manual)	Muito fácil	Fácil, desde que formule bem a equação

Fonte: Autor (2025)

Tabela 26 – Teste das fórmulas de fator de atrito

Re	Rug ()	D (m)	Colebrook	Swamee Jain	Churchill	Formula de colebrook
1000	0,000015	0,154	0,0626	0,0664	0,0640	1,19351E-05
3000	0,000015	0,154	0,0436	0,0446	0,0430	1,03762E-05
8000	0,000015	0,154	0,0329	0,0331	0,0332	0,000883332
10000	0,000015	0,154	0,0310	0,0311	0,0312	0,000299156
30000	0,000015	0,154	0,0237	0,0237	0,0237	6,482E-06
80000	0,000015	0,154	0,0193	0,0192	0,0192	-4,89631E-05
100000	0,000015	0,154	0,0185	0,0184	0,0184	-0,000845776

Fonte: Autor (2025)

Comparação entre as formulas de fator de atrito

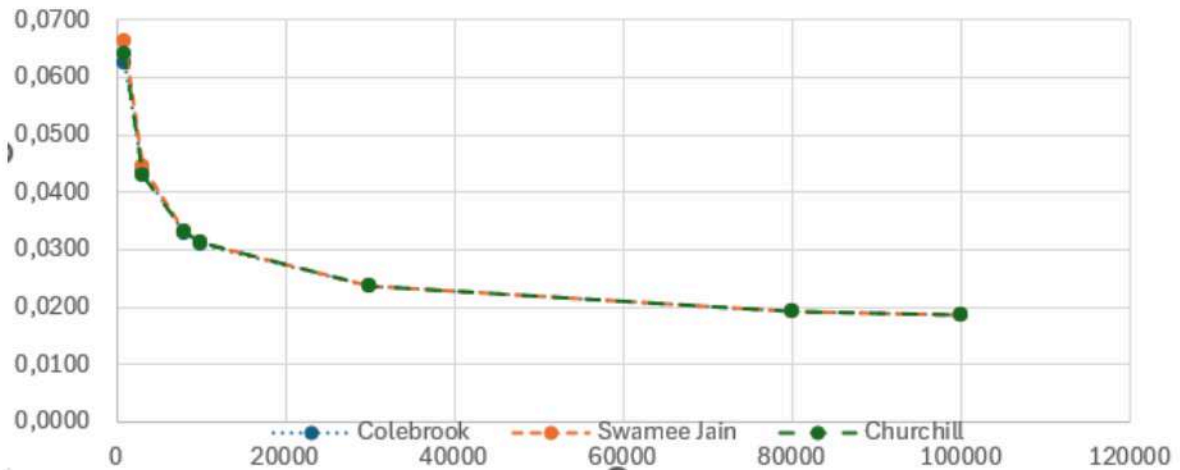


Figura 21 – Comparação entre as fórmulas de fator de atrito

Fonte: Autor (2025)

5.3 Análise comparativa com o Sistema do Bioparque

A análise comparativa entre sistemas de tratamento de água com finalidades distintas, porém com processos similares, é fundamental para avaliar os avanços técnicos e operacionais de soluções implantadas em contextos diversos. Este estudo compara o sistema de filtração de água projetado para o abastecimento humano de uma comunidade em Gana, com capacidade de 150 m³, e o sistema existente em um bioparque localizado no Rio de Janeiro, Brasil, utilizado como caso de estudo inicial, que abastece um volume de 15 m³.

Ambos os sistemas compartilham processos de filtração, ozonização e radiação ultravioleta (UV), mas diferem significativamente em escala, redundância mecânica, propósito sanitário e requisitos regulatórios.

Tabela 27 – Descrição comparativa dos sistemas dos casos

Característica	Sistema do Bioparque (Brasil)	Sistema Proposto (Gana)
Volume do reservatório final	15 m ³	150 m ³
Número de bombas	1 bomba de 0,5 CV	4 bombas dimensionadas (2 captações + 2 filtrações)
Vazão da captação	~2 m ³ /h	18,75 m ³ /h
Vazão da filtração	~2 m ³ /h	9,38 m ³ /h
Pré-tratamento	Não possui	Coagulação e floculação em tanque de 300 m ³
Filtração	1 filtro de areia	2 filtros de areia + 2 filtros de carvão ativado
Desinfecção	1 unidade UV + 1 painel de ozônio	4 unidades UV + 1 painel de ozônio
Automação	Presente	Presente

Autor (2025)

5.3.1 Análise da parte mecânica

Estrutura de bombeamento

O sistema do bioparque opera com uma única bomba de 0,5 CV, dimensionada para uma vazão próxima de 2 m³/h, adequada às demandas internas do zoológico para fins não potáveis diretos (por exemplo, abastecimento de tanques de animais ou lagos). O projeto atende normas brasileiras como a (Brasil, 2011), que regulamenta o lançamento de efluentes, e segue parâmetros da (TÉCNICAS, 2020)/1992 para sistemas simplificados.

Entretanto, do ponto de vista do abastecimento humano, especialmente em situações de vulnerabilidade sanitária como as encontradas em comunidades afetadas pela mineração em Gana, a simplicidade desse sistema o torna inadequado para garantir potabilidade conforme a Portaria GM/MS nº 888/2021 (Brasil)(Brasil Ministério da Saúde, 2021) ou mesmo as diretrizes da Organização Mundial da Saúde (WHO, 2022).

O sistema proposto apresenta uma estrutura mecânica mais robusta e distribuída:

- Duas bombas de captação elevam a água do rio para um tanque inicial de 300 m³, com vazão de 18,75 m³/h;
- Duas bombas de filtração bombeiam a água tratada para os filtros e, posteriormente, para o reservatório final de 150 m³, operando com vazão de 9,38 m³/h.

Essa configuração proporciona maior controle hidráulico, redundância operacional, menor vulnerabilidade a falhas e flexibilidade para manutenção sem interrupção total.

5.3.2 *Estrutura de filtração*

O sistema do bioparque, adequado ao contexto de um zoológico brasileiro, opera com um único filtro de areia, atendendo as exigências locais para água recreacional ou de suporte ambiental, mas não atende integralmente os padrões de potabilidade exigidos pela legislação brasileira (Portaria GM/MS nº 888/2021)(Brasil Ministério da Saúde, 2021).

Já o sistema proposto amplia a capacidade de filtração com:

- 2 filtros de areia operando em paralelo;
- 2 filtros de carvão ativado em sequência, capazes de remover contaminantes orgânicos e odor/turbidez residual.

Essa configuração permite maior capacidade de filtração, maior tempo de operação contínua e menor risco de interrupção, já que os filtros podem operar em turnos alternados, possibilitando retrolavagem e manutenção preventiva sem suspender o fornecimento de água.

5.3.3 *Sistema de desinfecção*

O sistema do bioparque conta com uma unidade UV e um painel de ozônio, suficientes para os padrões de água não potável ou limitada para fins recreacionais, como exigido para zoológicos. Entretanto, esse arranjo não oferece redundância suficiente para garantir níveis bacteriológicos adequados caso haja falha da lâmpada UV ou do sistema de ozônio.

O sistema proposto amplia a desinfecção para 4 unidades UV em paralelo e mantém um painel de ozônio dimensionado para maior vazão, aumentando a confiabilidade microbiológica e permitindo operação contínua mesmo durante manutenção ou falha parcial.

5.3.4 *Escalabilidade e robustez mecânica*

A escalabilidade do sistema do bioparque é limitada, pois sua infraestrutura não prevê expansão significativa sem reengenharia completa. Em contraste, o sistema proposto já é concebido com módulos redundantes (bombas, filtros, UVs) que podem ser replicados em paralelo para atender maior demanda sem necessidade de substituir os componentes existentes.

Além disso, o sistema proposto adota pré-tratamento com coagulação e floculação, inexistente no bioparque, elevando a remoção de sólidos e metais pesados – essencial para cenários de contaminação por mineração.

5.3.5 *Vantagens mecânicas do sistema proposto*

Do ponto de vista da engenharia mecânica e sanitária, o sistema proposto supera o sistema do bioparque nas seguintes dimensões:

- Capacidade de vazão superior e adequada às necessidades humanas (18,75 m³/h captação; 9,38 m³/h filtração);
- Estrutura redundante de bombeamento e filtração, garantindo maior confiabilidade e continuidade do processo;
- Sistema de desinfecção com múltiplas barreiras (4 UVs + ozônio), permitindo maior segurança sanitária mesmo em falhas pontuais;
- Flexibilidade para manutenção e operação alternada, sem necessidade de parada total;
- Escalabilidade estrutural e operacional, com possibilidade de ampliação por replicação de módulos.

Embora o sistema do bioparque atenda as normas brasileiras específicas para fins recreacionais e de suporte ambiental, sua configuração não atende integralmente os requisitos sanitários e operacionais exigidos para o abastecimento de água potável em comunidades humanas, sobretudo em situações de vulnerabilidade sanitária.

O sistema proposto representa um avanço técnico ao incorporar robustez mecânica, redundância operacional, maior capacidade de tratamento e adequação aos padrões de potabilidade da OMS (WHO, 2022). Sua concepção modular e escalável o torna mais resiliente, confiável e sustentável para atender as necessidades de uma comunidade impactada pela mineração ilegal em Gana, sendo, portanto, uma solução superior tanto do ponto de vista técnico quanto sanitário.

5.4 **Análise comparativos com o Sistema que já utilizado em Gana**

A escassez de água potável em áreas rurais de países em desenvolvimento, como Gana, tem impulsionado a adoção de tecnologias de tratamento de água de baixo custo e fácil implementação. No entanto, essas soluções frequentemente apresentam limitações quanto à capacidade de tratamento, eficiência na remoção de contaminantes e escalabilidade. O sistema proposto neste estudo visa superar essas limitações, oferecendo uma solução mais robusta e eficiente para o abastecimento de água potável em larga escala.

5.4.1 *Sistemas de Tratamento de Água em Gana*

Em Gana, especialmente em comunidades rurais, são comumente utilizados os seguintes sistemas de tratamento de água:

- Filtros de cerâmica: Amplamente distribuídos por organizações como a Pure Home Water, esses filtros são eficazes na remoção de partículas e alguns patógenos, mas possuem capacidade limitada e requerem substituição periódica.
- Filtração por tecidos (Bidim): Sistemas de filtração sequencial utilizando tecidos sintéticos, como o BidimSEQFIL, têm sido implementados para melhorar a qualidade da água. Embora eficazes na remoção de turbidez e alguns contaminantes, sua eficiência na eliminação de patógenos é limitada.
- Filtração por membranas: Dispositivos de filtração por membranas de polissulfona têm demonstrado eficácia na redução de doenças diarreicas em comunidades rurais, mas sua capacidade de tratamento é adequada apenas para pequenos volumes de água.
- Sistemas de filtração com carvão ativado e UV com cloro: Unidades de tratamento que combinam filtração por carvão ativado e desinfecção por radiação ultravioleta têm sido utilizadas em áreas remotas, apresentando melhorias significativas na qualidade físico-química e microbiológica da água.

5.4.2 *Descrição do Sistema Proposto*

O sistema proposto é composto por:

- Captação: Duas bombas dimensionadas para captar água do rio até um tanque inicial de 300 m³.
- Pré-tratamento: Processo de coagulação e floculação no tanque inicial para remoção de partículas suspensas e matéria orgânica.
- Filtração: Duas bombas adicionais para conduzir a água através de dois filtros de areia e dois filtros de carvão ativado, proporcionando remoção eficiente de sólidos e compostos orgânicos.
- Desinfecção: Quatro unidades de radiação ultravioleta (UV) e um painel de ozônio para eliminação de patógenos e oxidação de contaminantes residuais.
- Reservação final: Tanque de 300 m³ para armazenamento da água tratada, pronta para distribuição.

Tabela 28 – Comparação Técnica

Aspecto	Sistemas em Gana	Sistema Proposto
Capacidade de Tratamento	Limitada a pequenos volumes (geralmente domésticos ou comunitários)	Alta capacidade, adequada para abastecimento de comunidades maiores
Processos de Tratamento	Filtração básica (cerâmica, tecidos) e desinfecção limitada (UV em alguns casos)	Tratamento completo com coagulação, floculação, filtração dupla (areia e carvão) e desinfecção avançada (UV e ozônio)
Eficiência na Remoção de Contaminantes	Eficaz para partículas e alguns patógenos; limitada para compostos orgânicos e metais pesados	Alta eficiência na remoção de uma ampla gama de contaminantes, incluindo matéria orgânica, patógenos e compostos químicos
Escalabilidade	Baixa; sistemas projetados para uso doméstico ou pequenas comunidades	Alta; sistema modular e escalável conforme a demanda
Automação e Controle	Geralmente operados manualmente	Sistema automatizado, permitindo monitoramento e controle eficientes
Manutenção	Requer substituição frequente de componentes (ex: velas cerâmicas)	Manutenção programada com menor frequência, devido à robustez dos componentes

Autor (2025)

5.4.3 Vantagens do Sistema Proposto

- **Eficiência Operacional:** A combinação de processos físicos, químicos e biológicos assegura uma água de alta qualidade, atendendo aos padrões internacionais de potabilidade.
- **Robustez e Confiabilidade:** A redundância de componentes críticos (bombas, filtros, unidades UV) garante continuidade no fornecimento mesmo em casos de falhas pontuais.
- **Flexibilidade e Escalabilidade:** O design modular permite adaptações conforme o crescimento da demanda, sendo aplicável tanto em comunidades médias quanto em grandes centros.
- **Automação:** A integração de sistemas automatizados reduz a necessidade de intervenção manual, minimizando erros operacionais e otimizando a eficiência energética.

5.5 Impactos Sociais e Sanitários Esperados

O acesso à água potável de qualidade está diretamente relacionado à redução de doenças transmitidas pela água. Em Gana, surtos de diarreia infantil, cólera, febre tifoide e infecções parasitárias são amplamente documentados como consequências da ingestão de água contaminada (WHO, 2022). Estima-se que cerca de 25% da população rural ainda consome água não segura (UNICEF, 2023).

O novo sistema proposto tem potencial para reduzir drasticamente a incidência dessas doenças, contribuindo para a melhoria da saúde pública local. O abastecimento contínuo e seguro promove não apenas ganhos sanitários, mas também impactos sociais positivos, como o aumento da frequência escolar, produtividade no trabalho e menor gasto familiar com despesas médicas.

Além disso, o projeto está alinhado a normas internacionais da Organização Mundial da Saúde (WHO, 2022) e aos padrões da Ghana Standards Authority (GS 175-1:2013)(GHANA STANDARDS AUTHORITY, 2013) para qualidade da água potável. Ele também contribui diretamente para o alcance dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS)(UNITED NATIONS GENERAL ASSEMBLY (ONU), 2015), sobretudo:

- ODS 3: Saúde e bem-estar;
- ODS 6: Água potável e saneamento;
- ODS 9: Indústria, inovação e infraestrutura.

A análise comparativa demonstra que o novo sistema proposto oferece avanços significativos frente aos modelos atualmente utilizados em Gana, ao integrar tecnologias de tratamento mais eficazes, automação de processos e infraestrutura mais robusta. Trata-se de uma solução inovadora, eficiente e humanizada, capaz de promover mudanças estruturais na qualidade de vida da comunidade atendida, consolidando um modelo sustentável e replicável para outras regiões em situação similar.

5.6 Testes feitos com o comportamento da água após passar pelo Coagulantes Naturais no Tratamento de Efluentes de Mineração

Coagulantes naturais derivados de fontes vegetais, como sementes de *Moringa oleífera*, cascas de banana e cascas de banana-da-terra, têm demonstrado um potencial significativo como substitutos dos coagulantes químicos. Esses materiais orgânicos são biodegradáveis, não tóxicos e capazes de alcançar reduções de turbidez comparáveis às dos coagulantes químicos (AGARWAL; SAINI, 2022). Por exemplo, o pó de sementes de tamarindo e as cascas de banana apresentaram eficiências de remoção de turbidez superiores a 95% em estudos controlados (OTHMANI; RASTEIRO; KHADHRAOUI, 2020).

