



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE

FACULDADE DE ENGENHARIA

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

Trabalho de Licenciatura

**Calibração e Monitoramento do Desempenho da Estação de Tratamento de Água da  
Vila de Murrupula**

Alberto Ernesto Razul

**Supervisor:**

Prof. Dr. Eng.º Nelson Pedro Matsinhe

Maputo, Março de 2025

UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE

FACULDADE DE ENGENHARIA

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

Trabalho de Licenciatura

**Calibração e Monitoramento do Desempenho da Estação de Tratamento de Água da  
Vila de Murrupula**

Trabalho realizado em cumprimento às exigências da  
Disciplina de Trabalho de Licenciatura, para obtenção  
de créditos parciais ao curso de Licenciatura em  
Engenharia Civil da Faculdade Engenharia

Alberto Ernesto Razul

**Supervisor:**

Prof. Dr. Eng.<sup>o</sup> Nelson Pedro Matsinhe

Maputo, Março de 2025



**UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE**

**FACULDADE DE ENGENHARIA**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**TERMO DE ATRIBUIÇÃO DO TEMA DE TRABALHO DE LICENCIATURA**

---

Referência do Tema: \_\_\_\_\_

Data: Abril de 2024

Título do Tema: Calibração e Monitoramento do Desempenho da Estação de Tratamento de Água da Vila de Murrupula

Local de Realização: Universidade Eduardo Mondlane

Supervisor da UEM

\_\_\_\_\_

Prof. Dr. Eng.º Nelson Pedro Matsinhe

Datas Chave

Entrega do tema: Abril de 2024

Previsão da conclusão: Outubro de 2024

Maputo, \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 20\_\_

Chefe da Comissão Científica

Visto do Chefe do Departamento

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Declaro que recebi o tema do Trabalho de Licenciatura na data acima indicada

Nome: Alberto Ernesto Razul

Assinatura: \_\_\_\_\_



**UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE**

**FACULDADE DE ENGENHARIA**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**DECLARAÇÃO DE HONRA**

---

Eu, Alberto Ernesto Razul, declaro por minha honra, que este trabalho foi resultado da minha investigação com recurso a bibliografia com referência devidamente citada ao longo do relatório que é submetido para obtenção do grau de Licenciatura em Engenharia Civil, pela Faculdade de Engenharia da Universidade Eduardo Mondlane.

Autor

---

(Alberto Ernesto Razul)



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE

FACULDADE DE ENGENHARIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

**TERMO DE ENTREGA DE RELATÓRIO DO TRABALHO DE LICENCIATURA**

---

Declaro que o estudante **Alberto Ernesto Razul** entregou no dia \_\_\_\_ / \_\_\_\_ / 20\_\_ as \_\_\_\_ cópias do relatório do seu Trabalho de Licenciatura com a referência: \_\_\_\_\_ intitulado: **Calibração e Monitoramento do Desempenho da Estação de Tratamento de Água da Vila de Murrupula.**

Maputo, \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 20\_\_\_\_

A Chefe da Secretaria

---

## DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho a Deus, aos meus pais e irmãos  
pelo suporte incondicional em todo o percurso  
académico.*

*“Confia no Senhor de todo o teu coração e não te  
estribes no teu próprio entendimento. Reconhece-o  
em todos os teus caminhos e ele endireitará as tuas  
veredas.”*

*Provérbios 3:5-6 (ARC)*

## **AGRADECIMENTOS**

Tanto pelo grandioso dom da vida, saúde, dedicação, persistência, discernimento, manifestação da fé perante obstáculos e obtenção de resultados durante toda caminhada na academia segundo a Sua vontade, agradecer a Deus por sempre estar presente e guiar os meus passos.

A minha família, particularmente aos meus pais, Alberto Razul e Ernesta Mário Ernesto Razul por providenciarem incondicionalmente a oportunidade de adquirir a formação superior e apoiarem-me sempre no que for necessário, e aos meus irmãos Horácio Cordeiro Ernesto Razul, Irina Marciana Ernesto Razul e Maria Luísa Ernesto Razul, por renovarem-me o ânimo e a esperança de poder ultrapassar todas adversidades acadêmicas.

À Universidade Eduardo Mondlane e a Faculdade de Engenharia pela maravilhosa chance de cursar o ensino superior mediante todos docentes que puderam enriquecer-me tanto em conhecimento de Engenharia Civil como também das suas experiências práticas no âmbito profissional, e todos funcionários do departamento de Engenharia Civil, não só na posição de estudante comum, mas também na posição de chefe de turma.

Ao Prof. Dr. Eng.<sup>o</sup> Nelson Matsinhe por conceder a oportunidade de desenvolver pesquisa de qualidade proporcionada pelo material fornecido, sua rigorosa supervisão e críticas construtivas ao longo da elaboração do corrente trabalho.

À Eng.<sup>a</sup> Nilza Rai e Eng.<sup>o</sup> Faizal Teruma pelo frequente auxílio em informações úteis e sugestões de melhorias concernentes a elaboração do trabalho.

Aos meus amigos Eng.<sup>o</sup> Culpa António, Elsídio Tique, Mateus Cambaza, Bento Rosário, Fernando Zunguze, Onésimo Francisco, Castigo Macie, Humeid Daud e Issufo Ibrahimo que puderam acompanhar-me em grande parte dos trabalhos em grupo e sempre me inspiraram em termos de consistência e empenho académico.

A todos meus colegas do curso, em especial ao João Segá, Celso Maússe, Sílvia Novela, Letícia Mahoque e Shélcia Greia.

## RESUMO

Neste trabalho apresentam-se os resultados do monitoramento do desempenho da Estação de Tratamento de Águas (ETA) para consumo recentemente construída na vila de Murrupula, província de Nampula como parte do projecto de construção do Sistema de Abastecimento de Água da mesma vila. A respectiva ETA assenta no modelo de filtração directa dupla, contendo duas linhas de produção dimensionadas para um caudal de produção de 90 m<sup>3</sup>/dia e comporta os seguintes processos unitários: (1) câmara de entrada; (2) coagulação; (3) pré-filtração de fluxo ascendente com floculação hidráulica; (4) filtração lenta descendente e (5) desinfecção. O trabalho realizado compreendeu a avaliação em específico da conformidade dos parâmetros operacionais com os estabelecidos em fase de projecto e, no geral, da conformidade dos parâmetros qualitativos com os padrões de qualidade estabelecidos para águas de consumo segundo a Lei n.º 16/91, de 3 de Agosto, Lei das Águas e o Decreto Presidencial n.º 11/95, de 29 de Dezembro.

A remoção média geral da turvação ficou entre 42 – 98% (para o período em serviço). A eficiência de remoção no filtro de fluxo ascendente ficou em torno de 55,0 – 57,8%, e no filtro lento de areia em torno de -6,2 – 78,1% (ambas no período de arranque). Ambas unidades operaram por gravidade, com taxas de filtração em torno de 0,55 – 0,8m/h para os pré-filtros e 0,22 a 0,27m/h para os filtros lentos.

Independentemente das condições operacionais, houve necessidade de estabelecer valores de G entre 20 – 70s<sup>-1</sup> no filtro de fluxo ascendente, garantindo floculação hidráulica.

Os melhores desempenhos foram alcançados no período de serviço, onde os valores de turvação, pH e cloro residuais respeitaram os limites admissíveis, sem que houvesse necessária intervenção de *alum* para coagulação ou regulação de taxas de filtração.

Em geral, o URFL e o SSF tiveram grande melhoria de desempenho partindo da transição do período de arranque para o período em serviço, garantida pela regeneração dos leitos filtrantes, caudais de dimensionamento bem debitados nas unidades, satisfatória dosagem do *alum* e cloro, e turvações afluentes ao SSF de acordo com o seu limite admissível.

**Palavras-chave:** tratamento de água, filtração directa dupla, pré-filtração ascendente por arrastamento, filtração lenta em areia, turvação, taxa de filtração, gradiente hidráulico

## ABSTRACT

This work presents the results of monitoring the performance of a Water Treatment Station (WTS) for consumption recently built in Murrupula village, Nampula province as part of the construction project of the Water Supply System in that village. The respective WTS is based on the double direct filtration model, comprising two production lines scaled for a production flow rate of approximately 90m<sup>3</sup>/d and comprising the following unit processes: (1) inlet chamber; (2) coagulation; (3) upflow prefiltration with hydraulic flocculation; (4) slow downward filtration and (5) disinfection. The work carried out included the assessment particularly of the conformity of the operational parameters with those established in the design phase and, in general, the conformity of the qualitative parameters with the quality standards established for drinking water according to the Law no. 16/91, from August 3<sup>rd</sup>, Water Law and the Presidential Decree no. 11/95, from December 29<sup>th</sup>.

The overall average turbidity removal was between 42 – 98% (for the period in service). The removal efficiency in the upflow filter was around 55,0 – 57,8%, and in the slow sand filter around -6,2 – 78,1% (both in the start-up period). Both units operated by gravity, with filtration rates of around 0,55 – 0,8m/h for the pre-filters and 0,22 a 0,27m/h for the slow filters.

Regardless of the operating conditions, there was a need to establish G values between 20 – 70s<sup>-1</sup> in the upflow filter, providing hydraulic flocculation.

The best performances were achieved during the service period, where turbidity, pH and residual chlorine values respected the permissible limits, without the need for alum intervention for coagulation or regulation of filtration rates.

In general, the URFL and SSF had a great improvement in performance starting from the transition from the start-up period to the in-service period, guaranteed by the regeneration of the filter beds, well-delivered sizing flows in the units, satisfactory dosage of alum and chlorine, and turbidities tributaries to the SSF in accordance with its permissible limit.

**Keywords:** water treatment, double direct filtration, upflow roughing filter, slow sand filtration, turbidity, filtration rate, hydraulic gradient

## ÍNDICE

DEDICATÓRIA.....	i
AGRADECIMENTOS .....	ii
RESUMO .....	iii
ABSTRACT .....	iv
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS.....	ix
LISTA DE SIGLAS .....	xi
LISTA DE FÓRMULAS QUÍMICAS.....	xii
LISTA DE FIGURAS .....	xiii
LISTA DE TABELAS .....	xv
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Generalidades.....	1
1.2 Justificativa .....	2
1.3 Formulação do Problema.....	3
1.4 Objectivos .....	4
1.4.1 Geral.....	4
1.4.2 Específicos .....	4
1.5 Metodologia e Limitações da Pesquisa.....	4
1.5.1 Metodologia .....	4
1.5.2 Limitações de pesquisa .....	5
2. ENQUADRAMENTO TEÓRICO.....	7
2.1 Qualidade da Água e Necessidades de Tratamento.....	7
2.1.1 Caracterização física da água .....	7
2.1.2 Caracterização química da água .....	8
2.1.3 Caracterização biológica da água.....	8
2.2 Tratamento de Água .....	9

2.2.1	Considerações gerais .....	9
2.2.2	Coagulação.....	11
2.2.2.1	Preparação da dosagem e mistura de coagulante.....	13
2.2.3	Floculação .....	14
2.2.4	Sedimentação.....	17
2.2.5	Filtração .....	18
2.2.6	Filtração por arrastamento.....	21
2.2.6.1	Coagulação/floculação no pré-filtro.....	24
2.2.6.2	Sedimentação/filtração no pré-filtro.....	25
2.2.7	Tratamento por filtração lenta .....	25
2.2.7.1	Taxa de filtração.....	26
2.2.7.2	Processo biológico .....	27
2.2.7.3	Frequência de operação .....	27
2.2.7.4	Limpeza dos filtros .....	28
2.2.7.5	Aeração do filtro .....	28
2.2.8	Desinfecção .....	30
3.	DESCRIÇÃO DO OBJECTO DE ESTUDO.....	31
3.1	Localização e Descrição .....	31
3.2	Constituição da ETA e Diagrama do Processo de Tratamento de Água .....	33
3.2.1	Câmara de entrada.....	34
3.2.2	Pré-filtração .....	34
3.2.3	Filtração lenta .....	35
3.2.4	Adição de reagentes .....	36
3.2.5	Instalações complementares da ETA .....	37
4.	RESULTADOS DA AVALIAÇÃO.....	39
4.1	Captação da Água Bruta.....	39

4.2	Medições do Caudal Afluente .....	42
4.3	Desempenho dos Pré-filtros.....	43
4.4	Desempenho das Unidades de Filtração Lenta .....	46
4.5	Qualidade da Água e Eficiência de Remoção.....	48
5.	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	52
5.1	Desempenho Hidráulico.....	52
5.1.1	Caudais de produção.....	52
5.1.2	Taxas de filtração efectivas nos pré-filtros e filtros lentos.....	53
5.2	Desempenho Processual.....	54
5.2.1	Dosagem de coagulação e grau de mistura .....	54
5.2.2	Pré-filtro como flocculador hidráulico.....	54
5.2.3	Desempenho da filtração lenta .....	55
5.2.4	Eficiência de remoção.....	56
5.3	Procedimentos Operacionais.....	57
5.3.1	Limpeza/purga dos pré-filtros .....	57
5.3.2	Maturação dos filtros lentos .....	58
5.3.3	Limpeza dos filtros lentos .....	59
6.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....	60
6.1	Conclusões .....	60
6.2	Recomendações .....	61
7.	BIBLIOGRAFIA .....	62
7.1	Referências Bibliográficas .....	62
7.2	Outra Bibliografia Consultada .....	64
	ANEXOS .....	66
	Anexo 1: Diagramas ilustrativos do processo de tratamento de água na ETA de Murrupula .....	A1.66

Anexo 2: Catálogo das electrobombas instaladas no SAA da vila de Murrupula .....	A2.72
Anexo 3: Parâmetros de qualidade de água tratada destinada ao consumo humano e seus riscos para a saúde pública .....	A3.73
Anexo 4: Medições em Janeiro de 2024.....	A4.75
Anexo 5: Medições em 13 e 14 de Fevereiro de 2024 .....	A5.77
Anexo 6: Histórico de medições de turvação, pH e cloro .....	A6.79
Anexo 7: Soluções de produtos químicos e dureza total .....	A7.84

## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

$DBO_5$	Demanda biológica/bioquímica de oxigênio dentro de 5 dias
$C_e$	Teor de oxigênio do efluente
$d, d_0$	Diâmetro efectivo do material (m)
$E$	Expansão do leito (-)
$G$	Gradiente de velocidade ( $s^{-1}$ )
$g$	Aceleração da gravidade ( $m/s^2$ )
$H$	Resistência do filtro durante a lavagem (m)
$H_0$	Resistência inicial do filtro (m)
$H_{máx}$	Resistência máxima do filtro (m)
$l_0$	Gradiente inicial de resistência (m/m)
$K_m$	Constante relacionada a perda de carga no filtro granular (-)
$L$	Comprimento efectivo (m)
$L_0$	Espessura do leito do filtro inicial (m)
$L_e$	Espessura do leito de filtro expandido (m)
$L_f$	Espessura do leito do filtro (m)
$OD_f$	Teor final de oxigênio dissolvido
$OD_i$	Teor inicial de oxigênio dissolvido
$P$	Potência dissipada ( $N \cdot m/s$ )
$p$	Porosidade (-)
$p_0$	Porosidade inicial (-)
$p_e$	Porosidade do leito expandido (-)

pH	Potencial hidrogeniônico (-)
Q	Caudal (m <sup>3</sup> /s)
Re	Nº de Reynolds (-)
s	Factor de esfericidade do material do filtro (-)
T <sub>r</sub>	Tempo de retenção no filtro (s)
t	Tempo de retenção (s)
V	Volume (m <sup>3</sup> )
v, v <sub>f</sub>	Velocidade/taxa de filtração (m/s)
v <sub>lav</sub>	Taxa de lavagem
W	Energia dissipada (N · m)
α	Factor de proporção do efluente (após aeração)
Δh	Perda de carga no flocculador (m)
ΔOD <sub>i</sub>	Variação do teor inicial de oxigênio dissolvido
μ	Viscosidade dinâmica (N · s/m <sup>2</sup> )
ν	Viscosidade cinemática (m <sup>2</sup> /s)
ρ <sub>a</sub>	Densidade da água (kg/m <sup>3</sup> )
ρ <sub>s</sub>	Densidade do material do filtro (kg/m <sup>3</sup> )
σ <sub>v</sub>	Volume obstruído por sólidos nos poros (-)
Ø	Diâmetro de partículas (m)
ω	Porosidade (-)

## LISTA DE SIGLAS

CD	Centro Distribuidor
CE	Câmara de Entrada
CENACARTA	Centro Nacional de Cartografia e Teledetecção
DNGRH	Direcção Nacional de Gestão de Recursos Hidricos
EB	Estação de Bombagem
EE	Estação Elevatória
ETA	Estação de Tratamento de Água
FRG	Filtro Rápido por Gravidade
MISAU	Ministério de Saúde
NME	Nível Mínimo de Exploração
NPA	Nível de Pleno Armazenamento
NTU	<i>Nephelometric Turbidity Unit</i>
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
RAT	Reservatório de Água Tratada
SAA	Sistema de Abastecimento de Água
SSF	<i>Slow Sand Filtration</i>
URFL	<i>Upflow Roughing Filter in Layers</i>
URFS	<i>Upflow Roughing Filter in Series</i>
VFD	<i>Variable Frequency Drive</i>
VSD	<i>Variable Speed Drive</i>

## LISTA DE FÓRMULAS QUÍMICAS

$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$	Sulfato de Alumínio
$\text{Ca}(\text{ClO})_2$	Hipoclorito de Cálcio
$\text{Cl}^-$	Ião Hipoclorito
$\text{Cl}_2$	Cloro
$\text{CO}_2$	Dióxido de Carbono
$\text{FeCl}_3$	Cloreto Férrico
$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$	Sulfato Férrico
$\text{FeSO}_4$	Sulfato Ferroso
$\text{H}^+$	Ião Hidrogénio
$\text{H}_2\text{S}$	Ácido Sulfídrico
$\text{H}_2\text{O}$	Água
$\text{HClO}$	Ácido Hipocloroso
$\text{Na}_2\text{SiO}_3$	Silicato de Sódio
$\text{NaAlO}_2$	Aluminato de Sódio
$\text{O}_2$	Oxigénio

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 2.1</b> Técnicas de tratamento com uso da filtração rápida. Fonte: Ministério da Saúde – Brasília (2006).....	10
<b>Figura 2.2</b> Técnicas de tratamento com uso da filtração lenta em areia. Fonte: Ministério da Saúde - Brasília (2006) .....	11
<b>Figura 2.3</b> Floculador de chicanas vertical. Fonte: Mishra & van Breemen (1987) .....	15
<b>Figura 2.4</b> Sedimentação de partículas discretas e floculentas. Fonte: Huisman (2004) .	18
<b>Figura 2.5</b> Distribuição de pressões no leito do filtro. Fonte: Degremont (1991).....	21
<b>Figura 2.6</b> Configurações de filtros grossos de fluxos vertical e horizontal. Fonte: Nkontwa et all (2010) .....	22
<b>Figura 2.7</b> Filtro por arrastamento de fluxo ascendente em série. Fonte: Smet et al (1990) .....	22
<b>Figura 2.8</b> Filtro por arrastamento de fluxo ascendente em camadas. Fonte: Smet et al (1990).....	23
<b>Figura 2.9</b> Esquema do filtro lento com válvulas de controle. Fonte: Huisman & Wood (1974).....	26
<b>Figura 2.10</b> Recirculação do efluente. Fonte: Huisman (2004) .....	29
<b>Figura 3.1</b> Mapa de localização da Vila de Murrupula.....	31
<b>Figura 3.2</b> Planta de implantação da ETA de Murrupula.....	32
<b>Figura 3.3</b> Vista geral da ETA de Murrupula – câmara de entrada, pré-filtros e filtros lentos.....	33
<b>Figura 3.4</b> Câmara de entrada – água bruta e caudal de retorno.....	34
<b>Figura 3.5</b> Sala de preparação e dosagem de cloro e sulfato de alumínio (dois recipientes de 15 litros cada).....	36
<b>Figura 3.6</b> Pré-filtros de fluxo ascendente – duas linhas de produção. ....	38
<b>Figura 3.7</b> Caixa de recolha de água pré-filtrada. ....	38
<b>Figura 4.1</b> Caudais afluentes à represa para período de retorno de 5 anos. ....	39
<b>Figura 4.2</b> Canal e poço de captação da estação de captação do SAA de Murrupula.....	40
<b>Figura 4.3</b> Estação de bombagem de água bruta: bombas adutoras, válvulas e manómetros. ....	42
<b>Figura 4.4</b> Distribuição de pressões no leito do filtro lento. ....	48
<b>Figura 4.5</b> Turvações da água bruta e água filtrada. ....	50

<b>Figura 4.6</b> Eficiência global de remoção de turvação.....	51
<b>Figura 5.1</b> Qualidade de água – água bruta, água pré-filtrada e água filtrada após primeiro enchimento.....	57
<b>Figura 5.2</b> Esvaziamento dos pré-filtros e limpeza por retrolavagem.....	58
<b>Figura 5.3</b> Limpeza dos pré-filtros – descarga de água de purgas.....	58
<b>Figura 5.4</b> Esvaziamento dos filtros lentos e remoção da lama do topo da areia fina importada. ....	59
<b>Figura A1-1</b> Esquema da instalação em perfil – sem escala.....	A1.67
<b>Figura A1-2</b> Esquema da instalação em planta – sem escala.....	A1.67
<b>Figura A1-3</b> Câmara de entrada (ampliada) em perfil – sem escala.....	A1.68
<b>Figura A1-4</b> Pré-filtro por arrastamento de fluxo ascendente em camadas (ampliado) em perfil – sem escala. ....	A1.69
<b>Figura A1-5</b> Pré-filtro por arrastamento de fluxo ascendente em camadas (ampliado) em alçado posterior – sem escala.....	A1.69
<b>Figura A1-6</b> Filtro lento de areia (ampliado) em perfil – sem escala. ....	A1.70
<b>Figura A1-7</b> Filtro lento de areia (ampliado) em alçado frontal – sem escala.....	A1.71
<b>Figura A2-1</b> Traçado da curva de instalação e leitura dos parâmetros da EE .....	A2.72

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Valores recomendáveis de G e t para mistura rápida. Fonte: Shammass (2005)	12
Tabela 2.2 Valores recomendáveis de G e Gt para mistura lenta em floculação. Fonte: Smethurst (1979)	15
Tabela 2.3 Recursos gerais de construção e operação de filtros convencionais de areia lentos e rápidos. Fonte: Schulz & Okun (por Mishra & van Breemen, 1987)	19
Tabela 2.4 Critérios de dimensionamento de filtros grossos de fluxo ascendente. Fonte: Smet et al (1990)	24
Tabela 3.1 Dimensões e características dos pré-filtros	35
Tabela 3.2 Características dos filtros lentos	35
Tabela 3.3 Dimensões da casota de preparação de soluções de desinfecção	37
Tabela 4.1 Pontos de funcionamento da EE – uma bomba em carga	41
Tabela 4.2 Caudais afluentes e taxas de filtração estabelecidas nos pré-filtros	43
Tabela 4.3 Gradiente hidráulico e tempo de retenção nos pré-filtro para abertura parcial da válvula à saída da EB	45
Tabela 4.4 Gradiente hidráulico e tempo de retenção nos pré-filtro para abertura total da válvula à saída da EB	45
Tabela 4.5 Taxa de filtração e resistência inicial no filtro lento	47
Tabela A3-1 Parâmetros microbiológicos. Fonte: Regulamento sobre a Qualidade de Água para o Consumo Humano (2004)	A3.73
Tabela A3-2 Parâmetros físicos e organolépticos. Fonte: Regulamento sobre a Qualidade de Água para o Consumo Humano (2004)	A3.73
Tabela A3-3 Parâmetros químicos. Fonte: Regulamento sobre a Qualidade de Água para o Consumo Humano (2004)	A3.74
Tabela A4-1 Registro de turvações em cada unidade da ETA	A4.75
Tabela A5-1 Medição do caudal na câmara de entrada, turvação, pH e STD (sólidos totais dissolvidos)	A5.77
Tabela A5-2 Medição da taxa de filtração dos pré-filtros e filtros lentos	A5.77
Tabela A5-3 Medição do caudal nos descarregadores e turvações (14 e 19 de Fevereiro)	A5.78
Tabela A6-1 Qualidade de água em Abril de 2024	A6.79

Tabela A6-2 Qualidade de água em Maio de 2024 .....	A6.80
Tabela A6-3 Qualidade de água em Junho de 2024 .....	A6.81
Tabela A6-4 Qualidade de água em Julho de 2024 .....	A6.82
Tabela A7-1 Soluções de coagulação (sulfato de alumínio) .....	A7.84
Tabela A7-2 Soluções de cloro em condições de escassez de água na albufeira (Setembro de 2024) .....	A7.84

## **1. INTRODUÇÃO**

### **1.1 Generalidades**

A água é um recurso essencial para a vida dos Homens e desenvolvimento das sociedades. A par dos aspectos relacionados com a correcta gestão da sua disponibilidade quer na forma superficial ou subterrânea, a sua utilização para diversos fins, dentre os quais, o consumo humano exige medidas de índole estrutural e não-estrutural que permitam garantir que a sua qualidade esteja em conformidade com os padrões qualitativos estabelecidos para a respectiva utilização. No caso do abastecimento de água para consumo humano, a construção e operação correcta de estações de tratamento de água potável, conjunto com a correcta gestão dos sistemas de distribuição, são medidas estruturais e não estruturais que visam garantir que o consumidor final receba água segura para consumo do ponto de vista de saúde pública.

Na natureza, a água doce disponível (quer de origem superficial ou subterrânea), nem sempre apresenta qualidade adequada para uso ou consumo directo sem tratamento. Segundo Smet et al (1990), as águas superficiais em regiões tropicais geralmente contêm cargas elevadas de sólidos suspensos (de natureza discreta e coloidal) e outro tipo de impurezas (incluindo microrganismos patogénicos) que obrigam a que o seu uso seja acompanhado de medidas de tratamento para garantir a sua potabilidade.

Do ponto de vista de escolha da tecnologia de tratamento, de acordo com Smet et al (1990), a filtração lenta é uma técnica de tratamento de água comprovada nos países em desenvolvimento, bem como no mundo ocidental. Tem grandes vantagens sobre outras técnicas de filtração, especialmente no que diz respeito à confiabilidade, custo e desempenho. Ainda de acordo com o mesmo autor a filtração lenta tem como principais desvantagens a sua rápida colmatação quando sujeita à água bruta com elevado teor de sólidos em suspensão, facto que representa um grande problema operacional em países em desenvolvimento, especialmente durante a estação chuvosa.

É importante que as regras de operação de ETAs que tenham a filtração lenta como principal estágio de tratamento sejam bem definidas, para que não se prejudique o funcionamento contínuo das próprias unidades de filtração lenta como de outras unidades usadas para o pré-tratamento e pós-tratamento.

Segundo Huisman & Wood (1974), um dos pontos a favor da filtração lenta como um processo de tratamento de água é a sua extrema simplicidade de operação, factor determinante para o sucesso das operações de tratamento principalmente em países ou regiões onde é difícil recrutar pessoal qualificado. Desde que as ETAs tenham sido bem concebidas e construídas, há pouco que possa dar errado durante a operação, desde que as rotinas mais simples de operação sejam realizadas (Huisman & Wood, 1974).

## **1.2 Justificativa**

A ETA que é objecto deste trabalho de final de curso, é uma ETA recentemente construída, cuja concepção engloba um conjunto de processos unitários, dentre os quais a filtração lenta, que exigem períodos e condições de maturação cujo alcance é fortemente condicionado pelas regras operacionais estabelecidas na fase de arranque das instalações.

De acordo com as disposições estabelecidas no projecto de execução, a ETA, objecto deste trabalho foi dimensionada para uma produção diária de cerca de 270m<sup>3</sup>/h num horizonte de 20 anos contados a partir do ano 2022, dividida em três módulos de produção, dois dos quais já foram concluídos e estão em funcionamento há cerca de 18 meses.