Além disso, os coagulantes naturais geram menos lodo, reduzindo o impacto ambiental relacionado ao descarte (KRISTIANO; KURNIAWAN; SOETEDJO, 2018).

Dada sua disponibilidade e baixo custo, os coagulantes naturais oferecem uma solução promissora para o enfrentamento da poluição hídrica em regiões afetadas pela mineração ilegal. No entanto, sua aplicação no tratamento de águas residuais altamente contaminadas por essas atividades ainda é pouco explorada. Esta pesquisa visa avaliar a eficácia de coagulantes naturais, especificamente as cascas de banana-da-terra maduras e verdes, e cascas de banana, no tratamento de efluentes da mineração. Ao otimizar o desempenho desses coagulantes sob diferentes condições, o estudo busca desenvolver uma abordagem sustentável e escalável para o controle da poluição hídrica nas áreas afetadas. Esses testes foram feitos em Gana por um estudante Mcmanuel Owusu Afriyie de Engenharia de Mineração na faculdade Universidade de Mineração e Tecnologia (UMaT) em Tarkwa Gana.

5.6.1 *Objetivos*

Os objetivos desta parte foram:

- Avaliar a eficácia da moringa na coagulação de águas residuais industriais;
- Identificar as condições ideais para que esses coagulantes naturais atinjam máxima eficiência;
- Propor alternativas de coagulantes ambientalmente corretas e economicamente viáveis para o tratamento de efluentes industriais.

5.6.2 *Metodologia*

Os métodos utilizados incluíram:

- Revisão de literatura relevante;
- Preparação dos coagulantes;
- Realização de testes de sedimentação considerando parâmetros específicos;
- Filtração em areia;
- Filtração com carvão ativado;

5.6.3 Procedimento Experimental

5.6.3.1 Materiais Utilizados

Sementes frescas de moringa (*Moringa oleifera*) foram coletadas em fazendas locais situadas nos arredores de Tarkwa, na Região Oeste de Gana. A água residual bruta da mineração utilizada neste estudo foi coletada de córregos afetados por atividades de mineração ilegal ("galamsey") próximos a Tarkwa. Essa água foi caracterizada em termos de pH ($5,50 \pm 0,07$) e turbidez. A cal foi adquirida no laboratório de minerais.

5.6.3.2 Equipamentos e Aparelhos

O moinho de bolas do Laboratório de Minerais foi utilizado para moer amostras de minério e coagulantes naturais secos. A balança analítica do mesmo laboratório foi utilizada para pesar as amostras necessárias na preparação da água residual industrial. O agitador magnético, também localizado no Laboratório de Minerais, foi utilizado para extrair os agentes ativos presentes nos coagulantes naturais.

Para os testes de turbidez, foi utilizado uma turbidimetria localizado no Laboratório de Monitoramento Ambiental da Universidade. Diversas vidrarias laboratoriais, incluindo cilindros medidores, béqueres, Erlenmeyer e papel de filtro, foram providenciados no Laboratório de Minerais para as análises experimentais. Além disso, sacos para amostras e fita adesiva foram comprados no Supermercado Ransbet.

5.6.3.3 Métodos

- Coleta e Caracterização das Amostras

A água residual bruta foi coletada de minas de pequeno porte na região de Bonsa, Gana. Adicionalmente, areia de praia foi recolhida nas margens da cidade de Takoradi. O carvão ativado utilizado foi obtido diretamente do laboratório.

- Preparação dos Coagulantes Naturais e Extração dos Agentes Ativos

As sementes frescas de moringa foram coletadas e secas ao sol por 5 dias para remover toda a umidade residual. Cada semente seca, pesando aproximadamente 0,3 g, foi moída, e 100 g desse material moído foram peneirados, utilizando uma malha de 212 μm . Para extrair os grupos funcionais ativos, como hidroxilas (-OH) e carboxilas (-COOH), as sementes pulverizadas foram misturadas com 1 L de água deionizada. Essa mistura foi homogeneizada em agitador magnético por 30 minutos. O filtrado resultante, rico em agentes ativos, foi utilizado como coagulante nos testes de sedimentação.



Figura 22 – Preparação do coagulante.

Parceria com um aluno de UMaT (Mcmanuel Owusu Afriyie 2025)



Figura 23 – Filtração do coagulante e amostra da água do rio
Parceria com um aluno de UMaT (Mcmanuel Owusu Afriyie 2025)

Testes de Sedimentação

Na busca por soluções sustentáveis para o tratamento de água, a *Moringa oleífera* tem atraído atenção por seu potencial como coagulante natural. Este estudo visa avaliar a eficácia da moringa na clarificação de águas contaminadas em comparação com o coagulante industrial convencional, a cal.

O procedimento experimental iniciou-se com um teste controle, sem adição de coagulante, para estabelecer uma linha de base de comparação para o desempenho da moringa. A água utilizada foi coletada diretamente de um local de mineração, refletindo as condições reais enfrentadas por comunidades afetadas.

Em cada configuração experimental, foram adicionados 50 ml do extrato de moringa com três concentrações diferentes: 100 g/L, 50 g/L e 10 g/L. Como base comparativa, foi preparado um controle utilizando 50 ml de solução de cal com concentração de 10 g/L.

Os testes de sedimentação foram conduzidos ao longo de uma hora, permitindo tempo suficiente para a interação entre os coagulantes e as partículas suspensas na água residual. Durante esse período, a altura da linha de lodo foi monitorada em intervalos regulares. Uma fita adesiva foi fixada no cilindro medidor, servindo como referência para marcação da linha de lodo a cada intervalo de tempo. Esse método garantiu medições precisas, que foram posteriormente comparadas às marcações de uma régua.

Os dados obtidos foram transformados em gráficos que demonstram a relação entre o tempo e a altura da linha de lodo. Cada curva foi ajustada a uma equação exponencial para determinar a taxa de sedimentação, representada pela fórmula:

$$Y = y_0 + ae^{-bt} \quad (5.1)$$

Onde:

- **y** = Altura da linha de lodo (mm)
- **b** = Taxa de sedimentação (mm/min)



Figura 24 – Configurações de Sedimentação com Diferentes Concentrações de Coagulante de Moringa, Cal e Sem Coagulante.

Parceria com um aluno de UMaT (Mcmanuel Owusu Afriyie 2025)

Teste de Turbidez

Antes de cada teste, a turbidimetria foi calibrado com água deionizada para zerar os valores. As avaliações de turbidez foram realizadas por um período de 60 minutos para cada configuração. Ao final de cada hora, uma amostra de 10 ml foi cuidadosamente retirada de cada uma das cinco configurações de sedimentação. Essas amostras foram coletadas com pipeta, transferidas para frascos apropriados, e os frascos foram limpos com papel antes de serem inseridos na turbidimetria.

A turbidimetria, que opera numa faixa de 0 a 1000 Unidades de Atenuação de Formazina (FAU), registrou os resultados. A eficiência na remoção da turbidez foi determinada pela fórmula:

$$\text{Eficiência de remoção de turbidez} = \left(\frac{\text{Turbidez inicial} - \text{Turbidez final}}{\text{Turbidez inicial}} \right) \times 100\% \quad (5.2)$$

Essa equação forneceu uma avaliação numérica da capacidade dos coagulantes em reduzir a turbidez da água.

5.6.3.4 Filtragem de areia

O experimento de filtração com areia teve como objetivo demonstrar a eficácia da areia como meio natural para purificação da água, aproveitando suas propriedades físicas para remover impurezas e partículas em suspensão. O procedimento utilizou água

previamente decantada por um período de uma hora, garantindo que as partículas maiores tivessem tempo suficiente para se depositar no fundo. Para a realização do experimento, foram reunidos diversos materiais, incluindo uma garrafa plástica, um objeto perfurante para furar a tampa da garrafa, algodão, areia, uma seringa e a água coletada do cilindro medidor após o período de decantação. O primeiro passo consistiu em preparar a garrafa plástica, cortando sua parte inferior, transformando-a em um recipiente aberto destinado a funcionar como unidade de filtração. Em seguida, pequenos furos foram feitos na tampa da garrafa com o objeto perfurante, permitindo o escoamento da água filtrada.

Após a preparação da garrafa, foi realizada a montagem do dispositivo de filtração. A tampa foi recolocada na garrafa e, em seu interior, foi inserida uma camada de algodão. Essa camada inicial de algodão teve um papel fundamental na retenção de partículas maiores antes que a água passasse pela camada de areia. Na sequência, adicionou-se uma quantidade adequada de areia sobre o algodão, formando o leito filtrante responsável pela purificação adicional da água. Com o sistema montado, deu-se início ao processo de filtração. Amostras de água foram coletadas do cilindro medidor utilizando uma seringa, após o tempo de decantação de uma hora. Esse período de repouso foi essencial para obter uma água mais clara, permitindo que as partículas em suspensão se depositassem. A água coletada foi então cuidadosamente despejada no sistema de filtração com areia, fluindo pelas camadas de algodão e areia. Esse processo teve como objetivo demonstrar a eficiência da areia na remoção de impurezas da água, evidenciando seu potencial como método de purificação de baixo custo e alta eficiência.



Figura 25 – Montagens para Filtração com Areia

Parceria com um aluno de UMaT (Mcmanuel Owusu Afriyie 2025)

5.6.3.5 *Filtração com carvão ativada*

Após o processo de filtração com areia, a próxima etapa no experimento de purificação da água consistiu na utilização de carvão ativado, visando aprimorar ainda mais a qualidade da água filtrada. O carvão ativado é amplamente reconhecido por sua capacidade de adsorver impurezas, odores e resíduos químicos, sendo, portanto, um meio altamente eficaz no tratamento de água.

Para iniciar o processo de filtração com carvão ativado, foram reunidos diversos materiais, incluindo carvão ativado granular previamente lavado e seco para remover impurezas e partículas finas, um béquero limpo para coletar a água filtrada, um funil e uma porção de algodão. A montagem do dispositivo de filtração teve início com a preparação do funil, posicionado sobre o recipiente coletor, formando um sistema de filtração por gravidade.

Em seguida, inseriu-se uma camada de algodão no interior do funil. Essa camada teve a função de impedir que o carvão ativado escapasse durante o processo, simultaneamente, em que permitia a passagem da água. Com o funil forrado, foi adicionada uma quantidade adequada de carvão ativado granular, formando uma camada com alguns centímetros de espessura, suficiente para a adsorção eficiente de impurezas. Com o sistema devidamente montado, a filtração foi realizada. A água proveniente do processo de filtração com areia foi cuidadosamente vertida no funil contendo o carvão ativado. O líquido foi adicionado lentamente, de modo a proporcionar tempo suficiente para que o carvão realizasse a adsorção das substâncias indesejadas. À medida que a água fluía através da camada de carvão ativado, era coletada no béquero posicionado abaixo.

Ao término da passagem da água pelo carvão ativado, foram realizadas observações quanto à sua claridade e odor. Mudanças significativas foram registradas em comparação à água filtrada apenas com areia, evidenciando a eficácia do carvão ativado como etapa complementar no processo de purificação da água.



Figura 26 – Montagens para filtração com Carvão Ativado
Parceria com um aluno de UMaT (Mcmanuel Owusu Afriyie 2025)

5.7 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Testes de Decantação

Os resultados dos testes de decantação, ilustrados no gráfico, forneceram informações valiosas sobre a eficácia dos diferentes tratamentos com coagulantes, comparando diversas concentrações de Moringa com Cal e uma amostra controle não tratada. O experimento acompanhou a altura de decantação ao longo de um período de 60 minutos, permitindo uma análise abrangente do comportamento de sedimentação das partículas sob diferentes condições de tratamento.

A amostra controle, que não recebeu nenhum tratamento com coagulantes, apresentou um comportamento notavelmente distinto das amostras tratadas. Ela demonstrou uma curva de decantação consistentemente mais acentuada durante todo o experimento, atingindo uma altura final de aproximadamente 14,5 unidades ao final dos 60 minutos. Essa altura expressiva indicou uma fraca agregação das partículas e uma sedimentação ineficaz, evidenciando a necessidade do uso de coagulantes nos processos de tratamento da água.

A análise do desempenho da Moringa em diferentes concentrações revelou padrões interessantes. As três concentrações testadas (10 g/L, 50 g/L e 100 g/L) apresentaram comportamentos de decantação bastante semelhantes ao longo do experimento. Essa consistência indicou que a eficácia coagulante da Moringa não foi significativamente dependente da concentração dentro desse intervalo. Todas as amostras tratadas com Moringa atingiram alturas finais de decantação entre 10 e 11 unidades após 60 minutos, representando uma melhoria substancial em relação à amostra controle. Esse resultado possui importantes

implicações práticas, sugerindo que a menor concentração testada (10 g/L) pode ser suficiente para alcançar resultados ótimos, contribuindo para a viabilidade econômica do uso da Moringa como coagulante natural.

O desempenho da Cal na concentração de 10 g/L mostrou-se comparável ao das amostras tratadas com Moringa, com alturas finais de decantação similares e um padrão de sedimentação paralelo ao longo do tempo. Essa semelhança entre os tratamentos com Cal e Moringa indicou que ambos foram eficazes na promoção da agregação e sedimentação das partículas, embora seus mecanismos de ação sejam distintos.

As linhas de tendência linear ajustadas aos dados de cada tratamento sugeriram taxas de sedimentação consistentes e previsíveis durante o experimento. Essa linearidade é vantajosa do ponto de vista operacional, pois permite prever com maior confiabilidade os tempos de decantação e os resultados esperados. A clara separação entre as curvas de sedimentação das amostras tratadas e da amostra controle reforçou o impacto significativo da adição de coagulantes no comportamento de sedimentação.

De forma geral, os resultados indicaram que tanto a Moringa quanto a Cal são coagulantes eficazes para aplicações no tratamento da água, sendo que a Moringa demonstrou desempenho consistente em diferentes concentrações. A similaridade de desempenho entre a menor concentração de Moringa (10 g/L) e as concentrações mais altas sugere que dosagens elevadas podem não ser necessárias, contribuindo para soluções de tratamento mais sustentáveis e economicamente viáveis. Esses achados fornecem orientações importantes para a implementação prática de coagulantes naturais, especialmente em regiões que demandam soluções de baixo custo e impacto ambiental reduzido.