Tratando-se de uma ETA cuja concepção engloba processos unitários convencionais e não-convencionais, surge a necessidade de uma avaliação rigorosa das rotinas operacionais a estabelecer em cada processo unitário de modo a assegurar um desempenho global satisfatório da ETA e a satisfação dos critérios de dimensionamento adoptados no que diz respeito às variáveis de desempenho hidráulico e de eficiência. Outrossim é o facto de que a ETA em apreço está no seu período inicial de funcionamento e como tal há necessidade de se identificar as rotinas operacionais mais adequadas para permitir, por um lado, o alcance rápido das condições de maturação desejadas para o estágio principal de tratamento na ETA (filtração lenta) e, por outro, a identificação e optimização das rotinas operacionais relacionadas com o pré-tratamento (ex: dosagem ótima de coagulantes).

A optimização dos procedimentos e rotinas operacionais é, por essa razão, vista como fundamental para a definição das medidas a adoptar para melhorar a eficiência global da

ETA tendo em vista a futura ampliação da capacidade instalada (construção do terceiro módulo) de modo a responder à capacidade de produção projectada para o ano horizonte.

### **1.3 Formulação do Problema**

Para o projecto em estudo, uma vez que se trata de uma ETA nova, é imprescindível que os procedimentos de calibração das unidades de pré-tratamento e tratamento sejam devidamente definidos de acordo com as regras de operação convencionais no pré-tratamento e não-convencionais no tratamento, a fim de alcance dos objectivos para os quais a ETA fora dimensionada.

Por conseguinte, convém que se sigam os seguintes procedimentos:

A estação de tratamento de água do sistema de abastecimento de água da vila de Murrupula, é uma ETA nova cuja concepção engloba uma combinação de processo unitários convencionais (pré-clorinação, coagulação e floculação hidráulica) e não convencionais (pré-filtração em meio grosseiro e filtração lenta). Tratando-se de uma infraestrutura cuja entrada em funcionamento é recente (menos de 18 meses) há procedimentos e parâmetros operacionais que precisam ser ajustados para que:

- a) Os critérios de desenho e dimensionamento adoptados em sede de projecto de execução sejam observados;
- b) O desempenho hidráulico e de eficiência de remoção de impurezas antecipados em sede do projecto de execução do projecto hidráulico sejam alcançados;
- c) As condições de maturação desejadas ao nível do estágio de filtração lenta sejam alcançadas;
- d) As rotinas operacionais fundamentais sejam do domínio da equipa de operação da ETA.

Deste modo o enfoque da pesquisa foi direccionado à resposta do seguinte problema de pesquisa:

- Que procedimentos operacionais e de monitoramento devem ser estabelecidos na ETA para que se alcancem as melhores eficiências nos processos unitários que compõem a ETA e sejam observados os padrões de potabilidade estabelecidos nas Normas?

## **1.4 Objectivos**

### **1.4.1 Geral**

O objectivo geral definido para trabalho desenvolvido no âmbito deste trabalho de licenciatura foi o de avaliar o desempenho hidráulico e de eficiência dos processos unitários da ETA de Murrupula em função dos caudais de exploração, qualidade da água bruta e procedimentos operacionais estabelecidos no período inicial de exploração do sistema.

### **1.4.2 Específicos**

Os objectivos específicos definidos para este trabalho foram os seguintes:

- A calibração e o monitoramento do desempenho da ETA com base em resultados de medições de caudal e qualidade de água (turvação, coliformes, agressividade, dureza, etc) a entrada e saída da ETA;
- A avaliação das taxas de filtração estabelecidas nas unidades de pré-filtração, a comparação com as taxas previstas em projecto e a avaliação da sua influência sobre as condições de floculação hidráulica prevista para as unidades (avaliação dos gradientes hidráulicos);
- A avaliação das taxas de filtração estabelecidas nas unidades de filtração lenta, e comparação com as taxas previstas em projecto;
- A avaliação e determinação das taxas adequadas de aplicação do coagulante em função das condições dos caudais de exploração estabelecidos e qualidade (turvação) da água bruta;
- A avaliação da eficiência alcançada nas linhas de produção e dos processos unitários envolvidos individualmente;
- Identificar as limitações prevaletentes nos processos unitários e eventuais defeitos no seu funcionamento e propor recomendações para a sua correcção.

## **1.5 Metodologia e Limitações da Pesquisa**

### **1.5.1 Metodologia**

Para além da revisão de literatura fundamental em qualquer trabalho de pesquisa, a metodologia desenvolvida para elaborar o presente trabalho compreendeu:

- A revisão do projecto de execução da estação de tratamento;
- A compilação e análise de dados operacionais (dados secundários) fornecidos pelo projectista e pelo operador do sistema;
- A realização de cálculos analíticos de avaliação do desempenho da ETA com destaque para:
  - Taxas de filtração: razão entre o caudal escoado e a área superficial das unidades da ETA;
  - Resistência nos pré-filtros e filtros lentos (equação de Carman-Kozeny);
  - Gradiente hidráulico nas unidades de floculação;
  - Eficiência de remoção (turvação).

Os dados usados para a avaliação de desempenho foram divididos em dois grupos, a saber:

- 1º grupo (período de arranque da ETA) – medições de turvação em cada célula dos pré-filtros e dos filtros lentos (agrupadas sob forma de quatro pontos) nas correspondentes linhas de produção, sólidos totais dissolvidos e pH, e cálculo das variáveis de dimensionamento (caudal, quantificação do coagulante e taxas de filtração);
- 2º grupo (período de serviço da ETA) – medição de parâmetros de qualidade de água (turvação, pH e cloro residual) durante um período de 4 meses e posterior soluções de produtos químicos e dureza total.

Para o tratamento e análise dos dados, foi utilizada a ferramenta *Microsoft Office Excel*. Os desenhos esquemáticos do objecto de estudo foram executados mediante a ferramenta *Autodesk AutoCAD*.

### **1.5.2 Limitações de pesquisa**

Ainda que coerentes, os dados usados para a realização da presente pesquisa são limitados, o que implica que nem todos factores de qualidade de água puderam ser devidamente avaliados e/ou discutidos. Alguns dos aspectos que se julga terem impactado negativamente na qualidade da pesquisa são:

- Impossibilidade de realizar medições directas em campo, recolhendo dados de forma remota;
- Inconsistência/lacunas na informação recebida sobre variáveis operacionais ao longo de todos os meses (caudais afluentes e dosagens de produtos químicos) e turvações na época de escassez de água;
- Défice de informação sobre rotinas de limpeza das unidades de tratamento e, em particular das unidades de pré-tratamento;
- Incertezas sobre a fiabilidade dos dados fornecidos de dosagem de coagulante pelo operador uma vez que as mesmas não foram informadas por ensaios de *Jar-Test* dado que a ETA não dispunha deste equipamento (o que sugere dosagens de coagulação pouco precisas);
- Falta de informação relativa a frequência de operação da estação, processo biológico do filtro lento e regeneração do mesmo.

## **2. ENQUADRAMENTO TEÓRICO**

### **2.1 Qualidade da Água e Necessidades de Tratamento**

A água é a maior fonte de vida para todo ser vivo presente na Terra. No âmbito do uso para abastecimento público, é essencial que esta se apresente suficientemente potável para a satisfação das necessidades sem riscos para a saúde pública. Na natureza, a água usada para fins de abastecimento tem como origem fontes superficiais (rios, lagos) ou subterrâneas (aquíferos) cuja qualidade é variável em função do tipo de fonte.

A nível mundial, esta água é considerada um recurso escasso por cobrir apenas 2,5% de água doce existente (sendo a restante água salgada), e nesta água doce, somente 0,3% encontra-se disponível superficialmente, e 30,2% nos aquíferos (Hipólito & Vaz, 2017).

Por conta da crescente escassez de águas naturais de boa qualidade, em explorações que visam o abastecimento de água público, há necessidade de se avaliar previamente a qualidade da água bruta de modo que possam ser definidas as medidas/tecnologias de tratamento a adoptar para torná-la potável e segura para o consumo humano.

Em termos gerais, os critérios de avaliação da qualidade da água assentam no agrupamento de variáveis (parâmetros de controle) de acordo com a sua natureza ou classe, podendo ser física, química, biológica ou de lodos (porém este último é eventualmente agrupado na classe física).

#### **2.1.1 Caracterização física da água**

Esta é dada mediante o conjunto de parâmetros detectáveis através dos órgãos sensoriais do homem, a saber: turvação<sup>1</sup>, sólidos suspensos, cor, temperatura, sabor e odor. Conforme cita Drinan & Spellman (2013), a turvação de águas superficiais pode resultar de material coloidal muito pequeno ou por microrganismos e materiais vegetais. Smethurst (1979) sustenta que as partículas mais finas, os colóides, podem não ser visíveis a olho nu, mas nas suas formas mais finas conferem cor à água.

---

<sup>1</sup> A turvação da água é uma propriedade física que mede a dispersão da luz (redução da transparência) causada por partículas suspensas na água. Esta determina-se comparando as intensidades da luz difundidas pela amostra e por uma solução padrão de turvação conhecida (formazina), ambas nas mesmas condições.

No âmbito de variações sazonais significativas entre semestres húmido e seco, a abundância de sólidos suspensos ( $\varnothing > 10^{-6}\text{m}$ ) e coloidais ( $10^{-9}\text{m} < \varnothing < 10^{-6}\text{m}$ ) em águas superficiais (usualmente na época chuvosa), além de implica altos níveis de turvação. Além disso, Degrémont (1991) afirma que partículas dissolvidas ( $\varnothing < 10^{-9}\text{m}$ ), não só são formadas por catiões ou aniões, como também por matéria orgânica dissolvida e gases.

Desta forma, a turvação da água bruta tem grande importância na medida em que é um dos principais parâmetros para selecção de tecnologia de tratamento e controle operacional dos processos de tratamento (Ministério da Saúde: Brasília, 2006).

### **2.1.2 Caracterização química da água**

A componente química da água é referente ao seguinte: pH (potencial hidrogeniónico), sólidos totais dissolvidos, dureza, alcalinidade e matérias orgânica e inorgânica.

No que diz respeito a acidez ou alcalinidade, o pH é o parâmetro ideal para o efeito. Drinan & Spellman (2013) afirmam que os níveis de pH da água afectam directamente alguns processos unitários, incluindo desinfeção com cloro (isto é, o aumento do pH aumenta o tempo de contacto necessário para desinfeção com cloro).

Para a dureza na água, o cálcio e magnésio são os minerais indicativos da mesma. Drinan & Spellman (2013) sustentam que esses minerais dissolvidos causam depósitos em escala, em tubagens de água quente e afectam eficiência do sabão. Quanto a classificação, de acordo com Krenkel & Novotny (1980), a água pode ser:

- 0 – 75 mg/l: mole
- 75 – 150 mg/l: moderadamente dura
- 150 – 300 mg/l: dura
- Acima de 300 mg/l: extremamente dura.

### **2.1.3 Caracterização biológica da água**

A matéria biológica na água está directamente ligada a poluição e contaminação da mesma, o que conduz ao desenvolvimento de doenças no organismo do homem por conta de agentes animais (protozoários) e vegetais (algas), juntamente com bactérias (coliformes).

No caso das bactérias, de acordo com Drinan & Spellman (2013), os coliformes fecais não causam doenças por si só, pois, os resíduos corporais humanos contêm milhões de coliformes. Ainda assim, é importante considerar o número de coliformes fecais presentes na água, para aferir a necessidade de desinfecção da mesma.

## 2.2 Tratamento de Água

### 2.2.1 Considerações gerais

Uma ETA é um conjunto de operações unitárias interligadas cujo propósito é melhorar a qualidade da água bruta até níveis compatíveis com os padrões de potabilidade. A escolha da tecnologia de tratamento é feita consoante a água bruta e sua demanda, localização geográfica, custos envolvidos, manuseio e disposição final do lodo (Libânio, 2010). Quanto a classificação das ETAs, estas são agrupadas de acordo com tipo de filtração escolhido:

- Estações baseadas na filtração rápida (tratamento convencional);
- Estações baseadas na filtração lenta (tratamento não convencional).

O tratamento convencional é um sistema mais completo, que incorpora processos unitários (coagulação, floculação, sedimentação, filtração, desinfecção, fluoretação e correção do pH) concebidos individualmente em unidades específicas, a fim de proporcionar maior controle, operação e eficiência de remoção de impurezas. Todavia, esta solução é comum para zonas de grande urbanização, para fornecer um volume de água considerável, ainda que os custos de tratamento e manutenção da ETA sejam dispendiosos.

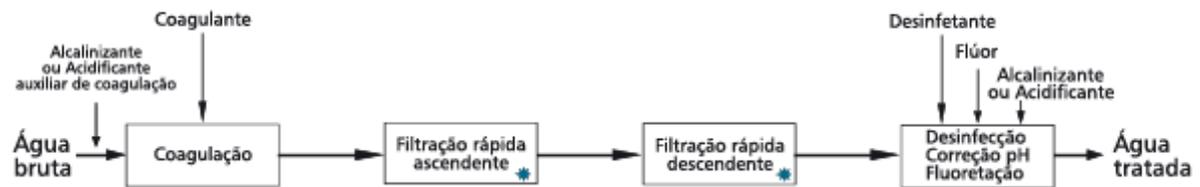
#### 1 - Filtração direta descendente, com ou sem pré-floculação



#### 2 - Filtração direta ascendente



### 3 - Dupla filtração



### 4 - Ciclo completo ou convencional



\* Processos que geram descargas de fundo

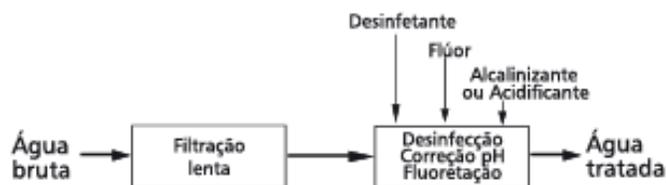
**Figura 2.1** Técnicas de tratamento com uso da filtração rápida. Fonte: Ministério da Saúde – Brasília (2006)

A operação em tratamento não-convencional converge em três unidades a saber:

- Pré-tratamento: ocorre a coagulação, floculação e sedimentação;
- Tratamento: ocorre a filtração lenta;
- Pós-tratamento: ocorre a desinfecção e opcionalmente fluoretação e correção do pH.