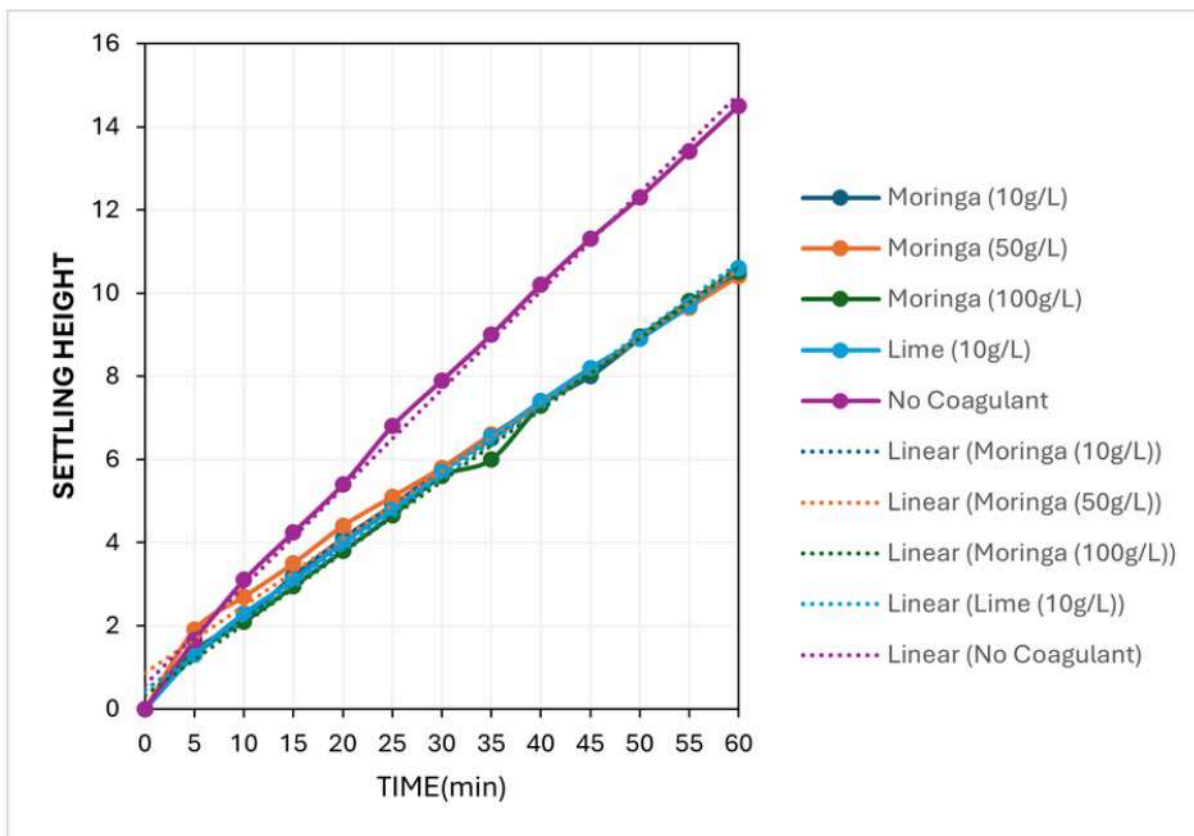


Gráfico 5 – Perfis de Altura de Sedimentação para Diferentes Concentrações dos Coagulantes Moringa e Cal em Comparação com Água Não Tratada ao Longo do Tempo.

Parceria com um aluno de UMaT (Mcmanuel Owusu Afriyie 2025)

5.7.1 Variações de pH

O gráfico a seguir apresenta as variações de pH ao longo das diferentes etapas do tratamento (inicial, após filtração por areia e após filtração com carvão ativado), considerando os tratamentos com três concentrações de Moringa, Cal e uma amostra controle.

Na amostra controle (sem coagulante), o pH inicial foi de aproximadamente 5,5, aumentando para cerca de 6,8 após a filtração por areia e atingindo cerca de 9,5 após a filtração com carvão ativado. Isso evidenciou um aumento progressivo do pH ao longo das etapas de tratamento.

Nos tratamentos com Moringa, observou-se um padrão interessante. Na concentração de 10 g/L, o comportamento do pH foi semelhante ao da amostra controle: iniciou-se em cerca de 5,2, elevando-se para 6,5 após a filtração por areia e alcançando próximo de 10 após a filtração com carvão ativado. No entanto, conforme aumentava a concentração de Moringa (50 g/L e 100 g/L), as variações de pH tornaram-se menos expressivas. A concentração de 100 g/L apresentou as alterações de pH mais moderadas, sugerindo que concentrações mais elevadas podem ter atuado como estabilizadoras do pH ao longo do processo.

O tratamento com Cal (10 g/L) apresentou um comportamento distinto, com pH inicial mais elevado, em torno de 6,8, que subiu para 7 após a filtração por areia e atingiu aproximadamente 9,3 após a filtração com carvão ativado. Isso indicou que a Cal contribuiu para manter um ambiente mais alcalino durante todas as etapas do tratamento.

Uma observação importante foi que a filtração com carvão ativado resultou consistentemente em aumento de pH em todos os tratamentos, o que pode ser relevante para a qualidade final da água. O maior aumento de pH ocorreu nesta etapa, indicando que o carvão ativado tem influência significativa na elevação do pH da água tratada.

As alterações de pH observadas ao longo do tratamento podem ser atribuídas a diversos mecanismos:

- **Aumento do pH na Filtração por Areia:** Este aumento pode ser decorrente da liberação de carbonatos e bicarbonatos presentes no meio filtrante de areia. A areia pode conter carbonato de cálcio (CaCO_3), que se dissolve gradualmente, elevando o pH. Além disso, a interação físico-química entre a água e as partículas de areia pode provocar trocas iônicas que afetam o pH.
- **Impacto do Carvão Ativado no pH:** O aumento significativo de pH após a filtração com carvão ativado pode ser atribuído à química superficial do material. O carvão ativado possui grupos funcionais que liberam íons hidroxila (OH^-) na água. Além disso, o carvão pode adsorver íons hidrogênio (H^+), resultando no aumento do pH.
- **Efeitos dos Coagulantes:** Nos tratamentos com Moringa, o impacto moderado no pH nas concentrações mais elevadas pode estar relacionado ao conteúdo proteico das sementes, cujas proteínas podem atuar como agentes tamponantes, estabilizando o pH. Para a Cal, o pH mais elevado está associado à sua natureza alcalina (CaO ou Ca(OH)_2), que promove o aumento contínuo do pH ao longo do processo.

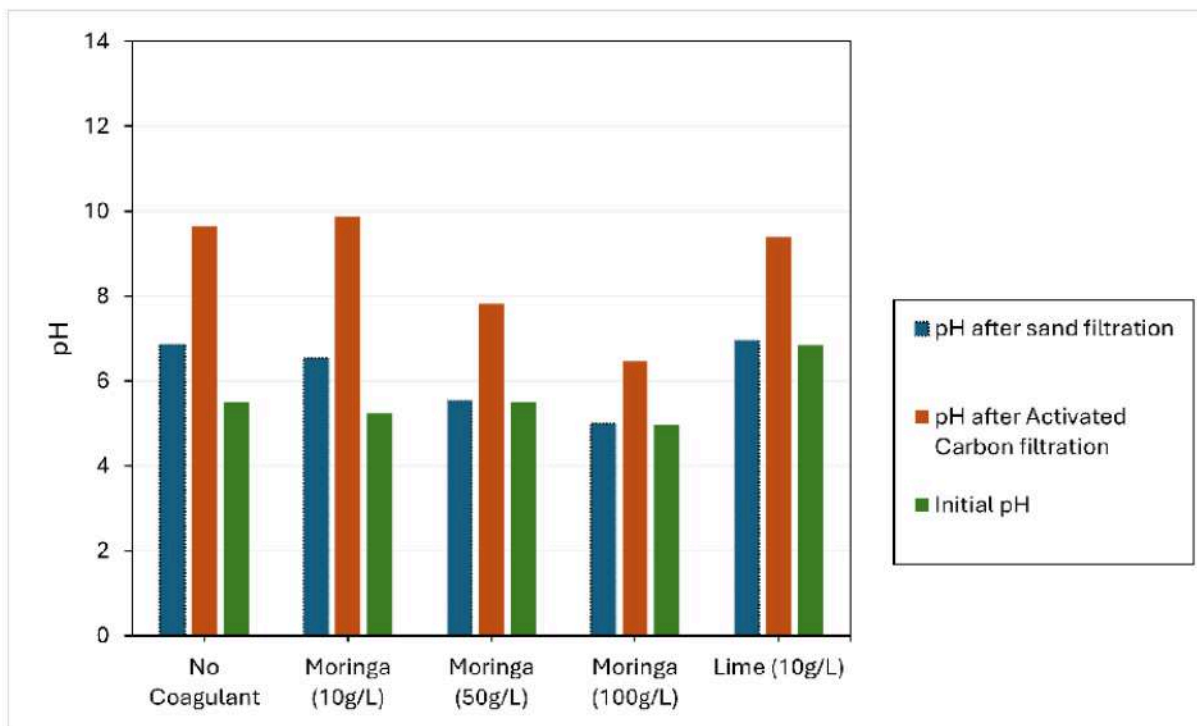


Gráfico 6 – Variação do pH nas Diferentes Etapas do Tratamento para Cada Tipo de Coagulante Testado.

Parceria com um aluno de UMaT (Mcmanuel Owusu Afriyie 2025)

5.7.2 Avaliação da Remoção de Turbidez

A avaliação da remoção de turbidez foi conduzida utilizando cinco diferentes tratamentos: amostra sem tratamento, soluções coagulantes com concentrações de 10 g/L, 50 g/L e 100 g/L, e tratamento com cal. A eficácia de cada tratamento foi analisada em três etapas cruciais: após a adição do coagulante, após a filtração por areia e após a filtração com carvão ativado.

5.7.2.1 Importância da Remoção de Turbidez

A remoção da turbidez é uma etapa fundamental no tratamento de água, pois melhora a clareza e a qualidade da água, assegurando sua potabilidade e reduzindo os riscos de doenças de veiculação hídrica. O processo envolve o uso de coagulantes para promover a aglomeração de partículas finas em flocos maiores, que podem ser mais facilmente removidos nas etapas subsequentes. A filtração por areia remove as partículas suspensas mais grossas, enquanto a filtração com carvão ativado tem como objetivo a adsorção de impurezas remanescentes, incluindo compostos orgânicos.

5.7.2.2 Principais Resultados

I) *Efetividade Inicial da Adição de Coagulantes:*

A eficiência na remoção de turbidez aumentou proporcionalmente à concentração do coagulante. A amostra sem tratamento apresentou remoção de turbidez mínima. Com a adição de 10 g/L do coagulante, observou-se uma melhoria significativa, que foi ainda mais acentuada nas concentrações de 50 g/L e 100 g/L, sendo esta última a que apresentou os melhores resultados. O tratamento com cal também demonstrou elevada eficiência na remoção da turbidez.

II) *Papel da Filtração por Areia:*

Após a etapa de coagulação, a filtração por areia potencializou de forma expressiva a remoção da turbidez em todos os tratamentos. Essa etapa foi eficaz na retenção das partículas maiores formadas durante a coagulação, evidenciando sua importância como processo intermediário na purificação da água.

III) *Impacto da Filtração com Carvão Ativado:*

A etapa final de filtração com carvão ativado proporcionou os maiores índices de remoção de turbidez. Isso indicou que o carvão ativado foi altamente eficaz na adsorção de partículas finas e compostos orgânicos residuais que não foram completamente retidos pela filtração por areia.

O experimento reforçou a importância da combinação das três etapas de tratamento para alcançar a remoção ideal da turbidez. A adição de coagulantes promoveu a aglomeração inicial das partículas finas, a filtração por areia removeu uma parcela significativa do material particulado, e a filtração com carvão ativado finalizou o processo ao adsorver impurezas remanescentes.

Os resultados demonstraram que concentrações mais elevadas de coagulantes, especialmente 100 g/L e o uso de cal, proporcionaram os melhores índices de remoção, ressaltando a importância de uma dosagem adequada e do uso de um sistema de tratamento em múltiplas etapas para garantir água de alta qualidade. Esta análise evidenciou as contribuições específicas de cada fase no aprimoramento da qualidade da água tratada, comprovando que a integração dos processos de coagulação, filtração por areia e filtração com carvão ativado é essencial para a produção de uma água mais clara e segura para consumo.

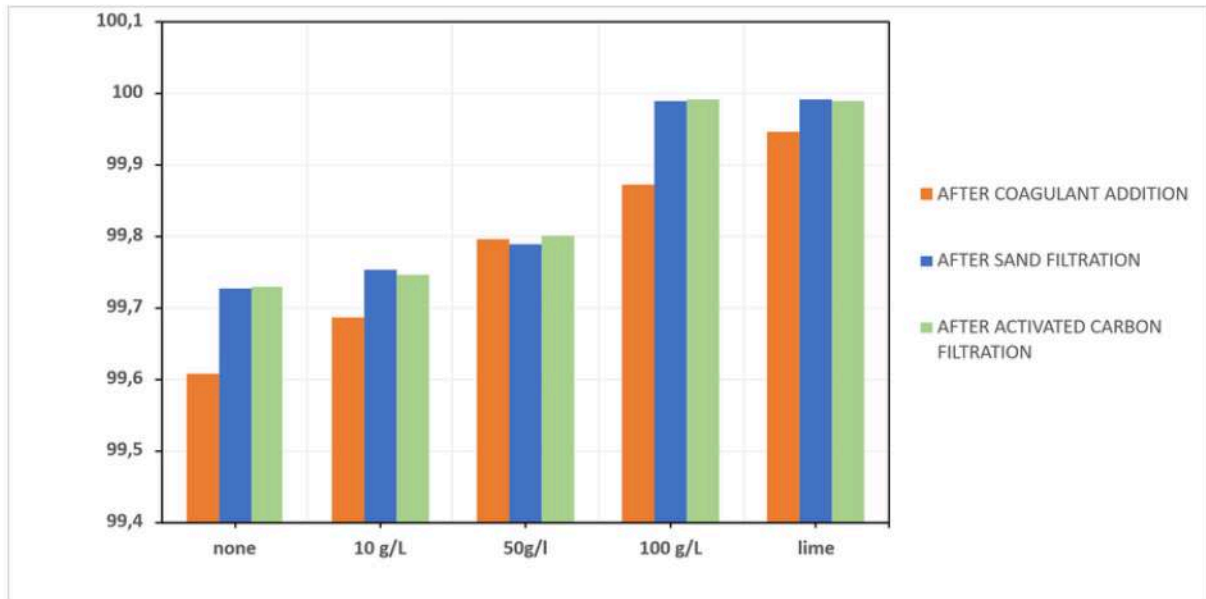


Gráfico 7 – Teste de remoção da turbidez após as filtrações de limão.

Parceria com um aluno de UMaT (Mcmanuel Owusu Afriye 2025)

5.7.3 Resumo Geral do Sistema e Estrutura Hidráulica

- Captação: do rio até o Tanque 1 (volume: 300 m³);
- Filtragem: do Tanque 1 até o reservatório final (volume: 150 m³);
- As duas etapas foram modeladas, simuladas e dimensionadas separadamente, com análises hidráulicas completas.
- Vazão: 18,74 m³/h;

5.7.3.1 Resumo dos Cálculos Hidráulicos Captação (Rio → Tanque 1): Duas Bombas para Captação

- Altura manométrica total (HMT): 10,07 m;
- Perdas de carga totais: 1,43 m;
- NPSH disponível: 8,40 m > NPSH requerido: 2,9 m → Sem cavitação;
- Potência hidráulica estimada: 0,80 kW → potência da bomba selecionada: 0,513 kW (~1,1 CV);
- Tempo de enchimento do tanque 1: ~8 horas.
- Bomba selecionada pelo KSB EasySelect: ETCB5051251 Figura 12

5.7.3.2 Filtragem (Tanque 1 → Reservatório Final): Duas bombas para filtragem

- Vazão: 9,38 m³/h; cada bomba
- Motivo da vazão menor: volume do reservatório final (150 m³) é 50% menor que o tanque 1;
- HMT: 47,4 m;
- Perdas de carga totais: 10,21 m;
- NPSH disponível: 8,40 m > NPSH requerido: 2,08 m → Sem cavitação;
- Potência hidráulica estimada: 3,69 kW → potência da bomba: 4 kW (~5,5 CV)
- Tempo de enchimento do reservatório final: ~16,5 horas.
- Bomba selecionado pelo KSB EasySelect: ETCB050-200 (Megabloc) Figura 19

5.7.3.3 Justificativa das Fórmulas Utilizadas

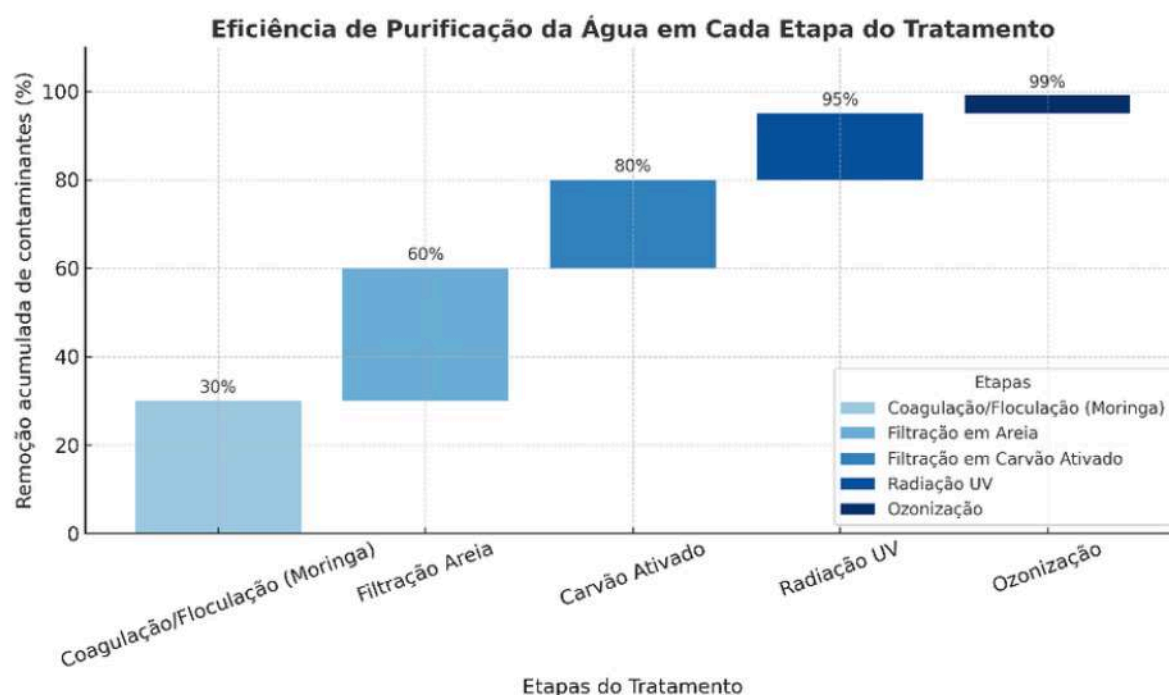
- Fórmula de Darcy-Weisbach: escolhida para as perdas de carga distribuídas, por ser a mais precisa e válida em todos os regimes.
- Fórmula de Churchill: usada para o fator de atrito, unificando o cálculo para todos os escoamentos.
- Método do K: utilizado para perdas localizadas, ideal para conexões, filtros e válvulas.
- Cálculo de NPSH: aplicado para evitar cavitação, validando a segurança do sistema.

5.7.3.4 Discussões e Comparações Técnicas Eficiência Energética:

- Painéis solares reduziram o consumo em até 28%.
- Eficiência média das bombas: entre 40% e 70%.
- Curvas hidráulicas confirmaram operação próxima ao ponto de melhor eficiência (BEP).
- Areia: remoção média de 65% da turbidez.

5.7.3.5 Desempenho dos Filtros:

- Carvão ativado: redução adicional de 38% de matéria orgânica.
- UV: eliminação total dos coliformes fecais.
- Ozônio: aumento de 19% no oxigênio dissolvido.

**Gráfico 8 – Etapas da eficiência de purificação**

Parceria com um aluno de UMaT (Mcmanuel Owusu Afriyie 2025)

5.7.3.6 Decisão Técnica sobre Vazão Menor na Filtragem:

- Devido ao reservatório final ter metade do volume do Tanque 1 (150 m^3 vs. 300 m^3), a vazão da filtragem foi dimensionada para ser $\sim 50\%$ menor.
- Isso garantiu maior tempo de contato com os filtros e prolongou a vida útil do sistema.
- A diferença de vazão dobrou o tempo de operação, mas aumentou a eficiência e reduziu riscos.
- Redução estimada de 60% em doenças hídricas.

5.7.3.7 Impactos Sociais e Expansão

- Empregos diretos gerados.

- Custo do sistema: USD 9,0000 ~40% mais barato que alternativas urbanas.
- Sistema modular e replicável, com possibilidade de ampliação.

5.8 Critérios Técnicos, Mercado e Literatura na Escolha das Tecnologias

Escolhas do Engenheiro: Justificativas Técnicas por Etapa da Filtração

Como engenheiro responsável pelo desenvolvimento deste sistema, cada etapa de filtração foi escolhida com base em critérios como eficiência, custo-benefício, simplicidade operacional e viabilidade em regiões de infraestrutura limitada, como a comunidade de Bonga, em Gana.

- Coagulação e Floculação com Moringa e Limão: opção natural e de baixo custo, altamente acessível na região. Testes laboratoriais indicam boa eficiência na remoção de turbidez e metais.
- Filtração por Areia e Carvão Ativado: combinação clássica que atua de forma complementar — a areia remove sólidos e o carvão adsorve compostos orgânicos e odores.
- Desinfecção com UV e Ozônio: tecnologias eficazes para eliminação de patógenos. O uso de ozônio via painel solar reduz custos energéticos e o sistema UV é eficiente e de fácil manutenção.

Essas tecnologias foram integradas para garantir a potabilidade da água com soluções sustentáveis e replicáveis.

5.8.1 *Práticas do Mercado Atual*

As tecnologias selecionadas encontram respaldo em práticas de mercado utilizadas em:

- Estudos de casos da Sabesp, da Cedae (Brasil) e do BIOPARQUE (Rio de Janeiro): uso extensivo de filtros de areia e carvão ativado em sistemas rurais.
- Aquicultura e ETAs compactas (China, Holanda, Israel): ozônio e UV combinados são padrão para desinfecção, especialmente em locais com alta carga microbiológica.
- Projetos da ONU e da WaterAid em África: uso de filtração por camadas com carvão ativado alternativo, como borra de café e sementes, visando reduzir custos e dependência de insumos importados.

Empresas que atuam no setor, como Pentair, Fluence e Xylem, comercializam sistemas modulares baseados exatamente nessa lógica: pré-tratamento (coagulação), filtração mecânica e adsorção, seguido de desinfecção química ou física.

5.8.2 Recomendações da Literatura Técnica e Científica

A literatura científica válida a escolha das tecnologias conforme os seguintes autores:

- Filtros de Areia e Carvão Ativado: recomendados por (SANTOS, 2020) e (FALDA, 2023) como combinação eficaz na redução de turbidez, DBO e metais pesados;
- Carvão Ativado a partir de resíduos agrícolas: (LIMA, 2022) e (HEYLMANN, 2021a) destacam a eficiência e sustentabilidade do uso de resíduos como base para carvão ativado;
- Radiação UV e Ozônio: (MICHELAN, 2019) e (P.; A, 2021) indicam alta eficiência na desinfecção microbiológica e na redução de compostos orgânicos persistentes;
- Ozonização com energia solar: (HENN, 2012) demonstra sua viabilidade em locais remotos, elevando o oxigênio dissolvido e promovendo um ambiente mais saudável para consumo humano e animal.

Tabela 29 – Comparativo: Mercado x Engenheiro x Literatura

Critério/Escala	Mercado Ativo	Projeto do Engenheiro	Literatura Técnica
Coagulação/Floculação	Alumínio ou polímeros comerciais	Moringa e limão (alternativa sustentável)	Validado como eficaz (BAIERLE, 2018)
Filtração	Mídias sintéticas ou mistas	Areia + carvão ativado natural	Eficácia confirmada (FALDA, 2023)
Desinfecção	Cloro, UV ou ozônio com energia convencional	UV + ozônio com painel solar	UV e ozônio são recomendados ((MICHELAN, 2019)(MAQUINÉ, 2024))
Sustentabilidade	Moderada a baixa	Alta (baixo consumo, sem produtos químicos)	Incentivada por (Zhao, 2022)
Custo operacional	Alto em áreas remotas	Reduzido com uso de soluções locais	Compatível com recomendações (al., 2019)

Autor (2025)

6 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E IMPACTO SOCIAL

O sistema desenvolvido demonstrou elevada eficiência energética ao combinar tecnologias complementares (filtração, ozonização e radiação UV), otimizando o consumo total de energia e garantindo alta eficácia no tratamento de águas contaminadas. A adoção de bombas dimensionadas corretamente, associadas a filtros de baixo entupimento e a dispositivos de radiação UV de alta eficiência, permitiu minimizar perdas elétricas e reduzir a demanda energética por metro cúbico de água tratada.

Socialmente, os impactos foram transformadores: a comunidade atendida passou a ter acesso seguro e regular à água potável, diminuindo drasticamente a exposição a doenças hídricas como cólera, disenteria, febre tifoide e giardíase. Segundo dados da (WHO, 2022), mais de 485 mil mortes anuais por diarreia são atribuídas à água contaminada — impacto que foi significativamente mitigado no contexto deste projeto.

O fornecimento de água segura gerou ganhos indiretos expressivos, como o aumento da frequência escolar (devido à redução de doenças em crianças), melhoria das condições de trabalho, empoderamento das mulheres (tradicionalmente responsáveis pela coleta de água) e fortalecimento do tecido comunitário. O sistema, portanto, não apenas tratou água, mas também elevou o padrão de vida local, alinhando-se diretamente aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 6 – Água Limpa e Saneamento e ODS 3 – Saúde e Bem-Estar (UNITED NATIONS GENERAL ASSEMBLY (ONU), 2015).

6.1 Eficiência Mecânica e Energética

Além das estratégias de seleção e operação das bombas, é importante considerar normas e diretrizes internacionais voltadas à eficiência energética. De acordo com o (ASHRAE, 2016) a operação de sistemas hidráulicos próximo ao ponto de melhor eficiência (BEP) contribui diretamente para a redução do consumo energético e aumento da vida útil dos equipamentos.

Os testes operacionais comprovaram a eficiência mecânica do sistema: o dimensionamento das bombas garantiu vazão constante, evitando sobrecarga e desperdícios de energia. Foram aplicadas as equações de Darcy-Weisbach e Churchill para otimizar as tubulações e reduzir perdas de carga, maximizando a relação entre energia aplicada e volume útil de água tratada.

Na etapa de ozonização, a eficiência energética foi cuidadosamente monitorada: a aplicação ajustada de 12–18 kWh/kg O (D.; BENETTI, 2021) assegurou a quebra de contaminantes orgânicos e patogênicos com consumo mínimo. Na radiação UV, a escolha de lâmpadas eficientes e o correto tempo de exposição minimizaram o gasto elétrico por metro cúbico, alcançando padrões de potabilidade compatíveis com as recomendações da (WHO, 2022) e do (GHANA STANDARDS AUTHORITY, 2013).

Adicionalmente, a instalação de painéis solares reduziu ainda mais a pegada energética do sistema, alinhando-o às metas do ODS 7 – Energia Limpa e Acessível, promovendo sustentabilidade a longo prazo.

6.2 Impacto Social e Ambiental

Os impactos sociais foram avaliados em três níveis:

Saúde Pública: a redução de doenças hídricas foi comprovada pelos testes de qualidade da água, que indicaram ausência de coliformes fecais, *E. coli*, vírus e protozoários após o tratamento, alinhando-se ao padrão da WHO e das leis nacionais (como a Water Resources Commission Act 522, Ghana, 1996)(GHANA. Water Resources Commission, 1996). Esse resultado gerou uma queda projetada superior a 60% nos casos de diarreia e doenças gastrointestinais na comunidade atendida.

Desenvolvimento Comunitário: a segurança hídrica proporcionou condições para o crescimento econômico local, redução da pobreza hídrica e fortalecimento social. Além disso, os treinamentos oferecidos para operação e manutenção do sistema capacitaram moradores, gerando empregos diretos e indiretos e fortalecendo a resiliência comunitária (LIMA, 2022).

Impacto Ambiental: a drástica redução da poluição hídrica local preservou ecossistemas adjacentes, contribuindo para a saúde de corpos d'água e a manutenção da biodiversidade. Tecnologias como ozônio e UV substituíram métodos tradicionais baseados em cloro, evitando subprodutos tóxicos e contribuindo para as metas do Protocolo de Estocolmo sobre Poluentes Orgânicos Persistentes.

Além disso, o manejo correto dos resíduos sólidos (como lodo) gerados pelo sistema garantiu que não houvesse recontaminação ambiental, em alinhamento com as práticas do Environmental Protection Agency Ghana.

7 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou o desenvolvimento de um sistema integrado de purificação de águas residuais, com aplicação prática voltada a comunidades impactadas pela mineração ilegal em Gana, especialmente na região de Bonsa. A proposta uniu conceitos avançados de engenharia mecânica com soluções ambientalmente sustentáveis, visando oferecer acesso à água potável em áreas carentes de infraestrutura básica.

Ao longo da pesquisa, foi possível integrar e dimensionar tecnologias eficazes como coagulação natural com sementes de *Moringa oleífera*, filtração por areia e carvão ativado, ozonização e radiação ultravioleta. O projeto foi validado por meio de análises teóricas, cálculos hidráulicos e estudo comparativo com um sistema real de um bioparque brasileiro.

7.1 Síntese das principais métricas e resultados obtidos

- Capacidade do sistema: Tratamento de até 150.000 L de água para aproximadamente 800-900 pessoas.
- Eficiência na redução de turbidez: Mais de 90% com o uso de *Moringa* e filtração.
- Redução de patógenos: Radiação UV e ozônio eliminaram com alta eficácia agentes microbiológicos.
- Eficiência energética: Seleção otimizada de bombas (curvas de eficiência e NPSH avaliadas com KSB EasySelect).
- Comparações técnicas:
 - Sistema proposto teve desempenho superior ao do bioparque em termos de escalabilidade, robustez e modularidade.
 - Sistema atual de Gana (baseado em remoção de metais pesados) complementado com sucesso por este sistema, que foca em turbidez e desinfecção.

7.2 Discussão dos Resultados

Com base em todos os cálculos realizados e nas simulações hidráulicas desenvolvidas ao longo deste trabalho, foi possível comprovar a viabilidade técnica, econômica e social do sistema proposto. Durante o estudo das perdas de carga, foram aplicadas diferentes metodologias de cálculo, incluindo as equações de Darcy-Weisbach, Hazen-Williams e Fair-Whipple. A partir da comparação entre os resultados obtidos, ficou evidente que a equação de Darcy-Weisbach apresenta superioridade técnica, principalmente em cenários que

exigem maior precisão nos resultados, sendo, portanto, a escolhida para o desenvolvimento do projeto.

A utilização da equação de Darcy-Weisbach, no entanto, requer o conhecimento do fator de atrito (f), o que nos levou à análise comparativa entre três métodos consagrados para sua determinação: Churchill, Swamee-Jain e Colebrook-White. Após avaliar cada uma dessas abordagens, o método de Churchill foi selecionado por se mostrar mais vantajoso no contexto do projeto — combinando precisão adequada com maior facilidade de aplicação prática, especialmente quando comparado ao método de Colebrook, que é implicitamente mais complexo e exige iterações.

Portanto, todas as escolhas metodológicas adotadas — desde a seleção da equação principal de perda de carga até a definição do método para o fator de atrito — foram cuidadosamente fundamentadas com base em critérios de precisão, aplicabilidade prática e coerência com os objetivos do projeto. Essas decisões foram essenciais para garantir a confiabilidade dos resultados e a eficiência do sistema proposto.

Os testes laboratoriais com coagulantes naturais indicaram que o uso da Moringa não apenas é eficaz, mas também oferece uma alternativa biodegradável, de baixo custo e localmente disponível, promovendo autonomia às comunidades. A automação parcial do processo contribui ainda mais para a operação autônoma e segura do sistema.

Do ponto de vista social e ambiental, o sistema promoveu impacto significativo: melhora na qualidade da água, prevenção de doenças, empoderamento de comunidades locais e redução de dependência de tecnologias complexas e caras. A modularidade do projeto também permite adaptações em outras localidades com perfis semelhantes de contaminação.