Além desta solução ser de carácter económico, é conveniente para alimentar zonas peri-urbanas ou rurais, entretanto, é preciso ter rigor no dimensionamento e funcionamento das unidades, para salvaguardar a eficiência correcta dos processos unitários.

### 1 - Filtração lenta



### 2 - Filtração lenta precedida de pré-filtração dinâmica



### 3 - Filtração em múltiplas etapas - FIME



**Figura 2.2** Técnicas de tratamento com uso da filtração lenta em areia. Fonte: Ministério da Saúde - Brasília (2006)

#### 2.2.2 Coagulação

De acordo com Degrémont (1991), coagulação é o processo de desestabilização de partículas coloidais provocada pela adição de um reagente químico conhecido como coagulante. Smethurst (1979) afirma que seu objectivo principal é auxiliar na remoção dos sedimentos mais finamente divididos e dos colóides.

Smethurst (1979) declara que o precipitado formado na água é denominado floco; quanto maior e mais pesado o floco, mais rápida é a taxa de sedimentação. É frequentemente benéfico utilizar produtos químicos adicionais (adjuvantes), que embora não sejam verdadeiros coagulantes, intensificam e melhoram a formação de flocos.

Quanto à desestabilização de partículas, são várias as teorias que descrevem este processo sendo, a mais generalizada a teoria da dupla camada (Degrémont, 1991) segundo a qual, a primeira camada, mais distante do núcleo do colóide (iões negativos que garantem neutralidade de toda a massa), perde rapidamente o seu potencial (potencial Stern) com a saturação do meio com cargas opostas, e a segunda (iões positivos espaçados de forma difusa redor do colóide, perde o seu potencial de forma mais lenta (Degrémont, 1991).

Os produtos químicos usados são diversos, todavia, o mais comum é o sulfato de alumínio  $[Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O]$ . Além deste, existem outros tais como o cloreto férrico  $[FeCl_3]$ , aluminato de sódio  $[NaAlO_2]$ , polímeros de alumínio, entre outros.

Quanto a eficiência da coagulação, esta é garantida em forma de mistura rápida, mediante o gradiente de velocidade  $G$  ( $s^{-1}$ ) e o tempo de contacto  $t$  (s).

**Tabela 2.1** Valores recomendáveis de G e t para mistura rápida. Fonte: Shammas (2005)

<b>Tempo de contacto t (s)</b>	<b>Gradiente de velocidade G (s<sup>-1</sup>)</b>
0,5 – 1,0	4000
10 – 20	1000
21 – 30	900
31 – 40	800
41 – 60	700

O gradiente de velocidade é dado pela seguinte expressão:

$$G = \sqrt{\frac{W}{Vt \cdot \mu}} = \sqrt{\frac{P}{V \cdot \mu}} \quad (1)$$

Onde:

G – Gradiente de velocidade (s<sup>-1</sup>)

W – Energia dissipada na massa líquida (N · m)

P – Potência dissipada na massa líquida (N · m/s)

V – Volume do líquido na câmara de mistura (m<sup>3</sup>)

t – Tempo de retenção na câmara de mistura (s)

μ – Coeficiente de viscosidade dinâmica (N · s/m<sup>2</sup>)

Quando o gradiente de velocidade é produzido de forma hidráulica, a potência P é dada pelo seguinte:

$$P = \Delta h \cdot \rho_a \cdot g \cdot Q \quad (2)$$

Em que:

P – Potência dissipada na massa líquida (N · m/s)

$\Delta h$  – Perda de carga na câmara (m)

$\rho_a$  – Densidade da água ( $\text{Kg/m}^3$ )

$g$  – Aceleração da gravidade ( $\text{m/s}^2$ )

$Q$  – Caudal na câmara de mistura ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

Logo, agrupando os termos da equação (2) na equação (1), teremos o seguinte:

$$G = \sqrt{\frac{\Delta h \cdot g}{T_r \cdot \nu}} \quad (3)$$

Onde:

$T_r$  – tempo de retenção na câmara de mistura (s)

$\nu$  – Coeficiente de viscosidade cinemática ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

O tempo de retenção é dado por:

$$T_r = \frac{V}{Q} \quad (4)$$

Em que:

$T_r$  – Tempo de retenção na câmara de mistura (s)

$V$  – Volume do líquido na câmara de mistura ( $\text{m}^3$ )

$Q$  – Caudal na câmara de mistura ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

### **2.2.2.1 Preparação da dosagem e mistura de coagulante**

Segundo Smethurst (1979), os coagulantes podem ser adicionados à água como uma solução, ou na forma de pó ou pasta, de forma contínua e controlada.

A dosagem da mistura tem como parâmetros fundamentais o teor do coagulante, o pH da água e a turvação. Segundo Di Bernardo & Dantas (2005), é necessário esclarecer que não há dosagem ótima de coagulante e tão pouco pH ótimo de coagulação, termos

geralmente usados na prática. Na verdade, há um par de valores “dose de coagulante Vs pH da solução” considerado apropriado para a coagulação, que é selecionado tendo em consideração aspectos como, a necessidade ou não de correção da alcalinidade ou pH, a turbidez remanescente, o custo com produtos químicos, etc. (Di Bernardo & Dantas, 2005). Este par de valores pode ser obtido mediante o ensaio *Jar-Test*, que é uma alternativa pertinente, pois estabelece um gráfico que correlaciona os resultados de pH e teor de coagulante para cada um dos copos de ensaio.

### **2.2.3 Floculação**

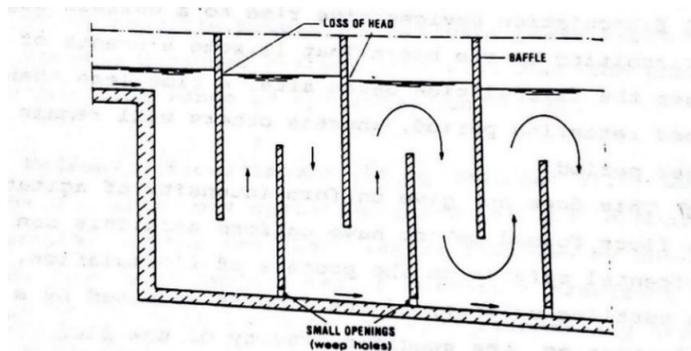
Segundo Degrémont (1991), a floculação é o processo de aglomeração de partículas desestabilizadas em microflocos e, posteriormente, em flocos volumosos que podem ser posteriormente removidos por sedimentação. Mishra & van Breemen (1987) sustentam que a floculação é geralmente realizada em grandes tanques com algum tipo de mistura mecânica ou mesmo em alguma forma de flocladores de leito de granular utilizando energia hidráulica para a mistura.

Existem dois tipos de floculação, a saber: floculação por agitação mecânica e a floculação derivada da perda de carga hidráulica. De acordo com a literatura, a mistura mecânica proporciona alta eficiência e flexibilidade de operação, mas é geralmente cara e complexa na operação e manutenção para além de depender da disponibilidade de mão-de-obra qualificada. A mistura hidráulica por sua vez é menos dispendiosa, pode ser operada por pessoal relativamente pouco qualificado, mas tem a restrição de ser menos flexível à intensidade de mistura e às variações de fluxo e qualidade de água (Matsinhe, 2008).

No que concerne à materialização da floculação hidráulica, Matsinhe (2008) afirma que os métodos mais comuns incluem o uso de canais de floculação por chicanas, a filtração em meio granular fixo e a filtração em meio granular flutuante.

Segundo Matsinhe (2008), os métodos baseados na filtração em meio granular fixos são a base dos chamados processos de filtração directa, nos quais o coagulante é introduzido directamente na água bruta afluente imediatamente antes da entrada para o filtro. O cisalhamento do fluido induzido pelo fluxo sinuoso da água através dos interstícios do meio filtrante promove o gradiente de velocidade ( $G$ ) necessário e o transporte das partículas

desestabilizadas da suspensão para a superfície dos grãos do meio filtrante, onde eventualmente se fixam por mecanismos de sedimentação, adsorção e interceptação (Matsinhe, 2008).



**Figura 2.3** Floculador de chicanas vertical. Fonte: Mishra & van Breemen (1987)

Para melhor operação da floculação, temos a seguir valores recomendados para os parâmetros de dimensionamento:

**Tabela 2.2** Valores recomendáveis de G e Gt para mistura lenta em floculação. Fonte: Smethurst (1979)

Tipo de água a tratar	G (s <sup>-1</sup> )	Gt
Turvação ou remoção de cor (sem recirculação de sólidos)	20 – 100	20 000 – 150 000
Turvação ou remoção de cor (com recirculação de sólidos)	75 – 175	125 000 – 200 000
Amaciantes (reactores de contacto com sólidos)	130 – 200	200 000 – 250 000
Amaciantes (sólidos ultra-altos)	250 – 300	300 000 – 400 000

Os valores de G e Gt (produto do gradiente de velocidade pelo tempo de retenção, designado Número de Camp) da tabela acima são aplicáveis para todos tipos de água a tratar. Entretanto, Mishra & Breemen (1987) sustentam que o intervalo óptimo de valores de G na floculação hidráulica esteja entre 20 e 70s<sup>-1</sup>. Em contrapartida, Degrémont (1991) sustenta que os valores geralmente aceitáveis para este parâmetro estão em torno de 100 s<sup>-1</sup>. Além disso, o gradiente não pode ser aumentado exageradamente, pois, se este for elevado, os flocos formados podem sofrer cisalhamento mecânico que leva a sua

destruição (Degrémont, 1991). Quanto aos valores de Gt e tempo de retenção, Mishra & Breemen (1987) acrescentam que seus valores convencionais estejam num intervalo de 30 000 – 150 000 e 20 – 30min, respectivamente.

Segundo Matsinhe (2008), dois factores principais governam a eficiência dos processos de floculação: a intensidade (G) e a duração da agitação (t). A intensidade de mistura é expressa em termos de gradiente médio de velocidade G (s<sup>-1</sup>), que expressa a entrada de energia no sistema. A expressão é dada por:

$$G = \sqrt{\frac{\Delta h \cdot g}{T_r \cdot v}} \quad (5)$$

$$T_r = \frac{L}{v_f} \quad (6)$$

No caso da floculação em meio granular, é pertinente considerar um modelo capilar idealizado baseado num feixe de tubos capilares, para levar em conta o caminho tortuoso do fluxo através do leito filtrante, tal que o comprimento efectivo dos tubos capilares idealizados estão relacionados à porosidade do leito filtrante e podem ser calculados como:

$$L = L_f \cdot \omega \quad (7)$$

Onde:

L – Comprimento efectivo (m)

L<sub>f</sub> – Espessura do leito filtrante (m)

ω – Porosidade do leito filtrante (%)

Logo, o tempo de residência pode ser calculado da seguinte forma:

$$T_r = \frac{L_f \cdot \omega}{v_f} \quad (8)$$

Em que:

T<sub>r</sub> – Tempo de residência (s)

$L_f$  – Espessura do leito filtrante (m)

$\omega$  – Porosidade do leito filtrante (%)

$v_f$  – taxa de filtração (m/h)

A porosidade da camada de filtração obstruída  $\omega$  é obtida a partir da equação de Carman-Kozeny baseada na perda de carga no tempo específico  $t$ . Com  $K_m$  tomado como 5,0, a expressão para a porosidade da camada filtrante obstruída, segundo Matsinhe (2008), é a seguinte:

$$\Delta h = \frac{36 \cdot K_m \cdot v_f \cdot \nu \cdot L_f \cdot (1 - \omega)^2}{g \cdot s^2 \cdot d^2 \cdot \omega^3} \quad (9)$$

Onde:

$\Delta h$  – Perda de carga no floculador hidráulico (m)

$K_m$  – Constante relacionada a perda de carga no filtro granular (-)

$v_f$  – Taxa de filtração (m/h)

$\nu$  – Coeficiente de viscosidade cinemática (m<sup>2</sup>/s)

$L_f$  – Espessura do leito filtrante (m)

$\omega$  – Porosidade do leito filtrante (%)

$g$  – Aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>)

$s$  – Factor de esfericidade do material do filtro (-)

$d$  – Diâmetro efectivo do material filtrante no leito (m)

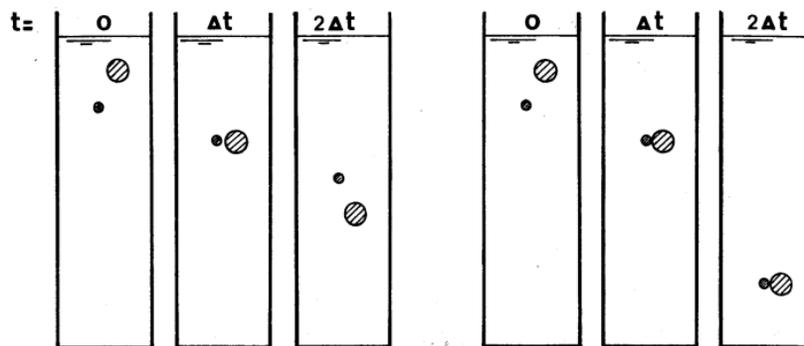
A relação para  $G$  em um meio poroso é derivada da seguinte equação:

$$G = \sqrt{\frac{\Delta h \cdot g \cdot v_f}{L_f \cdot \omega \cdot \nu}} \quad (10)$$

## 2.2.4 Sedimentação

A sedimentação (ou clarificação) é um processo de separação complementar aos processos de coagulação e floculação, com base na qual sólidos e partículas floculadas são separadas da água por ação da gravidade. Para a sua materialização usam-se geralmente tanques de relativamente grande dimensão, operando a baixas velocidades.

No âmbito de tratamento de água, a sedimentação classifica-se em sedimentação discreta e sedimentação floculenta. Segundo Huisman (2004), a primeira ocorre quando as partículas a remover mantêm as suas propriedades ao longo do processo (ex: grãos de areia) implicando um processo de sedimentação a uma taxa constante enquanto o segundo ocorre quando as partículas alteram as suas propriedades ao longo do processo (agregação, por adsorção) o que implica taxas de sedimentação mais elevadas do agregado.