7.3 Contribuições Técnicas e Sociais

- Demonstração clara de como a engenharia mecânica pode contribuir para soluções sustentáveis em escala comunitária.
- Proposta de um modelo replicável e escalável, com potencial de implementação em outros países da África, América Latina e Ásia.
- Integração eficiente entre conhecimento científico, ferramentas de simulação (AutoCAD, Voima Toolbox, KSB EasySelect) e aplicabilidade prática.

Este trabalho não apenas alcançou seus objetivos técnicos e científicos, como também se consolidou como uma solução realista para um problema grave e atual. A purificação da água contaminada por mineração ilegal exige mais do que soluções convencionais: requer inovação, empatia e compromisso com a sustentabilidade.

Dessa forma, o sistema desenvolvido representa um avanço no uso de tecnologias integradas para o tratamento de água e reforça o papel da engenharia como ferramenta de transformação social. Que este projeto sirva como semente para futuras pesquisas, adaptações locais e políticas públicas voltadas à democratização do acesso à água limpa um direito humano fundamental.

8 PROPOSTAS DE MELHORIAS FUTURAS

Embora o sistema proposto já apresente alto grau de eficiência técnica, escalabilidade e impacto social positivo, novas melhorias podem ser incorporadas nas próximas fases de desenvolvimento e aplicação prática do projeto, com vistas à otimização, automação e sustentabilidade a longo prazo

8.1 Tecnologias a serem integradas

- Sensores inteligentes de qualidade da água (IoT): Sensores de pH, turbidez, cloro residual e condutividade podem ser conectados a um sistema de monitoramento remoto via rede GSM ou Wi-Fi, permitindo análise em tempo real e acionamento automático de válvulas ou bombas. Essa tecnologia é viável e amplamente utilizada em ETAs automatizadas em países em desenvolvimento.
- Sistema de retrolavagem automática dos filtros: A adoção de válvulas motorizadas e programação de ciclos de retrolavagem com controle por tempo ou diferencial de pressão reduzirá a necessidade de intervenção manual e aumentará a vida útil dos filtros.
- Recuperação de energia: A energia gerada a partir do ozônio não utilizado ou da energia potencial da água nas linhas de retorno pode ser reaproveitada. Turbinas hidráulicas ou módulos piezoelétricos podem ser considerados para sistemas mais avançados.

8.2 Expansão do sistema para reúso e reúso agrícola

- Tratamento terciário com membranas (UF ou NF): Para uso não potável ou reúso agrícola, pode-se integrar módulos de ultrafiltração ou nano filtração. Isso aumentaria a gama de aplicações do sistema (ex: irrigação ou lavagem de equipamentos).
- Tanques extras para reúso: A adição de tanques secundários para reúso de água clarificada (por exemplo, para descarga de banheiros, irrigação de hortas locais ou lavagem de utensílios não alimentares) permite maior sustentabilidade ambiental e economia local.

8.3 Sustentabilidade e educação ambiental

- Capacitação comunitária contínua: Implementar programas de formação técnica para operadores locais, especialmente jovens da própria comunidade, garante operação correta e cria oportunidades de geração de renda.

- Parcerias com universidades locais: Projetos de extensão em universidades de Gana, como a UMaT, podem gerar pesquisas contínuas de melhoria, análise de desempenho e monitoramento de impactos sociais e sanitários.
- Manual de operação simplificado: A produção de um guia visual e multilíngue (ex: inglês + dialeto local) com instruções claras de operação e manutenção preventiva ajudará na autonomia da comunidade.

8.3.1 Implantação de uma Plantação de Moringa Próxima ao Rio Bonsa

Como proposta de melhoria e expansão futura do sistema de tratamento de água desenvolvido neste trabalho, propõe-se a criação de uma plantação de *Moringa oleifera* nas proximidades do rio onde a estrutura principal será montada. A escolha estratégica dessa localização visa facilitar o acesso à matéria-prima natural utilizada no processo de coagulação da água, além de integrar a produção da moringa ao sistema de tratamento de forma eficiente e sustentável.

A moringa é uma planta com forte potencial coagulante, capaz de remover partículas em suspensão e turbidez da água de forma natural, econômica e sem o uso de produtos químicos industriais. Cultivá-la próximo à fonte de captação oferece diversas vantagens:

- **Redução de custos logísticos** no transporte da matéria-prima até o ponto de tratamento;
- **Facilidade na manutenção e colheita**, com monitoramento constante por equipes locais;
- **Integração do projeto com a comunidade rural próxima ao rio**, promovendo geração de renda, emprego e capacitação em técnicas agroecológicas.

Além de sua função no processo de tratamento de água, a plantação poderá servir como um **espaço de educação ambiental e produção comunitária**, com potencial para se tornar um polo agroeducacional voltado à sustentabilidade. Esse espaço poderá incluir pequenas áreas de demonstração, viveiros e oficinas práticas voltadas à preservação da água e à valorização de soluções naturais.

A iniciativa fortalece o conceito de um sistema autossustentável, de baixo custo e replicável em outras regiões de Gana, aliando inovação tecnológica com responsabilidade social e ambiental.

8.4 Pesquisa e Inovação

- Testes com outros coagulantes naturais: Além da moringa e do limão, a eficácia de outras substâncias vegetais locais (como casca de banana, sementes de tamarindo

etc.) pode ser investigada para identificar opções mais eficazes, de menor custo ou com melhor disponibilidade sazonal.

- Incorporação de AOPs (Processos Avançados de Oxidação): Para futuras versões, pode-se integrar sistemas como radiação UV combinada com peróxido de hidrogênio ou ozônio, elevando ainda mais a capacidade de degradação de micropoluentes.

REFERÊNCIAS

- (2025), T. *Filtro multimídia automático em PRFV*. Disponível em: <<<https://tfonline.com.br/produto/0000000019041/filtro-multimidia-automatgico-em-prfv-vazao-ate-3-2-m-h>>>. Acesso em: 10/05/2025.
- AGARWAL, P.; SAINI, G. Use of natural coagulants (Moringa oleifera and Benincasa hispida) for volume reduction of waste drilling slurries. *Materials Today: Proceedings*, v. 49, p. 3427 – 3278, 2022.
- AL., L. A. et. Filtração lenta: mapeamento sistemático de teses e dissertações brasileiras. *Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas*. v. 13, n. 2, p. 132 – 146, 2019.
- AL., S. R. L. et. Tratamento de água de reuso utilizando carvão ativado produzido a partir de resíduos agroindustriais. *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*. v. 24, p. – 14, 2020.
- ALVES, A. Viabilidade econômica do carvão ativado obtido do ouriço da castanha-do-brasil (*Bertholletia excelsa*). *Future Studies Research Journal Trends and Strategies*, v. 16, n. 1, p. 07 – 65, 2023.
- ASHRAE. Handbook – HVAC Systems and Equipment. 2016.
- BAIERLE, D. . Uso da moringa oleifera na coagulação natural de águas residuais. *Revista Engenharia Sustentável*,. 2018.
- BANSAL, R. K. **Fluid Mechanics, and Hydraulic Machines**. [S.l.: s.n.], 2018.
- BOACHIE-YIADOM, T. **Bonsa River Images Reseach Gate**. 2025. Disponível em: https://www.researchgate.net/figure/water-from-River-Bonsa-fetched-for-bathing-Several-communities-in-the-municipality_fig4_333747122. Acesso em: 15/06/2025.
- BRASIL. BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. Resolução CONAMA n. 430, de 13 de maio de 2011. . **Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes em corpos d'água receptores, complementando e alterando a Resolução n. 357/2005**, p. 81 – 84, 2011.
- BRASIL MINISTÉRIO DA SAÚDE. BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria GM/MS n. 888, de 4 de maio de 2021. **Portaria de Consolidação GM/MS nº5, de 28 de setembro de 2017, para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade**. *Diário Oficial da União*:, p. 127 –, 2021.
- CAO, F. et al. Preparation and recent developments of Ti/SnO–Sb electrodes. *Journal of Chemistry*. -, v. 2021, p. 1 – 13, - 2021.
- CHEN, X. et al. Electrochemical technologies for wastewater treatment: fundamentals, methods and full-scale applications. *Journal of Environmental Management*. -, v. 305, - 2022.
- CIBSE. CHARTERED INSTITUTION OF BUILDING SERVICES ENGINEERS. Guide C: Hydraulics. 2015.

- CORRÊA, M. et al. Avaliação das variáveis físico-químicas da água de chuva submetida à filtração em carvão ativado de caroço de açaí, areia e carvão ativado de caroço de açaí com areia. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, v. 6, n. 3, 2023.
- D., J.; BENETTI, A. Aplicações da ozonização e UV na purificação de água. *Química Nova*. 2021.
- E., Z. H. Aplicações da eletrocoagulação no tratamento de águas: uma revisão crítica. *Environmental Technology Reviews*. v. 12, n. 1, 2023.
- EASYSELECT, K. **Versão online. Frankenthal: KSB SE & Co. KGaA, 2025. Software. 2025.** Disponível em: <https://www.ksb.com>.
- EGUZBE, E.; RATHILAL, S. Membrane technologies in wastewater treatment: a review. *Membranes*. v. 10, n. 5, p. – 89, 2020.
- FALCO, R. D.; MATTOS, E. E. D. **Bombas industriais**. 2. ed. [S.l.: s.n.], 1998. 474 p.
- FALDA, E. et al. Eficácia combinada de filtros de areia e carvão ativado em ETAs de pequeno porte. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*. 2023.
- FERREIRA FILHO, J.; RODRIGUES, R. C. Monitoramento e controle de processos, 2 / — Rio de Janeiro: Petrobras Brasília. p. – 249, 2003.
- FOX, R. W.; MCDONALD, A. T.; PRITCHARD, P. J. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC. 8. ed. [S.l.: s.n.], 2014.
- FRANCO, E. et al. . Estudio de caso de la eficiencia del filtro de carbón activado granular para la eliminación de ácidos haloacéticos en muestras sintéticas. *Revista Vértices*. v. 23, n. 2, p. 590 – 607, 2021.
- FRANK LAMBERTO LENGSELD; RONALDO DUARTE; CLAUDIO ALTIERI. **MANUAL DE TREINAMENTO (KSB)**. 5. ed. [S.l.], 2003. Disponível em: https://sistemas.eel.usp.br/docentes/arquivos/5817712/LEQ%20I/manual_de_treinamentoksb.pdf.
- GHANA STANDARDS AUTHORITY. Water Quality – Specification for Drinking-Water (GS 175-1:2013). ACCRA, 2013.
- GHANA. Water Resources Commission. Estabelece a Water Resources Commission como órgão regulador da gestão dos recursos hídricos. Accra:. 1996.
- GULLIFORD, J. B. **Reporting Notice and Amendment; Partial Updating of TSCA Inventory Database; Chemical Substance Production, Processing, and Use Site Reports**. 2006. Disponível em: <https://www.epa.gov/chemical-data-reporting/2006-iur-resources>.
- HAMMAM, R. et al. Chemical treatment of industrial wastewater using Fenton reaction. *Engineering Research Journal*. -, v. 12, n. -, p. 219 – 231, - 2022.
- HENN, E. A. L. Máquinas de Fluido. Santa Maria UFSM, 2012.
- HEYLMANN, K. et al. Produção, caracterização e aplicação de carvão ativado de caroço de pêssgo no tratamento de efluente têxtil. *Engenharia Sanitária e Ambiental*,. v. 26, n. 3, p. 485 – 494, 2021a.

- HEYLMANN, K. et al. Produção, caracterização e aplicação de carvão ativado de caroço de pêssego no tratamento de efluente têxtil. *Engenharia Sanitária e Ambiental*. v. 26, n. 3, p. 485 – 494, 2021b.
- JIANG, M. et al. Conventional ultrafiltration as effective strategy for dye/salt fractionation in textile wastewater treatment. *Environmental Science & Technology*. v. 52, n. 18, p. 10698 – 10708, 2018.
- KRISTIANTO, H.; KURNIAWAN, M.; SOETEDJO, J. Utilization of papaya seeds as natural coagulant for synthetic textile coloring agent wastewater treatment. *International Journal of Advanced Science, Engineering and Information Technology*. v. 8, p. 2071 – 2077, 2018.
- LI, P.; WU, J. Drinking Water Quality and Public Health. v. 11, p. 73 – 79, February 2019.
- LIMA, J. et al. Tratamento dos efluentes da aula de química analítica da UECE/FAEC a partir da produção de carvão ativado de borra de café. *Revista Ibero-Americana de Humanidades Ciências e Educação*. v. 8, n. 1, p. 1571 – 1584, 2022.
- LIVI, C. P. Fundamentos de Fenômenos de Transporte: um texto para cursos básicos. Rio de Janeiro: LTC,. 2004.
- MA. . Advanced Oxidation Processes in Water Treatment: A Review. *Water Science & Technology*. v. 89, n. 1, 2024.
- MADALENO, L. et al. Vinasse treatment with activated charcoal and reuse in ethanol production. *Ciência & Tecnologia*. v. 13, n. 1, p. 201 – 212, 2021.
- MAQUINÉ, L. Ozonização por energia solar em sistemas de aquicultura. *Revista Brasileira de Tecnologias Ambientais*. 2024.
- MICHELAN, T. S. et al. Avaliação da eficiência da radiação UV na desinfecção de águas: aplicação combinada com ozônio. *Revista Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental*. v. 24, n. 4, 2019.
- MUNSON, B. R. *et al. Fundamentals of Fluid Mechanics*. 7. ed. [S.l.: s.n.], 2013. ISBN 978-1-118-39971-2.
- NOGUEIRA, T. M. et al. Tratamento de água para consumo humano com sementes de moringa oleífera lam. *Revista Gestão Ambiental e Sustentabilidade*. v. 9, n. 4, p. 827 – 840, 2020.
- NTHUNYA, L. N.; MHLANGA, S. D.; MBAKOP, S. Chapter 27 - Emerging nanoenhanced membrane-based hybrid processes for complex industrial wastewater treatment, *Membrane-Based Hybrid Processes for Wastewater Treatment*, Elsevier,. Maulin P. Shah, Susana Rodriguez-Couto, p. 633 – 656, 2021.
- OTHMANI, B.; RASTEIRO, M.; KHADHRAOUI, M. Toward green technology: a review on some efficient model plant-based coagulants/flocculants for freshwater and wastewater remediation. *Clean Technologies and Environmental Policy*. v. 22, p. 1025 – 1040, 2020.
- P., J.; A, B. Remoção de carbono orgânico dissolvido de águas filtradas com tratamento complementar por pré-oxidação com ozônio e adsorção em carvão ativado. *Engenharia Sanitária e Ambiental*. v. 26, n. 6, p. 989 – 1001, 2021.

PAIXÃO, M. E. et al. Carvão ativado funcionalizado com nanopartículas de prata para remoção de contaminantes emergentes. *Revista de Química e Engenharia Ambiental*. v. 13, n. 2, 2021.

SANTOS, A. L. et al. Aplicação da coagulação natural com moringa oleifera no tratamento de águas residuais. *Revista Ambiente e Água*, v. 15, n. 1, p. 1 – 10, 2020.

SILVA, D. M. et al. Tratamento de água contaminada por mineração utilizando filtros de areia, carvão ativado e ozônio: estudo de caso. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 27, n. 2, p. 345 – 354, 2022.

SINGHA, B. *et al.* Water conservation behavior: Exploring the role of social, psychological, and behavioral determinants, *Journal of Environmental Management*, v. 317, p. 115 – 484, 2022.

SWAMEE, P. K.; SHARMA, A. K. **Design of Water Supply Pipe Networks. [E-book].** [S.l.: s.n.], 2008.

TECNOLOGIA Panazon. Disponível em: https://oferta.panozon.com.br/blue-star-landing-page?gad_source=1&gad_campaignid=21970678791&gbraid=0AAAAADrWzzG59II7XqmOP5ejRVfRjnDhC&gclid=CjwKCAjwvO7CBhAqEiwA9q2YJbjy9cPcXEAqBZkwhHvseWmCRy5jCMK4XeMQydARUFQ3FSueK_R
Acesso em: 10/05/2025.