**Figura 2.4** Sedimentação de partículas discretas e floculentas. Fonte: Huisman (2004)

### 2.2.5 Filtração

A filtração é um processo de separação de partículas presentes na água a tratar que envolve processos físicos, químicos e biológicos de separação de impurezas suspensas através da passagem da água por um meio poroso (geralmente areia). Os mecanismos dominantes dependem das características físicas e químicas da suspensão e do meio poroso, das taxas de filtração aplicadas e das características químicas da água (Mishra & van Breemen, 1987).

No que concerne a tipologia dos filtros, estes podem ser de pressão ou de gravidade. Dependendo da taxa de filtração aplicada os filtros podem ainda ser classificados em filtros por gravidade (FRG), e filtros lentos (FL).

Na tabela a seguir apresenta-se um quadro comparativo das características construtivas de filtros por gravidade:

**Tabela 2.3** Recursos gerais de construção e operação de filtros convencionais de areia lentos e rápidos.  
 Fonte: Schulz & Okun (por Mishra & van Breemen, 1987)

<b>Recursos</b>	<b>Filtros Lentos de Areia</b>	<b>Filtros Rápidos de Areia</b>
Taxa de filtração	0,1 a 0,2 a 0,4 m/h	4 a 5 a 21 m/h
Dimensões do leito	Grande, em 2000m <sup>2</sup>	Pequeno, em 40 a 400m <sup>2</sup>
Profundidade do leito	30cm de cascalho 90 a 100cm de areia usualmente reduzida para não menos que 50-80cm por raspagem	30 a 45cm de cascalho 60 a 70cm de areia não reduzida pela lavagem
Dimensão da areia	$d_{eff} = 0,25$ a $0,3$ mm $c_u = 2-2,5-3$	$d_{eff} = 0,55$ mm e maior; $c_u = 1,5$ e menor, dependendo do sistema de drenagem subterrânea
Distribuição granulométrica de areia no filtro	Não estratificada	Estratificada com grãos mais pequenos ou leves no topo, e mais grossos ou pesados no fundo
Sistema de drenagem subterrânea	1.laterais divididas em pedra grosseira e descarregando em drenos principais de ladrilho ou betão	1.laterais de tubo perfurados descarregando na corrente de tubulação 2. tipo de piso falso com orifícios
Perda de carga	6cm iniciais até 120cm finais	30cm iniciais até 240 ou 275cm finais
Tempo entre lavagens	20 a 30 a 60 dias	12 a 24 a 72 horas
Método de limpeza	Raspagem de camada superficial de areia e lavagem e armazenamento de areia limpa para relaxamento periódico da areia	Desalojamento e remoção de matéria suspensa por fluxo ascendente ou retrolavagem que fluidiza o leito.

Do ponto de vista de operação, a passagem da água através do meio poroso e a consequente retenção de partículas resulta numa redução gradual e contínua da porosidade que se traduz num aumento gradual da resistência do meio filtrante.

Segundo Degrémont (1991), a resistência inicial do meio à passagem da água pode ser aproximada pela expressão abaixo (Carman-Kozeny), actuando em regime laminar:

$$l_0 = \frac{H_0}{L_f} = 180 \cdot \frac{v}{g} \cdot \frac{(1 - p_0)^2}{p_0^3} \cdot \frac{v_f}{d^2} \quad (11)$$

$$Re = \frac{1}{p_0} \cdot \frac{v_f \cdot d}{v} < 5 \quad (12)$$

Com:

$l_0$  – Gradiente inicial de resistência (m/m)

$H_0$  – Resistência inicial do filtro (m)

$L_f$  – Espessura do leito filtrante (m)

$v$  – Coeficiente de viscosidade cinemática (m<sup>2</sup>/s)

$g$  – Aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>)

$p_0$  – Porosidade inicial (%)

$v_f$  – Taxa de filtração (m/s)

$d$  – Diâmetro efectivo do material do leito (m)

$Re$  – N<sup>o</sup> de Reynolds (-)

Durante a filtração, e em consequência da retenção de partículas a resistência do meio à passagem da água vai aumentar por conta da redução da porosidade do material filtrante, processo que é traduzido pela expressão abaixo:

$$l = l_0 \left( \frac{p_0}{p_0 - \sigma_v} \right) \quad (13)$$

Em que:

$I$  – Gradiente de resistência em função do volume obstruído por sólidos nos poros (m/m)

$I_0$  – Gradiente inicial de resistência (m/m)

$p_0$  – Porosidade inicial (%)

$\sigma_v$  – Volume obstruído por sólidos nos poros (-)

Este processo, resulta numa alteração de pressões intersticiais no leito filtrante cuja sua distribuição é ilustrada na figura abaixo:

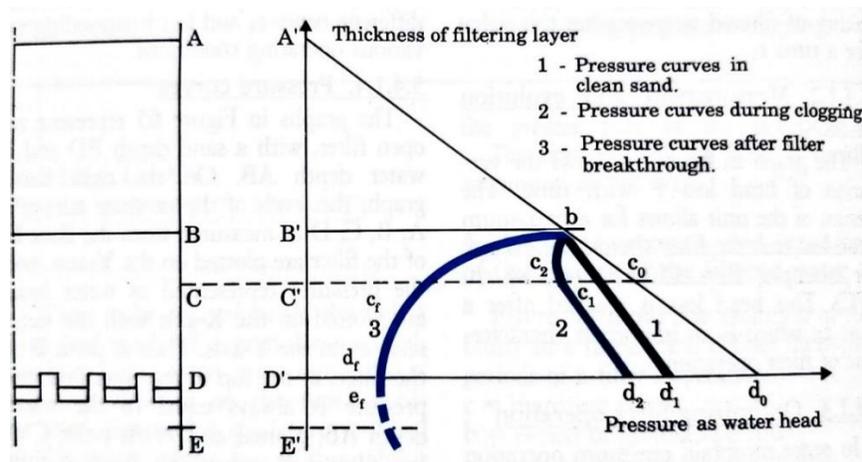


Figura 2.5 Distribuição de pressões no leito do filtro. Fonte: Degrémont (1991)

Onde:

AB – altura do líquido supernatante;

BD – altura do material filtrante.

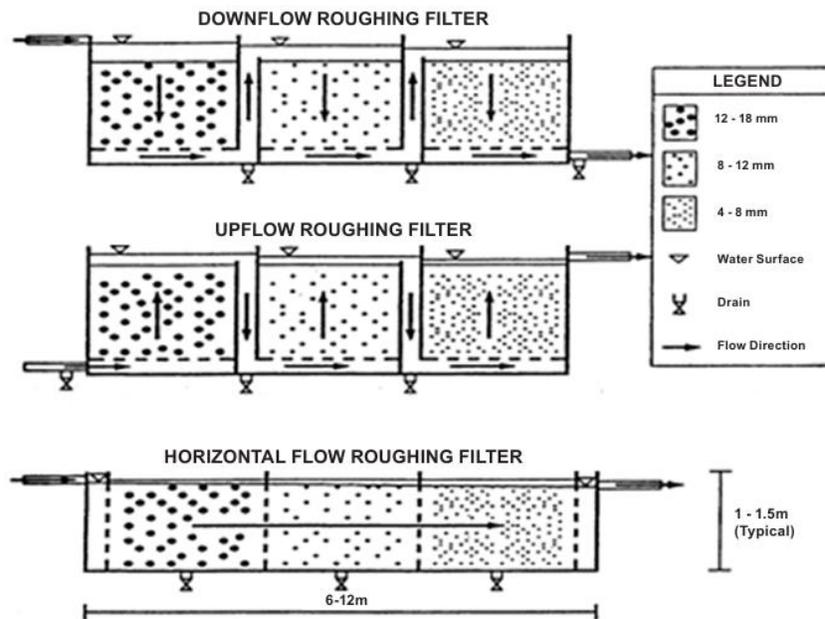
Quando se atinge a resistência máxima, a eficiência da operação fica comprometida o que dita a necessidade de restauração da capacidade original de filtração através da sua limpeza cuja materialização depende da tipologia do filtro (ver tabela 2.3).

### 2.2.6 Filtração por arrastamento

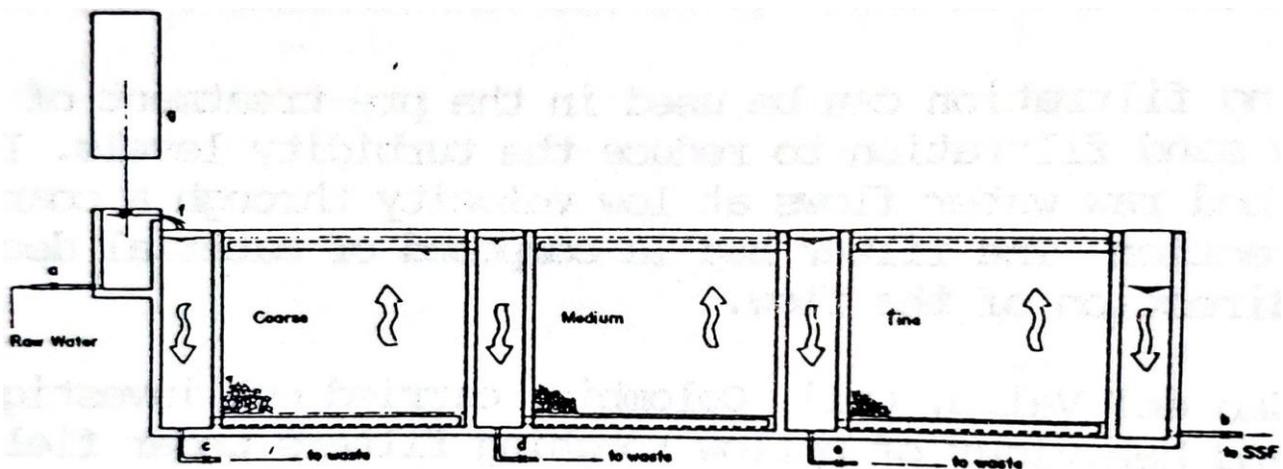
Esta etapa de pré-tratamento consiste em receber a água bruta proveniente do rio ou câmara de entrada, escoando a água através dum meio poroso filtrante, e reduzir os seus

níveis de turvação a fim de alcançar valores aceitáveis os quais não comprometam o funcionamento e o rendimento do processo subsequente que é a filtração lenta.

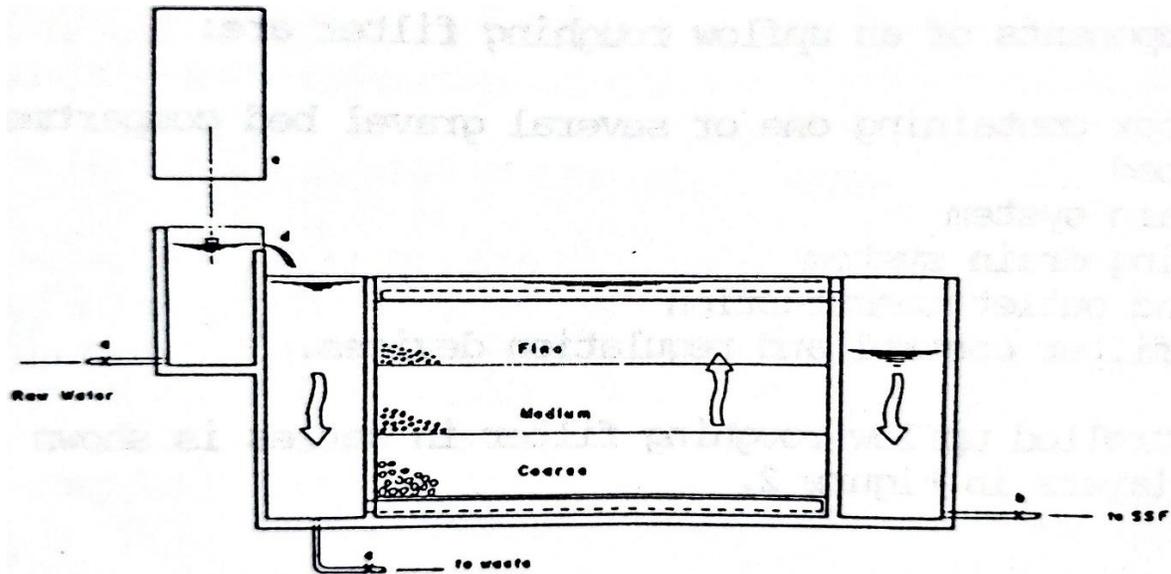
Existem dois tipos principais de filtração por arrastamento de fluxo ascendente: em série e em camadas. Conforme o projecto da ETA em estudo, a solução proposta é de filtros de fluxo ascendente em camadas múltiplas. A escolha desta solução, deve-se à sua grande capacidade de remoção de turvação e sólidos sem necessariamente haver necessidade do uso de produtos químicos, equipamento mecanizado e operações complexas.



**Figura 2.6** Configurações de filtros grossos de fluxos vertical e horizontal. Fonte: Nkontwa et al (2010)



**Figura 2.7** Filtro por arrastamento de fluxo ascendente em série. Fonte: Smet et al (1990)



**Figura 2.8** Filtro por arrastamento de fluxo ascendente em camadas. Fonte: Smet et al (1990)

De acordo com Smet et al (1990), a filtração de fluxo ascendente usando material grosso de filtro tem a vantagem de que a primeira filtração ocorre na parte inferior do filtro. A capacidade de acumulação de sólidos filtrados é geralmente maior do que a da filtração de fluxo descendente, pois o processo aproveita melhor a profundidade do leito filtrante. Em contrapartida, Wegelin (1992) cita que teoricamente, filtros de fluxo descendente têm melhor desempenho do que os de fluxo ascendente como as partículas sólidas são mais propensas a se estabelecer no topo da superfície de cascalho na direção do fluxo. Entretanto, a experiência prática no campo mostra eficiência similar para ambos filtros.

Contudo, Dastanaie (2003) afirma que filtros grossos de fluxo vertical (tanto ascendente como descendente) incorporam um mecanismo de autolavagem e ocupam um espaço mínimo quando comparados aos filtros grossos de fluxo horizontal.

No caso dos filtros de fluxo horizontal, Wegelin & Mbwette (1990) sustentam que, desde que esta técnica de filtração utiliza processos naturais de purificação, não serão necessários químicos para auxiliar o processo de tratamento. A instalação de tal filtro requer apenas recursos locais, como material de construção e mão-de-obra. Além disso, não são necessárias peças mecânicas para operar ou limpar o filtro (Wegelin & Mbwette, 1990).

No que tange a constituição dos filtros grossos de fluxo ascendente, Smet et al (1990) afirmam que os seus componentes básicos são:

- Caixa de filtro contendo um ou vários compartimentos de leito de cascalho;
- Leito de cascalho;
- Sistemas de drenagem subterrânea e de coleta em drenagem;
- Construção de entrada e saída;
- Conjunto de dispositivos de controle e regulação de filtros.

Quanto a concepção na vida prática do filtro grosso de fluxo ascendente abaixo os critérios que garantem um funcionamento razoável e óptima eficiência de remoção.

**Tabela 2.4** Critérios de dimensionamento de filtros grossos de fluxo ascendente. Fonte: Smet et al (1990)

Período de operação	24h/dia
Taxa de filtração	0,5 – 1,0 m/h <sup>1)</sup>
Número de unidades filtrantes	2 no mínimo
Número de compartimentos de leito filtrante	1 a 3 <sup>2)</sup>
Fracções de tamanho do cascalho	
Grosseiro	24 – 18 mm
Médio	18 – 12 mm
Fino	12 – 6 mm
Altura das fracções de tamanho do cascalho	0,30 – 0,80 m <sup>3)</sup>
Altura dos drenos de fundo, incluindo camada de cascalho (30 – 24 mm)	0,10 – 0,20 m
Área do leito filtrante	15 – 25 m <sup>2</sup> por compartimento
Velocidade de filtração durante a limpeza	4 – 6 m/h <sup>4)</sup>

1) Velocidade de aproximação ao leito filtrante.

2) Um compartimento de leito filtrante refere-se a filtros de fluxo ascendente em camadas.

3) Valor mínimo (0,30m) refere-se a filtros de fluxo ascendente em camadas.

4) Velocidade de aproximação ao leito filtrante. Baseado em resultados de testes.

### 2.2.6.1 Coagulação/floculação no pré-filtro

No que diz respeito a coagulação, convém que a desestabilização das partículas da água afluyente inicia já a montante do pré-filtro, mediante injeção das dosagens do coagulante.

Depois disso, espera-se que a floculação hidráulica dentro do filtro, através dos meios porosos, resulte em retenção de partículas suspensas, tendo como auxílio a sedimentação.

#### **2.2.6.2 Sedimentação/filtração no pré-filtro**

De acordo com Smet et al (1990), a eficiência de remoção é atribuída em grande parte à sedimentação, pois espera-se que o assentamento das partículas suspensas maiores ocorra nas frações de cascalho grosso e principalmente na parte inferior do leito de cascalho, próximo ao sistema de drenagem subterrânea, enquanto que as partículas restantes sejam retidas pelas frações subsequentes de cascalho mais fino.

No que diz respeito a filtração, a sua eficiência é determinada pela taxa de filtragem, material do filtro e características da água bruta. Smet et al (1990) sustentam que a remoção de sólidos em suspensão é maior em taxas de filtração mais baixas, com tamanho de meio menor, leito filtrante mais profundo e tamanho maior de sólidos em suspensão.

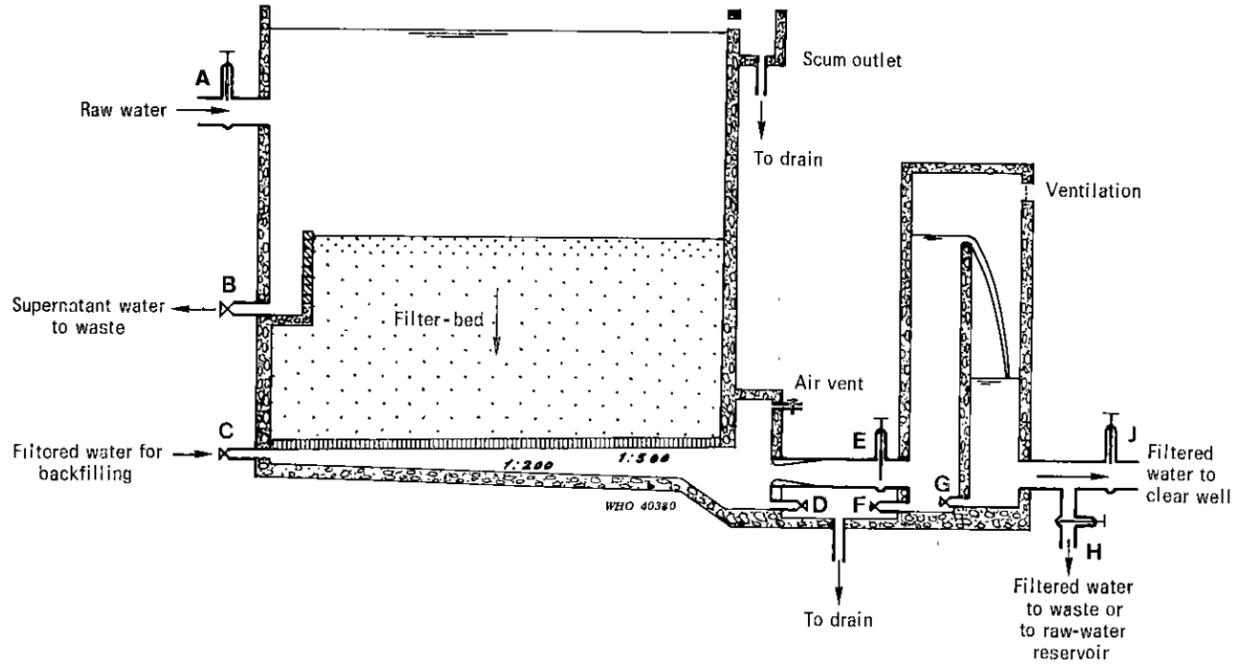
#### **2.2.7 Tratamento por filtração lenta**

De acordo com Pescod OBE (s/d), a filtração lenta de areia (SSF) é uma forma de tecnologia de tratamento de água que deve ser considerada em qualquer situação onde o baixo custo e a facilidade de operação e manutenção sejam características desejáveis. No entanto, o desempenho é fraco em águas superficiais muito turvas. Smet et al (1990) afirmam que as filtrações são muito curtas e a qualidade de água do efluente é fraca porque a acção biológica não pode se desenvolver em água bruta com níveis de turvação superiores a 50 NTU por mais de algumas semanas. Para um bom desempenho, os níveis médios de turvação da água bruta não devem exceder 10-15 NTU (Smet et al, 1990).

No que tange a concepção de um filtro lento, Pescod OBE (s/d) enumera o seguinte:

- Leito de material que atinge filtração e efeitos como purificação biológica;
- Volume armazenamento acima do leito de areia para fornecer carga necessária para produzir fluxo de projecto através do leito sobre as piores condições de perda de carga;
- Sistema de drenagem subterrânea para permitir a passagem não-obstruída de água tratada e para se apoiar no meio filtrante de modo que a taxa uniforme de filtração seja mantida em toda área do filtro;

- Dispositivos de regulação e controle dos filtros para manter o nível de água sobre o leito durante a operação na taxa de filtração de projecto e permitir o ajuste do nível de água durante a limpeza do filtro e a reintrodução à operação após a limpeza.



**Figura 2.9** Esquema do filtro lento com válvulas de controle. Fonte: Huisman & Wood (1974)

No âmbito das regras de operação do filtro lento, são baseadas nos seguintes factores:

- Taxa de filtração;
- Processo biológico;
- Frequência de operação;
- Limpeza dos filtros;
- Aeração do filtro.

### 2.2.7.1 Taxa de filtração

Segundo Huisman & Wood (1974), a taxa de filtração é controlada por uma única válvula na entrega do efluente, sendo inicialmente parcialmente fechada. À medida que a operação continua, esta válvula deve ser aberta fraccionadamente para compensar o bloqueio do filtro e manter uma taxa de filtração constante. Quando esta válvula tiver maior abertura, surge a necessidade de limpeza (Huisman & Wood, 1974).

De acordo com Abdiyev et al (2023), a taxa de filtração lenta depende do teor de sólidos suspensos da água bruta. A uma concentração de partículas não superior a 25 mg/L, a velocidade de filtração é de 0,08-0,4 m/h, e a uma concentração de partículas superior a 25 mg/L, a velocidade de filtração varia de 0,1 a 0,2 m/h (Abdiyev et al, 2023).

Em termos de ajuste da válvula, Huisman & Wood (1974) declaram que o mais satisfatório é um medidor Venturi imediatamente a montante da válvula. O mostrador do medidor é colocado próximo ao mecanismo de controle da válvula para que o operador possa verificar a leitura enquanto faz os ajustes de vazão, sendo usual também incorporar um gráfico de registro automático para melhor supervisão (Huisman & Wood, 1974).

### **2.2.7.2 Processo biológico**

Segundo Abdiyev et al (2023), os mecanismos relativos à filtração de partículas e microrganismos através de uma camada lenta de areia são o mecanismo de transporte e o mecanismo de fixação. No mecanismo de transporte, partículas na água maiores que o diâmetro dos poros da camada de areia ficam retidas na superfície da camada de areia, aderindo através de forças de *Van der Waals* (Abdiyev et al, 2023). No entanto, Abdiyev et al (2023) sustentam que à medida que as partículas assentam e o *schmutzdecke*<sup>2</sup> atinge a maturação na superfície da camada de areia, o diâmetro dos poros do filtro de areia diminui gradualmente. Por causa disso, partículas e microrganismos muito menores que o diâmetro dos poros do leito de areia podem ser retidas na superfície do leito de areia.

### **2.2.7.3 Frequência de operação**

Segundo *Public Health Engineering Equipment Sectional Committee* (1990), os filtros lentos devem ser operados continuamente 24 horas por dia, pois a operação intermitente prejudicará a qualidade da água filtrada. Caso haja alguma interrupção no fluxo de água bruta, além dos filtros não poderem ser desligados, Pescod OBE (s/d) sustenta que deve-se operar durante pelo menos 16 horas por dia, e em vez de encerrarem completamente durante a noite, podem ser deixadas filtrar a uma taxa decrescente, evitando também a

---

<sup>2</sup> *Schmutzdecke* – camada biologicamente activa, formada na superfície de um filtro de areia lento, composta por micro e macro organismos vivos e mortos.

destruição do *schmutzdecke* e o nível de água estando abaixo da superfície de areia (*Public Health Engineering Equipment Sectional Committee*, 1990).

#### **2.2.7.4 Limpeza dos filtros**

Primeiramente, Huisman & Wood (1974) declaram que, a válvula de entrada de água bruta é primeiro fechada, permitindo que o filtro continue a descarregar para o poço de água limpa. À medida que a altura manométrica no reservatório de supernatante reduz, a taxa de filtração também diminui. Logo, após algumas horas, a distribuição de efluentes para o poço de água limpa é fechada e a saída de água supernatante é escoada para resíduos através da válvula de drenagem fornecida (Huisman & Wood, 1974). Assim que o *schmutzdecke* estiver seco o suficiente para ser manuseado, a limpeza deve começar.

De acordo com Pescod OBE (s/d), a limpeza do filtro faz-se removendo a camada superficial de areia de 2-3 cm (e, finalmente, lixando novamente o filtro com areia fresca ou lavada uma vez atingida a profundidade mínima do leito). Isto só será necessário a cada 2-3 meses se o afluente para o filtro lento não tiver uma turvação média superior a 20 NTU.

Segundo Huisman & Wood (1974), a limpeza manual é feita utilizando pás de lâmina quadrada e carrinhas de mão (ou mecanizada com tractor com lâmina raspadora acoplada e *dumpers* de esteira larga, se os leitos forem grandes), retirando o *schmutzdecke* e a areia superficial aderida a ele. (Huisman & Wood, 1974). Quando o *schmutzdecke* consiste principalmente de algas filamentosas formando uma esteira entrelaçada, Huisman & Wood (1974) declaram que a limpeza deverá ser rigorosa em termos de cronometragem do tempo, tal que o material não fique encharcado nem tão seco que se torne quebradiço. Se a espécie predominante do *schmutzdecke* for diatomácea ou algum outro tipo não filamentoso, será necessária uma supervisão mais rigorosa para controlar a profundidade da raspagem (Huisman & Wood, 1974). Quanto mais rápido o leito filtrante for limpo, menor será a perturbação das bactérias e mais curto será o período de maturação. É importante também que as paredes expostas do reservatório de água supernatante sejam bem limpas para desencorajar o crescimento de limos e algas aderentes.

#### **2.2.7.5 Aeração do filtro**

Se o teor de oxigênio dissolvido da água bruta cair abaixo da demanda potencial de oxigênio, condições anaeróbicas poderão se desenvolver dentro do leito (Huisman & Wood, 1974). Em jeito de prevenção, procede-se a recirculação da água garantir a satisfação da demanda de oxigênio, a qual pode ser deduzida para as seguintes expressões:

$$(Q \times OD_i) + (\alpha Q \times \Delta OD_i) - (Q \times OD_f) = (1 + \alpha) Q \times C_e \quad (14)$$

$$C_e = \frac{9\alpha - 2}{\alpha + 1} \quad (15)$$

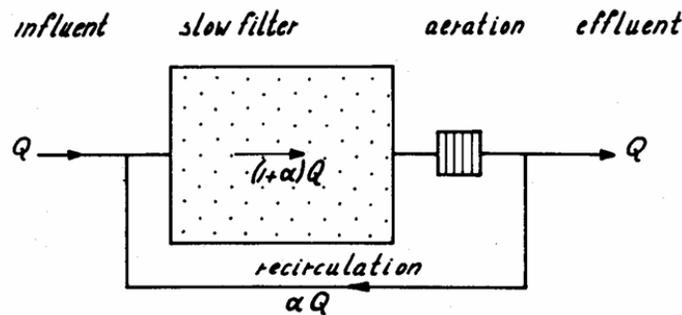


Figura 2.10 Recirculação do efluente. Fonte: Huisman (2004)

Com:

Q – Caudal afluente/efluente ao filtro

$\alpha$  – Factor de proporção do efluente (após aeração)

$OD_i$  – Teor inicial de oxigênio dissolvido

$\Delta OD_i$  – Variação do teor inicial de oxigênio dissolvido

$OD_f$  – Teor final de oxigênio dissolvido

$C_e$  – Teor de oxigênio do efluente

Caso as operações de aeração exijam que a taxa de filtração deva ser quase duplicada, isso aumentaria materialmente a perda de carga e poderia revelar-se impossível no final do funcionamento do filtro, embora a taxa de entupimento não aumentasse, uma vez que a recirculação do efluente filtrado não aumentaria a quantidade total de impurezas a serem removidas pelo filtro (Huisman & Wood, 1974).