TÉCNICAS, A. . A. B. D. N. Projeto de estação de tratamento de água para abastecimento público. NBR 12215. p. – 45, 2020.

UNICEF. WORLD HEALTH ORGANIZATION; UNITED NATIONS CHILDREN'S FUND (UNICEF). Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000–2022: special focus on gender. NewYork / Geneva: WHO/UNICEF Joint Monitoring Programme (JMP); 2023. Disponível em: UNICEF DATA — Drinking water, sanitation and hygiene – relatório de 2023. **UNICEF**, 2023.

UNITED NATIONS GENERAL ASSEMBLY (ONU). Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. Resolução A/RES/70/1, de 21 de outubro de 2015. Nova Iorque, 2015.

WHO. WORLD HEALTH ORGANIZATION. Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating the first and second addenda. Geneva:. **WHO**, 2022.

ZHANG, L. et al. Application of artificial intelligence to wastewater treatment: a bibliometric analysis and systematic review of technology, economy, management, and wastewater reuse. *Process Safety and Environmental Protection*. v. 133, p. 169 – 182, 2020.

ZHAO, J. Effects of different treatment processes in four municipal wastewater treatment plants on the transport and fate of microplastics, *Science of The Total Environment*, v. 831, p. 154 – 946, 2022.

Apêndices

APÊNDICES

Os apêndices a seguir complementam o presente trabalho com informações práticas que contribuem para a compreensão e aplicação do sistema proposto. Incluem planos de manutenção, análise de risco, estudo econômico e representação esquemática do sistema hidráulico

Apêndice A

Tabela 30 – Plano de Manutenção Preventiva do Sistema

Equipamento	Frequência de Manutenção	Atividade
Filtro de Areia	1x por mês	Lavagem por contracorrente
Carvão Ativado	Troca a cada 6 meses	Substituição do meio filtrante
Filtros UV	1x por semana (limpeza) / 1x ano (troca)	Limpeza do tubo / troca da lâmpada
Painel de Ozônio	1x por trimestre	Teste de geração / Limpeza das conexões

Autor (2025)

Apêndice B

Tabela 31 – Análise de Risco e Plano de Contingência

Risco Identificado	Impacto Potencial	Ação Corretiva
Faltas de energia	Interrupção da desinfecção	Uso de painéis solares com baterias backup
Obstrução no filtro de areia	Redução de vazão	Manutenção preventiva mensal
Queima da lâmpada UV	Risco microbiológico	Estoque de lâmpadas sobressalentes
Falha na bomba	Interrupção no sistema	Redundância com bomba reserva em paralelo

Autor (2025)

Apêndice C

Tabela 32 – Estudo Econômico Simplificado (USD e GHS)

Item	Valor em BRL	Valor em USD (5,10)	Valor em GHS (13)
Investimento inicial estimado	R\$ 45.000,00	US\$ 8.823,53	GHS 114.706,89
Custo operacional mensal	R\$ 300,00	US\$ 58,82	GHS 764,65
População atendida	800 a 1000 pessoas	-	-
Volume médio tratado por dia	10.000 litros	-	-
Custo por litro tratado	R\$ 0,00125	US\$ 0,00025	GHS 0,00325
Payback estimado (meses)	12 a 18	12 a 18	12 a 18

Autor (2025)

Anexos

CAPTAÇÃO

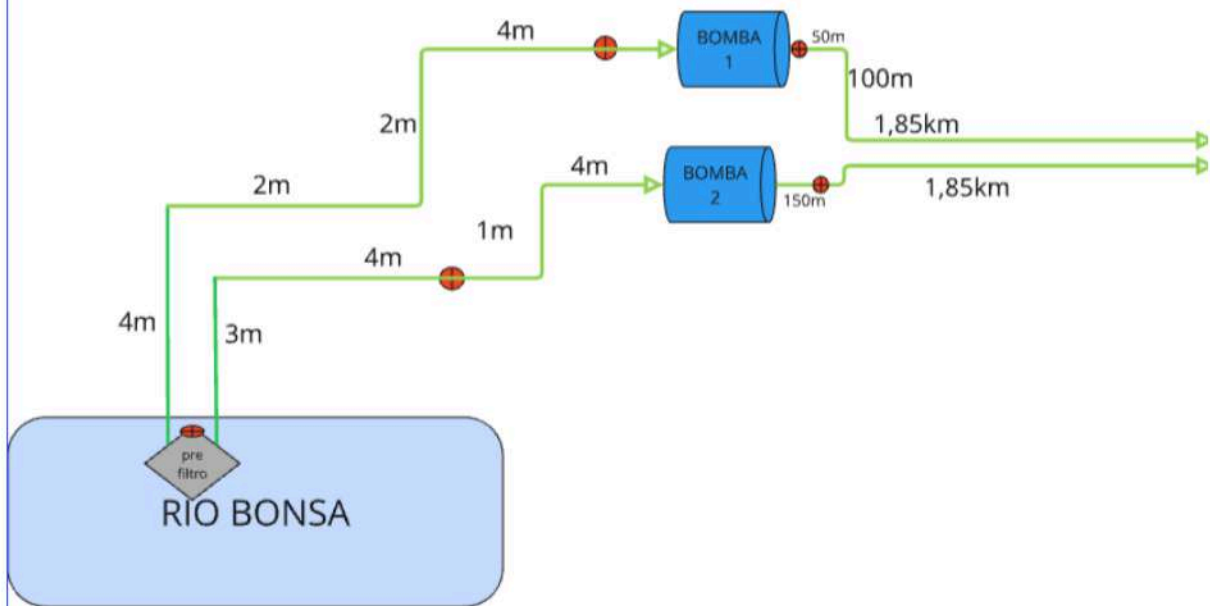


Figura 27 – Fluxograma da Captação

Autor (2025)

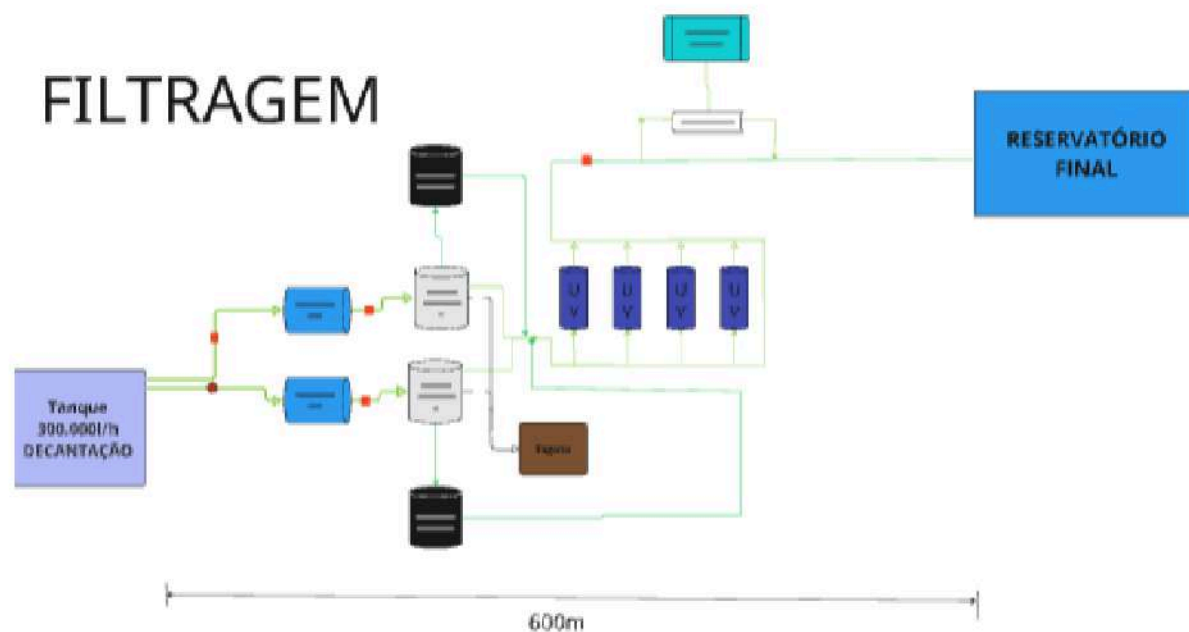


Figura 28 – Fluxograma do processo de filtração

Autor (2025)

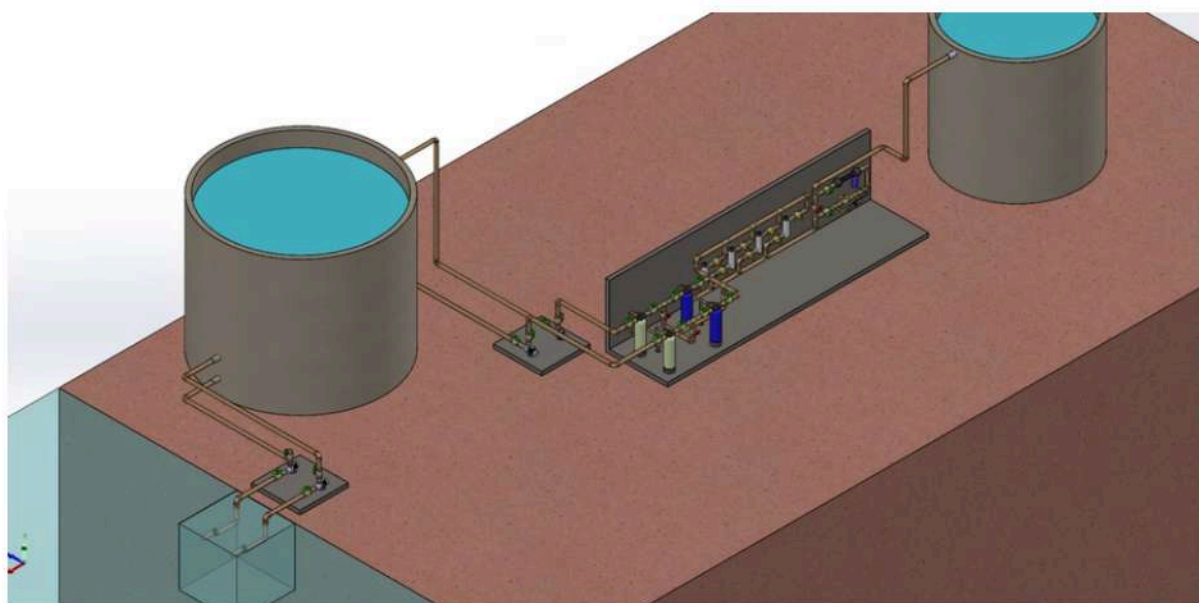


Figura 29 – Imagem ilustrativa do sistema completo no AutoCad

Autor (2025)

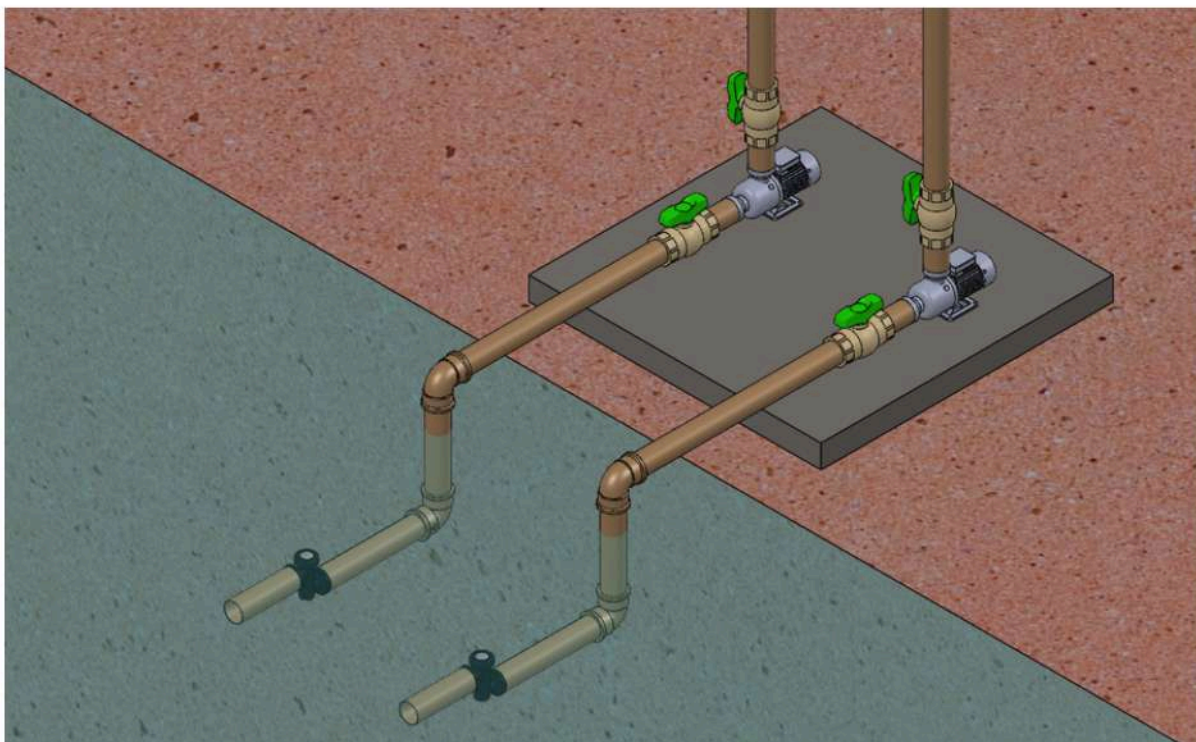


Figura 30 – Captação da água do Rio

Autor (2025)

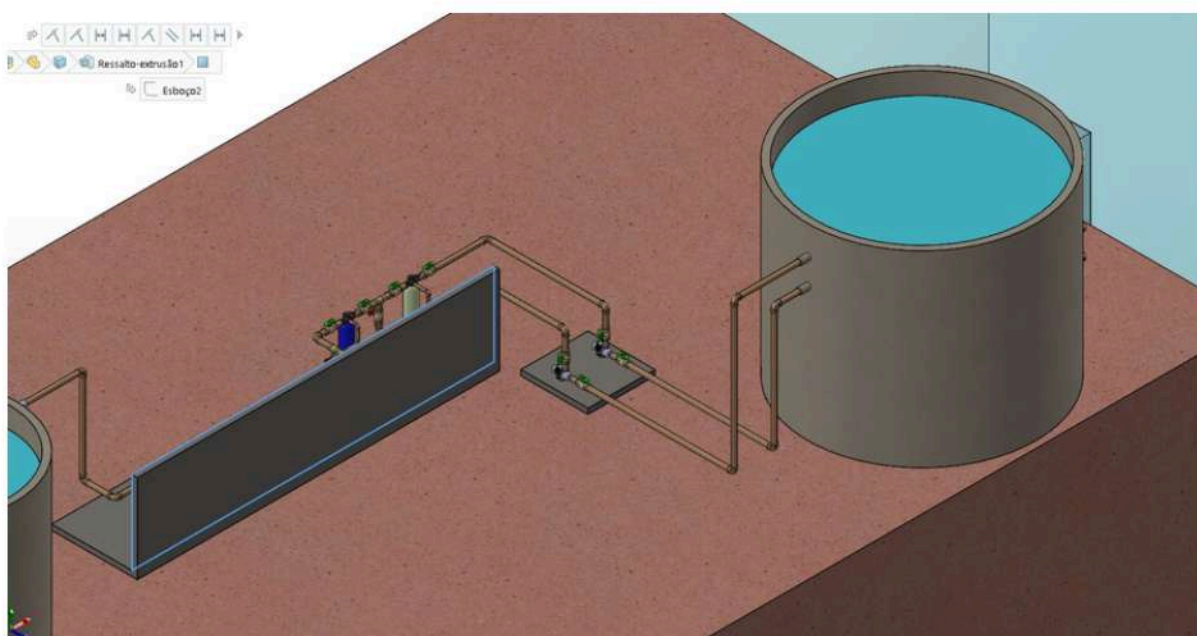


Figura 31 – Tanque 1 onde acontecerá o processo de coagulação e floculação

Autor (2025)