### 2.2.8 Desinfecção

De acordo com Abdiyev et al (2023), a desinfecção é realizada para eliminar microrganismos patogênicos (bactérias, parasitas e vírus), como medida para garantir a potabilidade da água do ponto de vista de saúde pública. Esta desinfecção pode ser conseguida por radiação ultravioleta ou tratamento químico com adição de agentes oxidantes como cloro, ozono, e permanganato de potássio (Drinan & Spellman, 2013).

Mishra & van Breemen (1987) afirmam que a desinfecção de fontes de água potável é quase universalmente realizada com cloro na forma de soluções produzidas a partir do cloro gasoso ou granular (ex: hipoclorito de sódio), pois a sua capacidade de eliminar microrganismos patogênicos e de manter concentrações residuais suficientes para manter a septicidade da água nos sistemas de distribuição, bem como a sua ampla disponibilidade e custo moderado na maioria das regiões do mundo, torna--o adequado para a desinfecção.

Quando adicionado a água, o cloro tende a reagir formando ácido hipocloroso e hipoclorito que, em conjunto representam o “cloro livre disponível” (ou cloro residual) que é um bactericida muito poderoso (Smethurst, 1979).



Onde:

$\text{Cl}_2 \text{ (g)}$  – Cloro (na forma gasosa)

$\text{H}_2\text{O (l)}$  – Água (na forma líquida)

$\text{HClO (aq)}$  – Ácido hipocloroso (em solução aquosa)

$\text{H}^+ \text{ (g)}$  – Ião hidrogénio (na forma gasosa)

$\text{Cl}^- \text{ (aq)}$  – Ião hipoclorito (em solução aquosa)

A presença de cloro residual na água em concentrações de 0,2 a 0,5 mg/l, é um indicador de eficiência de eliminação de organismos.

### 3. DESCRIÇÃO DO OBJECTO DE ESTUDO

#### 3.1 Localização e Descrição

A ETA objecto de estudo neste trabalho está localizada na vila de Murrupula, sede do distrito do mesmo nome, situada no sul da província de Nampula (ao longo da EN1), a cerca de 75 Km da cidade capital da mesma província, na zona norte de Moçambique.

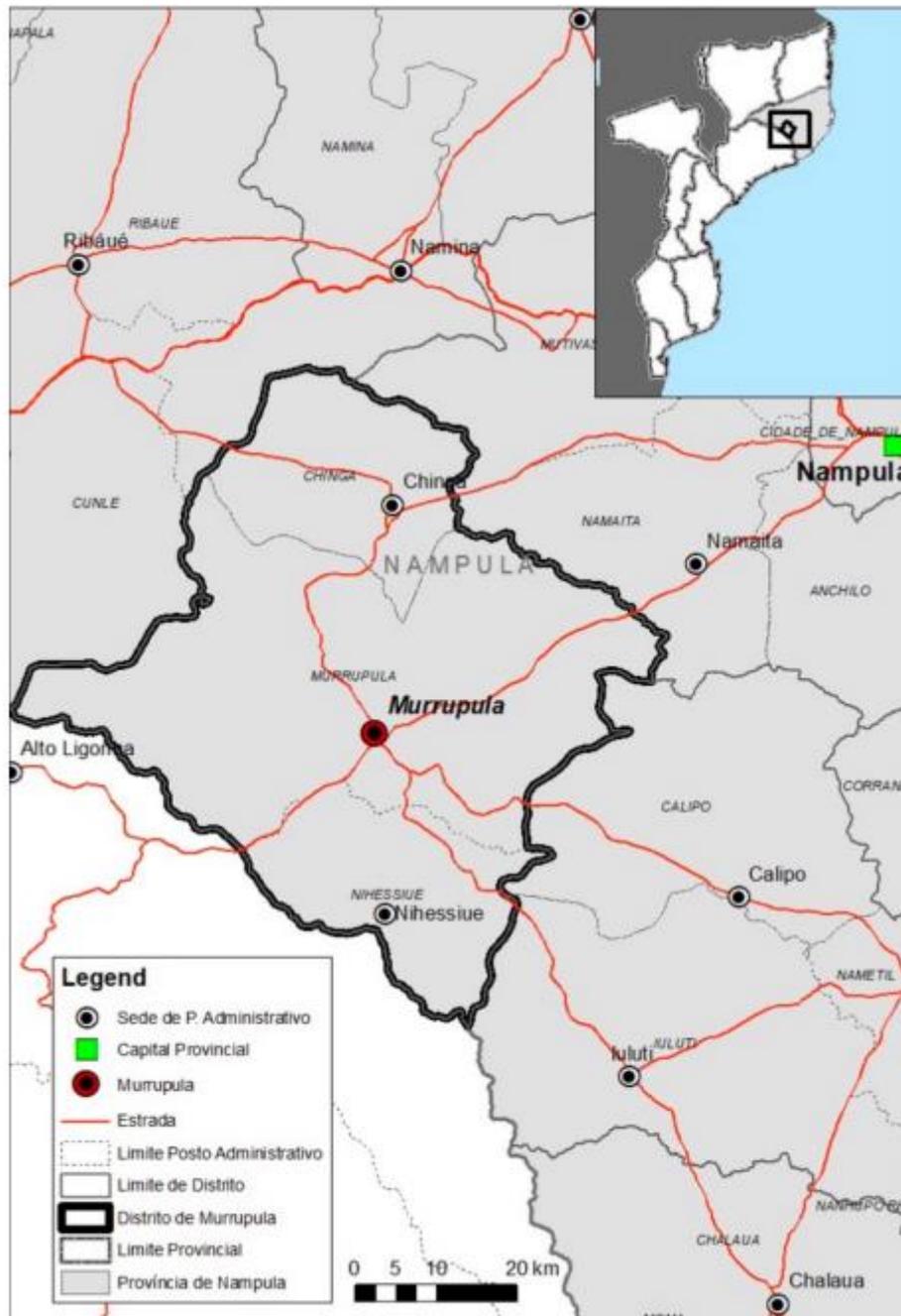


Figura 3.1 Mapa de localização da Vila de Murrupula.



**Figura 3.2** Planta de implantação da ETA de Murrupula.

A vila beneficiou da construção de um SAA cuja captação, do tipo superficial, está localizada numa represa construída no rio Nahessive, à cerca de 6 Km do centro da vila. Da estação de captação, a água bruta é aduzida por pressão numa extensão de cerca de 1,8 Km até a ETA, localizada num espaço com as seguintes coordenadas de referência (463002.00mE: 8294883.00 mS) onde, para além das unidades de tratamento da água que constituem a ETA estão também localizados os reservatórios de água tratada (RAT) que

servem também de centro distribuidor central dada a sua localização em ponto topograficamente elevado que permite uma distribuição gravítica a partir do mesmo ponto. A rede de distribuição primária é do tipo parcialmente malhada com 28,6 km de extensão e constituída por condutas de uPVC classe 9 de diâmetros entre 63 mm e 400 mm e abrange todos bairros da vila com características urbanas/semi-urbanas e rurais situados num raio de até 5,8 Km ao redor do centro da vila.



**Figura 3.3** Vista geral da ETA de Murrupula – câmara de entrada, pré-filtros e filtros lentos.

### **3.2 Constituição da ETA e Diagrama do Processo de Tratamento de Água**

A ETA em estudo, é essencialmente do tipo não-convencional mas com processos/operações unitárias característicos de processos convencionais tal é o caso da coagulação e floculação (hidráulica.) que está concebida para ter lugar nas unidades de às quais se segue a filtração lenta e a desinfecção. Para além dos processos essenciais para o tratamento da água a ETA incorpora também um circuito de tratamento de águas residuais e lamas produzidas nas unidades de pré-filtração em consequência das operações de drenagem/purga destas unidades.

Do ponto de vista de modelo funcional, a ETA está concebida no modelo filtração directa dupla (pré-filtros e filtros lentos), com três linhas de produção paralelas, cada uma dimensionada para 1/3 da demanda projectada para o SAA no ano horizonte (2042) que é de 270m<sup>3</sup>/h. Na situação actual, somente duas das 3 linhas de produção foram executadas e as duas são operadas com um caudal de 105,5m<sup>3</sup>/h durante 20 horas de produção por dia.

Cada linha de produção da ETA (ver Anexo 1) possui:

- Dois compartimentos de pré-filtração em meio granular (filtros de areia grossa de fluxo ascendente) dimensionados para uma taxa de filtração de 0,3 – 1,0 m/h;
- Dois compartimentos de filtração lenta dimensionados para uma taxa de filtração de 0,2 – 0,3 m/h.

O pré-tratamento é destinado a reduzir os níveis de turvação da água bruta (época seca e chuvosa) para níveis que não excedam os 20 – 30 NTU que são os níveis adequados para uma operação segura dos filtros lentos.

### 3.2.1 Câmara de entrada

Esta é a primeira unidade da ETA localizada logo a jusante da conduta adutora da água bruta, e consiste na equalização dos caudais afluentes às linhas de produção da ETA. De acordo com o projecto de execução, a mesma foi dimensionada para um tempo de retenção hidráulica de 10min. Trata-se de uma câmara com dimensões em planta de 3,34m x 3,50m, profundidade útil de 3,80m e profundidade total de 4,10m.



**Figura 3.4** Câmara de entrada – água bruta e caudal de retorno.

### 3.2.2 Pré-filtração

Esta constitui a primeira unidade da ETA onde se espera a redução parcial de partículas e turvação afluente como resultado de processos de retenção e sedimentação no meio filtrante que é parte integrante da unidade de tratamento. Trata-se de uma unidade concebida para redução da turvação e sólidos com e sem adição de coagulantes. Em

termos dimensionais cada unidade apresenta as características resumidas no quadro a seguir:

**Tabela 3.1** Dimensões e características dos pré-filtros.

Dimensões em planta	7,60m x 6,10m
Altura total	2,30m
Caudal de dimensionamento	22,5m <sup>3</sup> /h
Constituição do leito filtrante	Camada de fundo: brita c/ 18-24mm
	Camada intermédia: brita c/ 12-18mm
	Camada de topo: brita c/ 6-12mm
Altura das camadas do leito (de fundo, intermédia e de topo, respectivamente)	0,6m / 0,4m / 0,4m
Altura da camada supernatante (constante)	1,0m
Taxa de filtração projectada	0,3 – 1,0m/h
Altura do sistema de fundo (24-30mm)	0,20m
Taxa de lavagem projectada	4m/h

Do ponto de vista operacional, o efluente de cada unidade é recolhido por um canal lateral provido de 8 descarregadores laterais com 0.4 m de largura e espaçamento de 0,6 m (eixo por eixo) que se ligam à uma câmara de recolha comum com dimensões em planta de 2,20m x 2,20m para posterior descarga gravítica nas unidades de filtração lenta.

### 3.2.3 Filtração lenta

Trata-se de filtros lentos de areia (sílica) que recebem o efluente das unidades de pré-filtração para tratamento final. Em termos dimensionais cada unidade apresenta as características resumidas no quadro a seguir:

**Tabela 3.2** Características dos filtros lentos.

Dimensões em planta	8,10m x 14,10m
---------------------	----------------

**Tabela 3.2** Características dos filtros lentos.

Altura total	3,60m
Caudal de dimensionamento	22,5m <sup>3</sup> /h
Leito filtrante	Areia sílica com $d_{eff} = 0,15 - 0,35\text{mm}$
Massa volúmica	2600kg/m <sup>3</sup>
Esfericidade dos grãos	0,7 – 0,8
Porosidade	42 – 47%
Coefficiente de uniformidade	2 – 3
Altura do leito filtrante	0,9m
Alturas mínima e máxima da supernatante	0,2 – 1,2m
Taxa de filtração projectada	0,2 – 0,3m/h
Método de lavagem (remoção de camadas e <i>resanding</i> )	7 – 10cm do topo do leito (até atingir 30cm do leito removido)

### 3.2.4 Adição de reagentes

De acordo com o projecto de execução, são dois os reagentes aplicados na ETA designadamente, o cloro e o sulfato de alumínio. Conforme o projecto, o cloro é aplicado na pré-cloração (processo opcional) e da desinfecção, enquanto o sulfato de alumínio é aplicado para a promoção de coagulação e floculação nas unidades de pre-filtração.



**Figura 3.5** Sala de preparação e dosagem de cloro e sulfato de alumínio (dois recipientes de 15 litros cada).

Os reagentes usados são fornecidos na forma granular o que significa que para a sua aplicação é antecedida da preparação das soluções de reagentes, processo que é realizado em tanques próprios equipados com misturadores eléctricos e acondicionados num edifício de preparação e dosagem de reagentes conforme ilustra a figura a seguir.

Do ponto de vista operacional, a adição do cloro para a pré-clorinação e o sulfato de alumínio para a coagulação é realizada no canal comum de entrada de água bruta para as unidades de pré-filtração com os pontos de injeção localizados na zona dos descarregadores rectangulares de regulação do fluxo afluente à dada uma das unidades com vista a tomar partido da turbulência induzida pela descarga através dos descarregadores para garantir a mistura completa dos reagentes com a água a tratar.