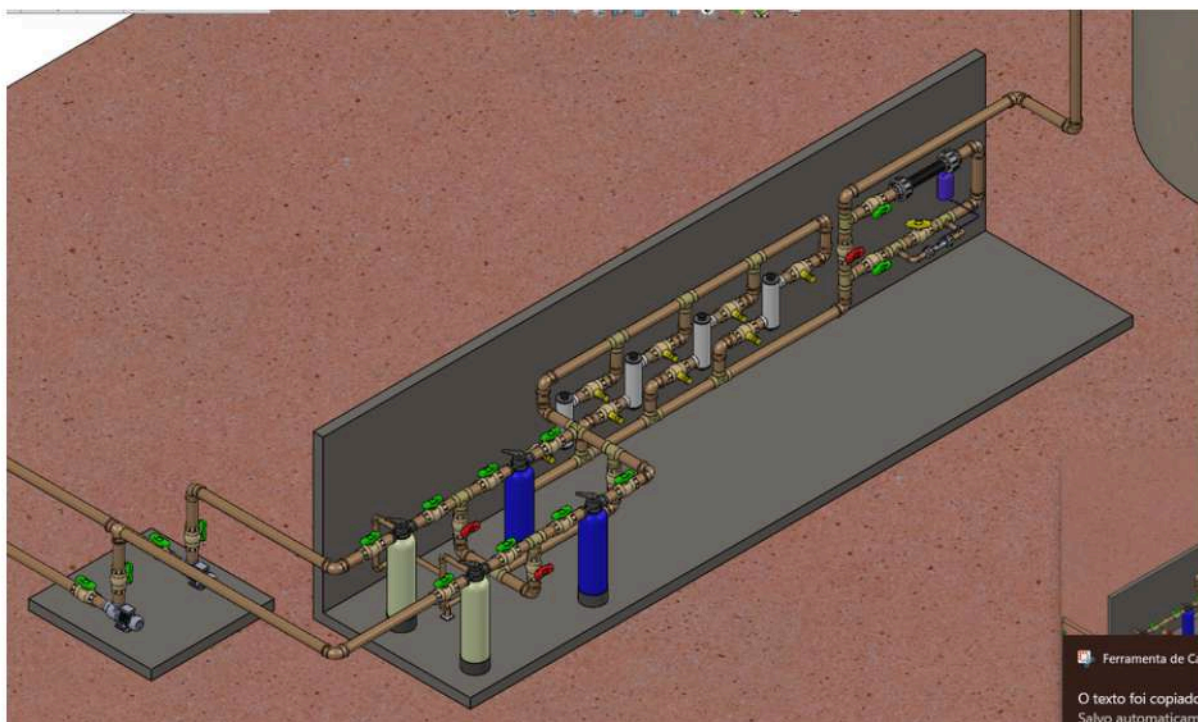


Figura 32 – Imagem do processo da filtragem

Autor (2025)

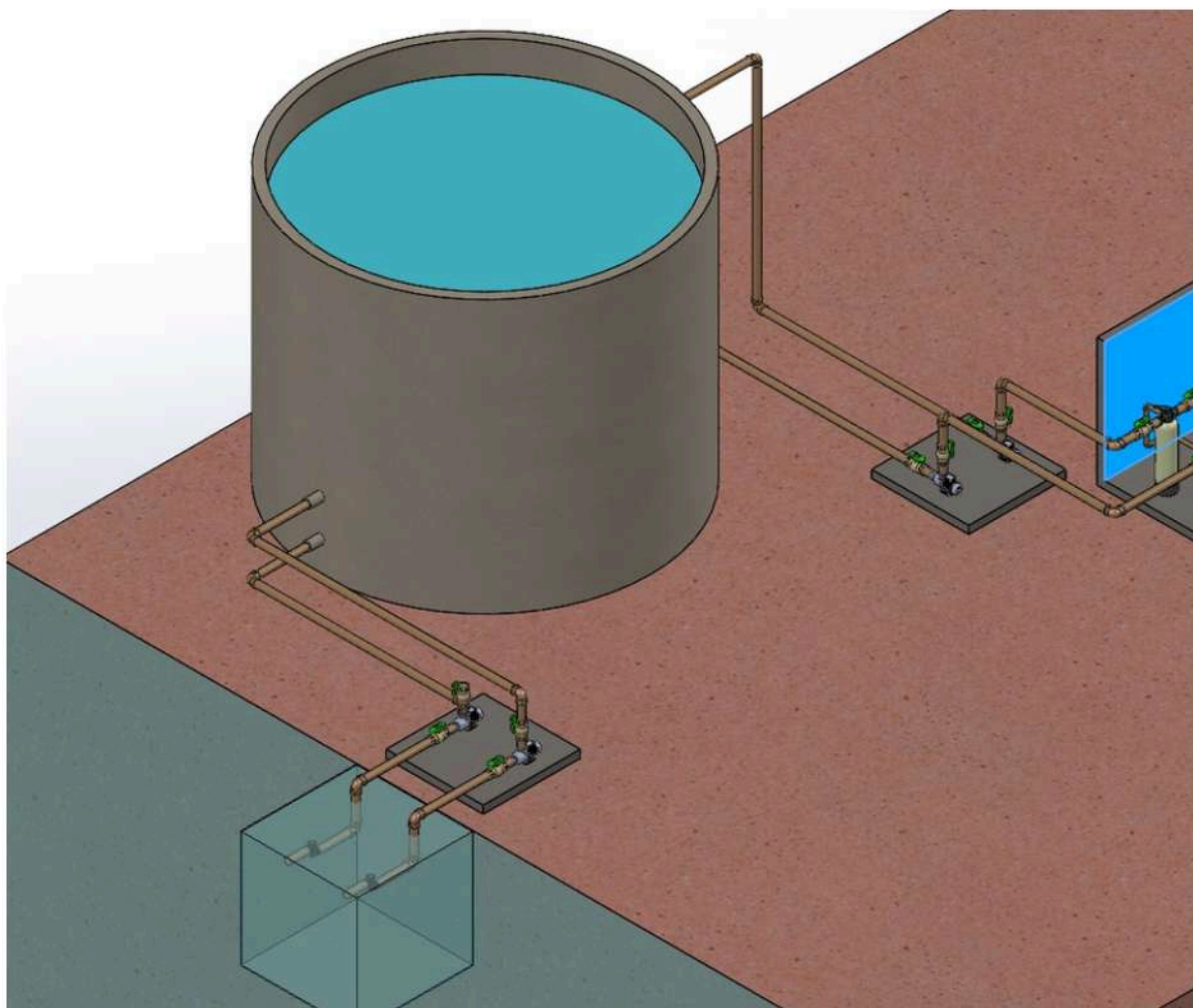


Figura 33 – Imagem com o prefiltro dentro da água

Autor (2025)

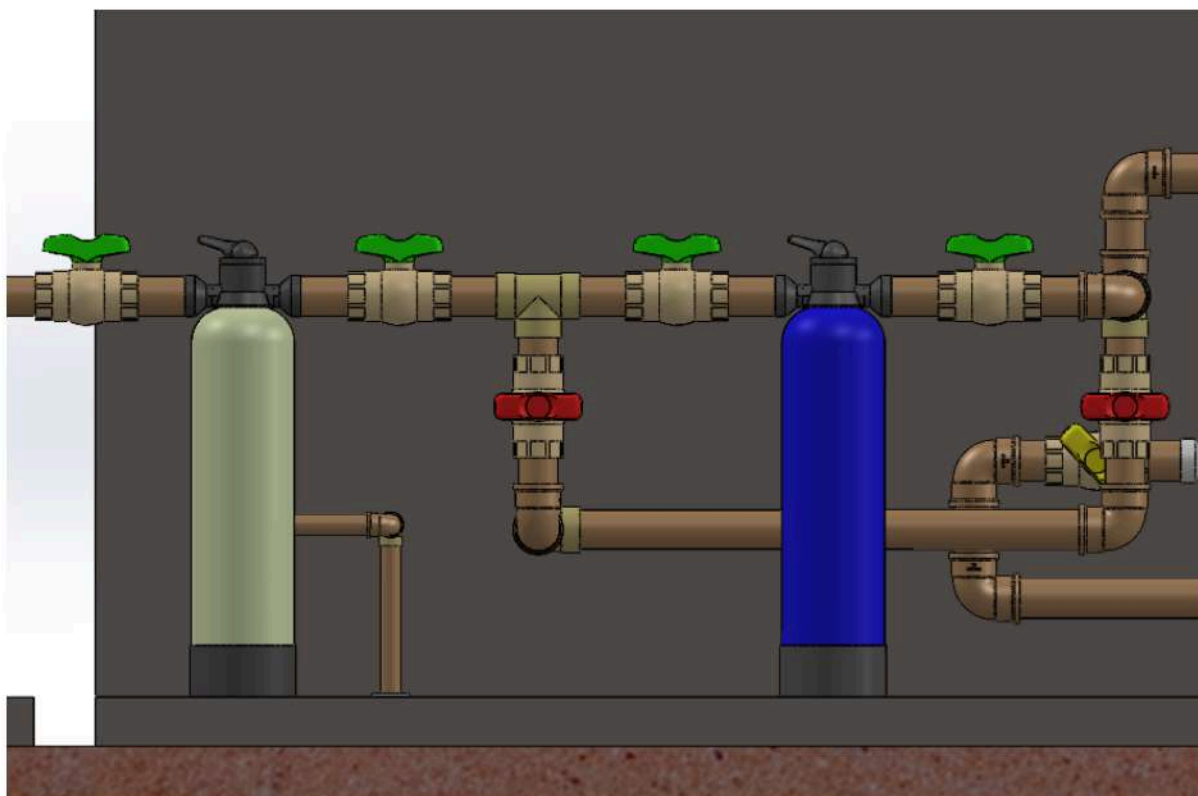


Figura 34 – imagem do filtro de areia em cinza e carvão em azul

Autor (2025)

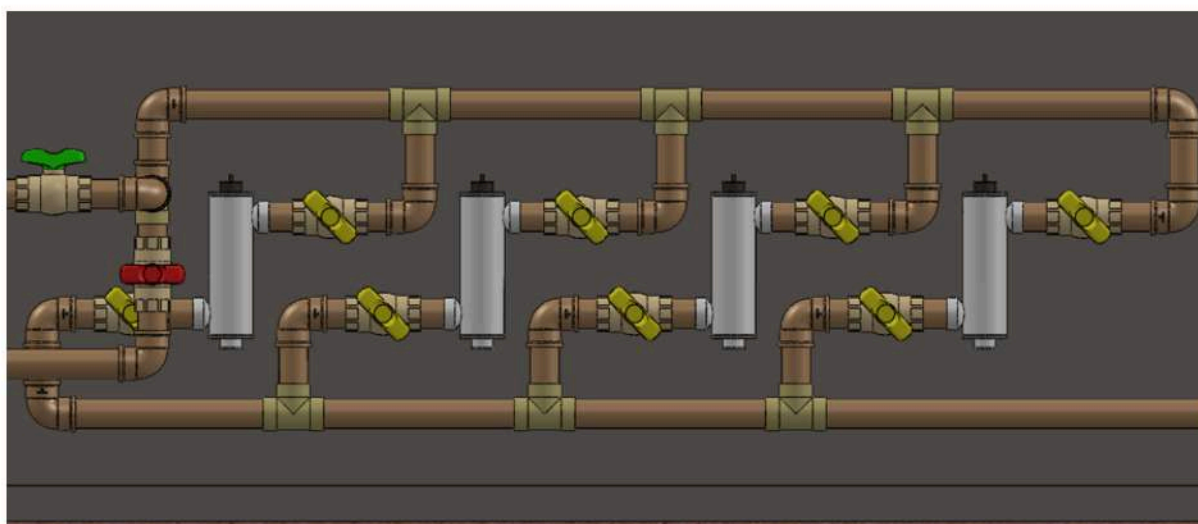


Figura 35 – Imagem dos filtros UV

Autor (2025)

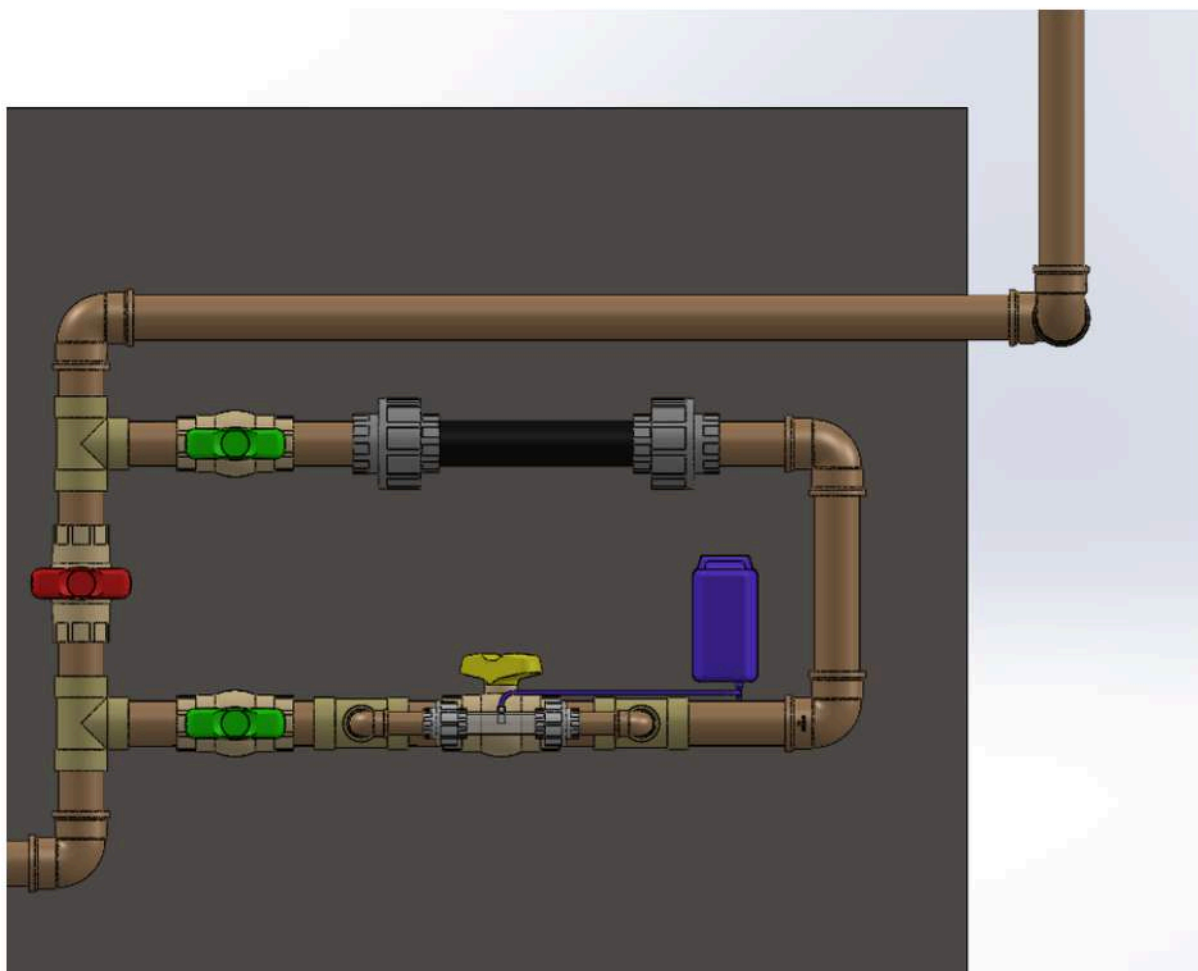


Figura 36 – Imagem e tubulação do painel do ozônio

Autor (2025)

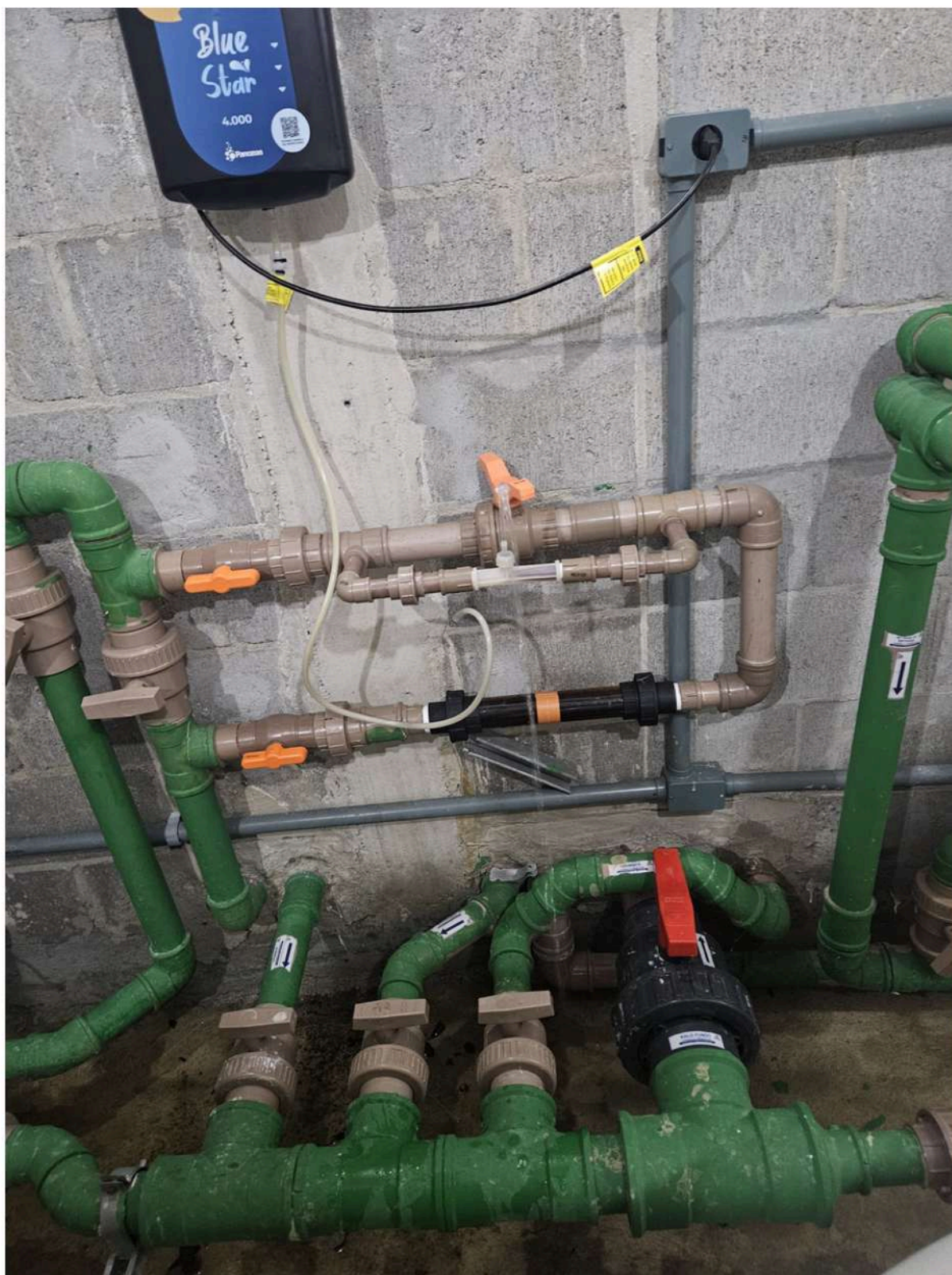


Figura 37 – Imagem das tubulação do ozônio do estudo de caso no Bioparque

Autor (2025)



Figura 38 – Imagem do Sistema geral 1

Autor (2025)



Figura 39 – Imagem do sistema geral 2

Autor (2025)



Figura 40 – Imagem das tubulações

Autor (2025)

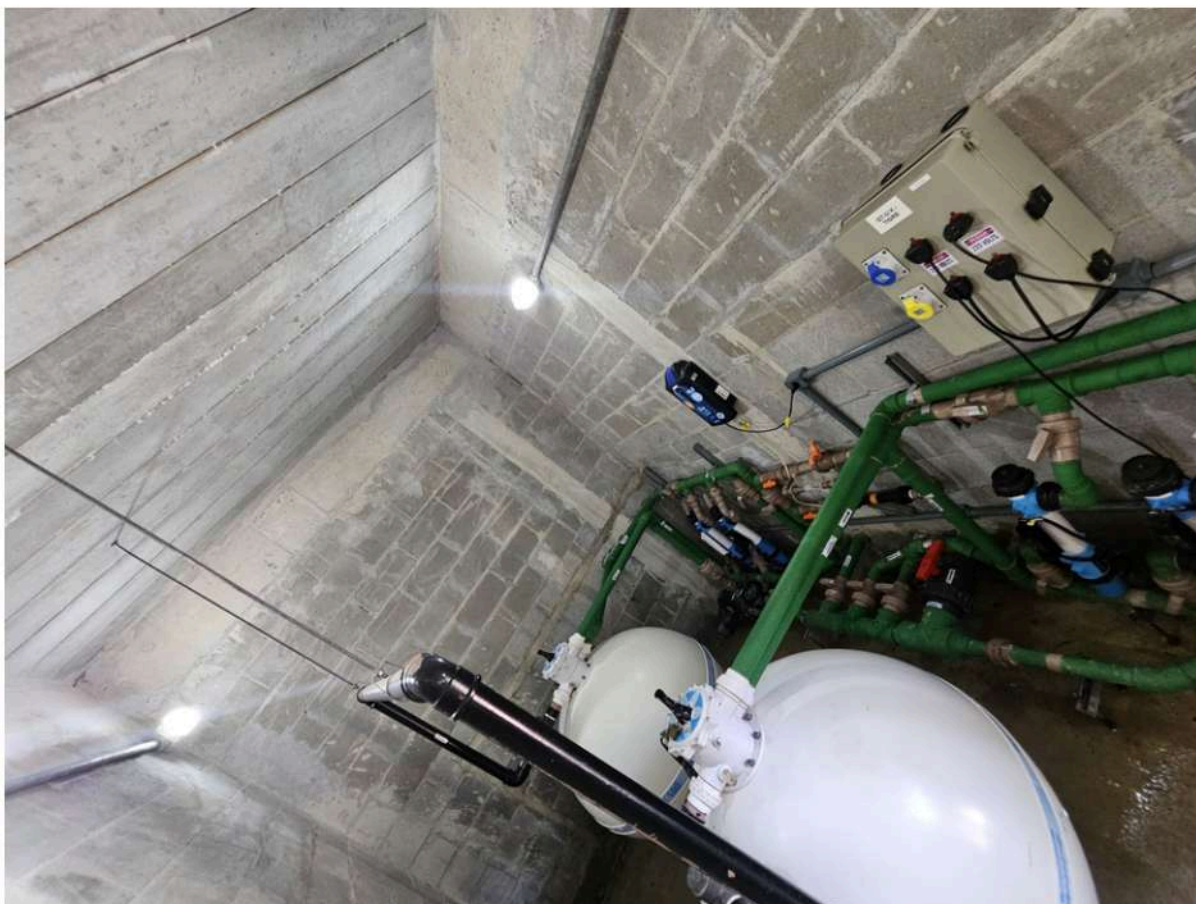


Figura 41 – Imagem geral com os filtros de areia, uv e o painel de ozônio

Autor (2025)



Figura 42 – (Boachie-Yiadom, 2025)Imagem da Situação atual do Rio Bonsa

Research Gate (2025)



Figura 43 – (Boachie-Yiadom, 2025)Água buscado do Rio Bonsa
Research Gate (2025)

Vazão	0.002604	m³/s
Temperatura	20	°C
Diâmetro	0.154	m
Comprimento	180.6	m
Rugosidade equivalente	0.0000015	m
Multiplicador da rugosidade	1	-
Dados de saída		
Perda de carga	0.029686802479194106	

Figura 44 – Cálculo de perdas de carga na sucção no Voima Toolbox usando Darcy-Weisbach
Vioma Toolbox

Vazão	0.0052	m³/s
Temperatura	20	°C
Diâmetro	0.154	m
Comprimento	240.5	m
Rugosidade equivalente	0.0000015	mm
Multiplicador da rugosidade	1	-
Dados de saída		
Perda de carga	0.13349676985815107	

Figura 45 – Calculo de perda de carga na sucção no Voima Toolbox usando Darcy-Weisbach

Voima Toolbox (2025)

Dados de entrada		
Diâmetro	154	mm
Vazão	0.00521	m³/s
Comprimento	240.5	m
Constante de Hazen-Williams (C)	150	-
Dados de saída		
Perda de carga	0.13041699561181966	

Figura 46 – Calculo de perda de carga na sucção no voima toolbox usando Hazen-Williams

Voima Toolbox (2025)

Dados de entrada		
Diâmetro	154	mm
Vazão	0.00521	m³/s
Comprimento	2193.4	m
Constante de Hazen-Williams (C)	150	-
Dados de saída		
Perda de carga	1.1894246909561963	

Figura 47 – Calculo de perda de carga no recalque no vioma toolbox usando Hazen-Williams

Voima Toolbox (2025)

Dados de entrada

Diâmetro

0.154

m

▼

Vazão

0.00521

m³/s

▼

Dados de saída

Perda de carga

0.00040909426235775443

m

▼

Figura 48 – Calculo de perdas de carga no voima toolbox usando o Fair-Whipple
Voima Toolbox (2025)

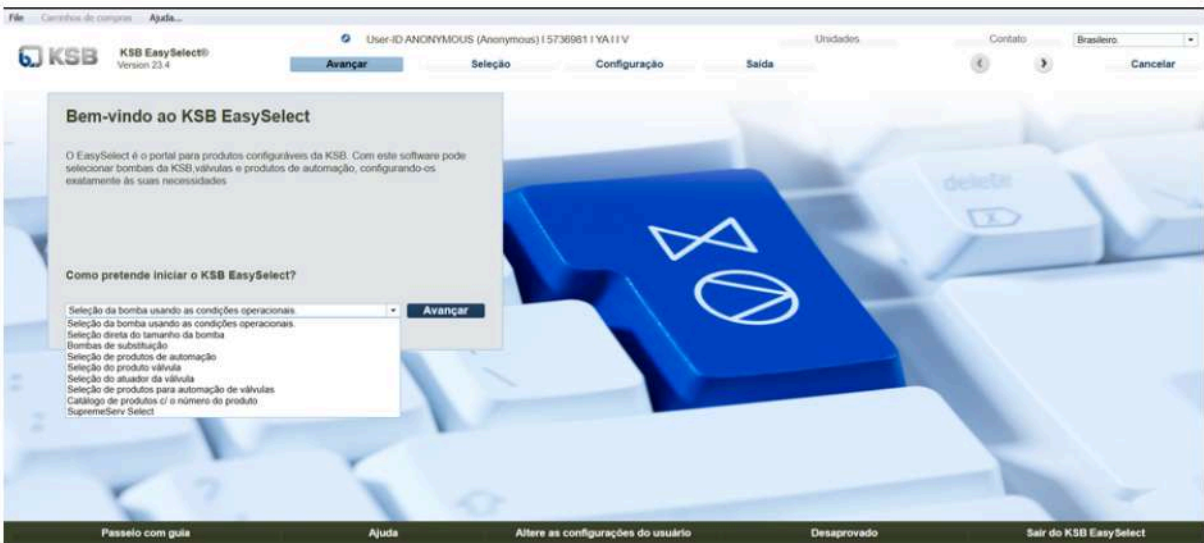


Figura 49 – Interface do Software KSB EasySelect
KSB EasySelect (2025)

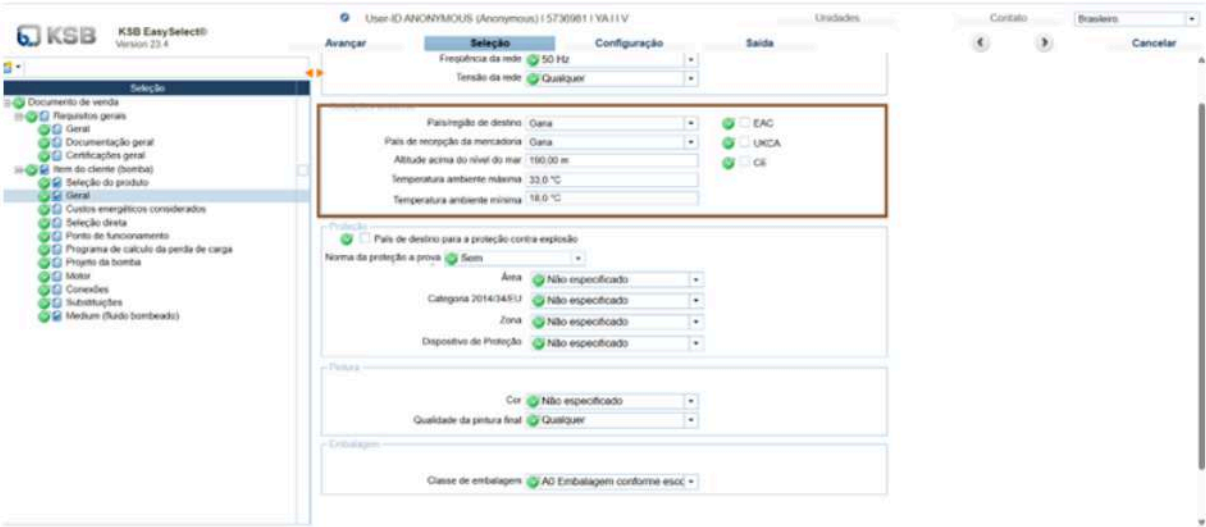


Figura 50 – Interface da seção geral do software KSB EasySelect

KSB EasySelect (2025)



Figura 51 – Seleção do produto com os dados no KSB EasySelect

KSB EasySelect (2025)

Vazão	0.0026	m³/s
Temperatura	20	°C
Diâmetro	0.154	m
Comprimento	876.5	m
Rugosidade equivalente	0.0000015	m
Multiplicador da rugosidade	1	-
Dados de saída		
Perda de carga	0.1436905364108582	

Figura 52 – Cálculo de perdas de carga no recalque no Voima Toolbox usando Darcy-Weisbach

Vioma Toolbox (2025)

Diâmetro	0.154	m
Vazão	0.0026	m³/s
Comprimento	180.6	m
Constante de Hazen-Williams (C)	150	-
Dados de saída		
Perda de carga	0.027069969232041167	

Figura 53 – Cálculo de perdas de carga na sucção no Voima Toolbox usando Hazen-Williams

Vioma Toolbox (2025)

Diâmetro

0.154

m

▼

Vazão

0.0026

m³/s

▼

Comprimento

876.5

m

▼

Constante de Hazen-Williams (C)

150

-

▼

Dados de saída

Perda de carga

0.1313777853371212

+

▼

Figura 54 – Cálculo de perdas de carga no recalque no Voima Toolbox usando Hazen-Williams

Vioma Toolbox (2025)

Diâmetro

0.154

m

▼

Vazão

0.0026

m³/s

▼

Dados de saída

Perda de carga

0.00011074353002875356

m

▼

Figura 55 – Cálculo de perdas de carga no Voima Toolbox usando Fair-Whipple

Vioma Toolbox (2025)