NB: os descarregadores instalados imediatamente a montante dos pré-filtros são rectangulares, de contracção lateral, e estão ambos posicionados em cada extremidade da casota destinada a coagulação.

Já com relação a desinfecção, a soluções de cloro são aplicadas na câmara de recolha de água filtrada onde a mesma toma-se partido da turbulência induzida pela descarga através dos descarregadores para garantir a mistura completa do reagente com a água a tratar.

**Tabela 3.3** Dimensões da casota de preparação de soluções de desinfecção.

Comprimento x Largura (m <sup>2</sup> )	1,50 x 2,00
Altura (m)	2,40
Largura do descarregador rectangular de soleira delgada (m)	0,60
Altura do descarregador acima do topo do leito filtrante (cm)	10-15
Altura da lâmina líquida (cm)	5-6
Caudal específico (m <sup>3</sup> /s ml)	0,09

### 3.2.5 Instalações complementares da ETA

Além das unidades principais da ETA mencionadas acima, esta possui também instalações complementares, a saber:

- Caixas de recolha de água pré-filtrada (1,80 x 1,80 x 2,30 m<sup>3</sup>);
- Reservatório apoiado de água tratada comum a todos os módulos (RAT) (2 x 1250 m<sup>3</sup>) e centro distribuidor (CD);
- Leitos de secagem, comum a todos os módulos de produção para o tratamento final dos lodos provenientes das descargas/purga das unidades de pré-filtração;
- Cisterna de águas de retorno equipado com electrobomba submersível e conduta de retorno ligada à câmara de entrada;
- Edifícios operacionais.

De seguida, imagens ilustrativas da ETA em estudo:



**Figura 3.6** Pré-filtros de fluxo ascendente – duas linhas de produção.



**Figura 3.7** Caixa de recolha de água pré-filtrada.

## 4. RESULTADOS DA AVALIAÇÃO

A apresentação dos resultados aborda três aspectos principais:

- Desempenho hidráulico (caudais afluentes e sua distribuição pelas linhas de produção e respectivos compartimentos, taxas de filtração, tempo de retenção);
- Desempenho processual, considerando os processos unitários disponíveis em cada linha de produção e os parâmetros de qualidade de água;
- Eficiência dos processos unitários isoladamente e da ETA no global.

### 4.1 Captação da Água Bruta

A água bruta é extraída do rio Nahessive, na barragem de Naminhapa, local onde começa o SAA na estação de captação. De acordo com a informação extraída do projecto de execução, a escolha deste manancial baseou-se na análise de dados históricos de medições de caudal e níveis em estações hidrométricas próximas de Murrupula, para além de dados de precipitação da região, fornecidos pela DNGRH. Com base em informação topográfica extraída de bases cartográficas em Arc-GIS da CENACARTA, foi feita da bacia drenante que indicou uma área contribuinte à represa de 6,7 km<sup>2</sup> e um caudal potencial de 25 m<sup>3</sup>/s para um período de retorno de 5 anos e probabilidade ocorrência de 50%.

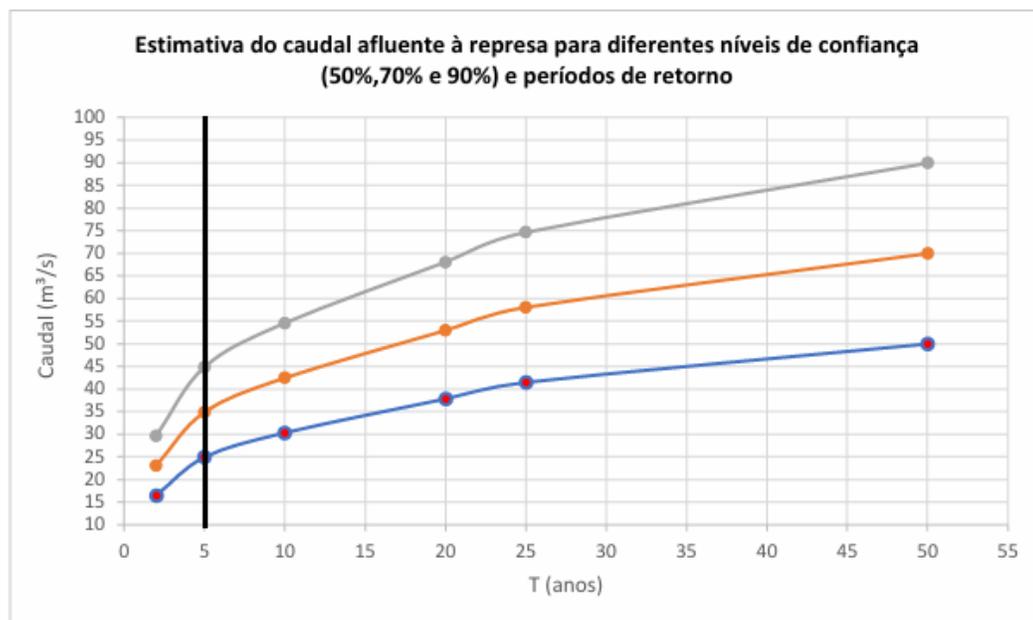


Figura 4.1 Caudais afluentes à represa para período de retorno de 5 anos.

A estação de captação é constituída por um poço de captação com dimensões em planta de 3,50 x 3,50m e profundidade de 2,50m ligado à represa por meio de um canal de derivação rectangular de 24m de extensão e 1,10m de altura, contendo material granular (pedra rachada e brita) até ½ altura destinada ao pré-tratamento da água bruta (retenção de folhas e outro material grosseiro) antes da elevação.



**Figura 4.2** Canal e poço de captação da estação de captação do SAA de Murrupula.

A estação elevatória é constituída por duas electrobombas da marca *Grundfos série NB 65-250/223*, com caudal nominal entre 12 – 135m<sup>3</sup>/h, associadas em paralelo, mas com a instalação sendo operada com uma em carga e a outra de reserva<sup>3</sup>.

As electrobombas, de acordo com as especificações técnicas do fabricante, possuem diferentes curvas em função do VSD, as quais os seus valores de caudal e altura podem ser obtidos fazendo leituras (ver Anexo 2).

De acordo com os dados do projecto as bombas foram instaladas com regulação de velocidade (VSD) à 84%. A adutora de água bruta correspondente é em PEAD ( $K_s = 125\text{m}^{1/3}/\text{s}$ ) de diâmetro nominal 315 mm, PN 12,5 ( $D_{\text{int}} = 275.6\text{mm}$ ) com um comprimento efectivo de 1800m entre a captação e a câmara de entrada da estação de tratamento. Para verificação da capacidade instalada foi determinado o ponto de funcionamento da instalação com base nos dados e formulário descrito em seguida:

---

<sup>3</sup> (para dar resposta às demandas do ano horizonte, está prevista a instalação de uma terceira electrobomba passando a instalação a operar com duas electrobombas em carga e uma de reserva).

- A curva da instalação [ $H_t = f(Q)$ ] foi obtida pela expressão:

$$H_t = H_s + H_{\text{perdas totais}} \quad (17)$$

Os dados de dimensionamento foram os seguintes:

- Cota do coroamento da represa existente  $\equiv$  Cota do NPA = 448m;
- Cota do nível mínimo de exploração NME (assumido 1.0 m abaixo do NPA) = 447m;
- Cota do terreno no reservatório de chegada na ETA (câmara de entrada) = 490m;
- Cota de entrada ao reservatório de chegada = 490 + 3 = 493m;
- Perdas localizadas na adução = 10% das perdas contínuas.

$$H_s = Z_{\text{máx}} - Z_{\text{mín}} = 493 - 447 = 46\text{m}$$

$$H_{\text{perdas totais}} = 1,1 \cdot J \cdot L_{\text{total}} = 1,1 \cdot \left( \frac{Q}{K_s \cdot A \cdot R^{2/3}} \right)^2 \cdot 1800 = 1260,6Q^2$$

Logo, obtém-se a seguinte expressão genérica para a curva de instalação:

$$H_t = 46 + 1260,6Q^2$$

Assim sendo, através da intersecção entre a curva de instalação do sistema e as curvas características da bomba (ver Anexo 2), foi possível extrair pontos de funcionamento da estação elevatória, que por sua vez, foram obtidos os valores de rendimento, potência<sup>4</sup> e NPSH da bomba, a saber:

**Tabela 4.1** Pontos de funcionamento da EE – uma bomba em carga.

i	VSD <sub>i</sub> (%)	Caudal Q <sub>i</sub> (m <sup>3</sup> /h)	Altura de elevação H <sub>i</sub> (m)	Rendimento $\eta_i$ (%)	Potência P <sub>2e, i</sub> (KW)	NPSH <sub>req, i</sub> (m)
1	84	84,0	46,7	71,0	13,5	4,6
2	90	116,0	47,4	71,5	20,7	7,5

<sup>4</sup> Para estabelecer valores de rendimento a partir de 70% (estabelecidos no projecto), foi utilizada a curva de potência P2 da bomba, a qual desconsidera o VFD (*Variable Frequency Drive*).



Figura 4.3 Estação de bombagem de água bruta: bombas adutoras, válvulas e manómetros.

## 4.2 Medições do Caudal Afluente

Do ponto de vista operacional e, na fase de arranque da operação da estação de tratamento, foram realizadas medições de caudal na câmara de entrada recorrendo-se ao método volúmetro. As medições foram efectuadas com a estação de bombagem operando com diferentes níveis de estrangulamento da válvula instalada na saída da bomba tendo-se adoptado, de acordo com a informação do operador, graus de estrangulamento de 30%, 50% e abertura total (100%) Os resultados obtidos foram os seguintes (ver Tabela A5-1 do Anexo 5).

- $Q_{30\% \text{ de abertura}} = 104,71 \text{ m}^3/\text{h}$
- $Q_{50\% \text{ de abertura}} = 125,26 \text{ m}^3/\text{h}$
- $Q_{100\% \text{ de abertura}} = 128,72 \text{ m}^3/\text{h}$

Estes resultados diferem ligeiramente (-4,7% – 17%) dos resultados obtidos da curva do conjunto bomba/instalação (figura 3.21) o que pode ser justificado pelas imprecisões nas medições realizadas pelo método volumétrico entre as quais, a precisão na medição dos níveis de água na câmara de entrada devido ao efeito da ondulação.

Atendendo ao facto de a câmara de entrada ter sido dimensionada para um tempo de retenção hidráulica de 10 min para o caudal de operação da ETA no ano horizonte ( $270 \text{ m}^3/\text{h}$ ) como caudais obtidos das medições, os tempos de retenção efectivos nas condições actuais de operação do sistema são os seguintes:

$$Q_{30\% \text{ de abertura}} = 104,71 \text{ m}^3/\text{h} \quad \rightarrow \quad V = 3,34 \times 3,5 \times 3,8 \text{ m}^3 \quad \rightarrow \quad t_r = 25,5 \text{ min}$$

$$Q_{50\% \text{ de abertura}} = 125,26 \text{ m}^3/\text{h} \quad \rightarrow \quad V = 3,34 \times 3,5 \times 3,8 \text{ m}^3 \quad \rightarrow \quad t_r = 21,3 \text{ min}$$

$$Q_{100\% \text{ de abertura}} = 128,72 \text{ m}^3/\text{h} \quad \rightarrow \quad V = 3,34 \times 3,5 \times 3,8 \text{ m}^3 \quad \rightarrow \quad t_r = 20,7 \text{ min}$$

### 4.3 Desempenho dos Pré-filtros

A avaliação do desempenho dos pré-filtros é feita em duas vertentes a saber:

- Desempenho hidráulico;
- Desempenho processual (coagulação/floculação).

Para a primeira análise são usados dados de medição de caudal afluyente à cada uma das unidades de pré-filtração com vista a determinar as taxas de filtração estabelecidas e compará-las com os critérios de dimensionamento. A medição do caudal afluyente à cada unidade, foi feita com recurso à descarregadores rectangulares de contracção lateral instalados no canal comum de entrada de água bruta às unidades de tratamento e com recurso à seguinte expressão:

$$Q = 1,838 \cdot (L - 0,2h) \cdot h^{3/2} \quad (18)$$

Com:

L – Largura do descarregador = 0,301 – 0,304 (m); e

h (m) – Altura da lâmina líquida por cima da crista do descarregador.

Os resultados obtidos foram posteriormente usados para determinar as taxas de filtração (razão entre caudal afluyente e área superficial das unidades) efectivamente estabelecidas em cada unidade. Os resultados são resumidos na tabela a seguir (ver Tabela A5-3 do Anexo 5).

**Tabela 4.2** Caudais afluyentes e taxas de filtração estabelecidas nos pré-filtros.

	Referência do pré-filtro	Caudal medido Q (m <sup>3</sup> /h)	Taxa de filtração v <sub>f</sub> (m/h)
<b>Linha de Produção 1</b>	D1	33,23	0,717
	D2	33,35	0,719

**Tabela 4.2** Caudais afluentes e taxas de filtração estabelecidas nos pré-filtros.

	<b>Referência do pré-filtro</b>	<b>Caudal medido Q (m<sup>3</sup>/h)</b>	<b>Taxa de filtração v<sub>f</sub> (m/h)</b>
<b>Linha de Produção 2</b>	D3	33,03	0,712
	D4	32,96	0,711

Conforme se depreende, os valores obtidos situam-se na gama dos valores recomendados em literatura para a operação deste tipo de unidades e também dos valores adoptados em sede de elaboração do projecto de execução.

Para a segunda análise, foram determinados os gradientes hidráulicos estabelecidos em cada unidade tendo em conta as características do material granular aplicado e as taxas de filtração estabelecidas com o fluxo ascendente.

Atendendo a que o gradiente hidráulico é função da resistência oferecida pelo material granular à passagem do líquido (perda de carga), e esta, por sua vez, é função das características do material filtrante designadamente a granulometria, porosidade e esfericidade, os valores adoptados para as duas últimas variáveis foram os seguintes:

- Porosidade  $\omega = 40\%$
- Esfericidade dos grãos  $s = 0,8$

Com base nas equações (10) e (8), foram obtidos os valores de gradiente hidráulico e o tempo de retenção resumidos nas tabelas a seguir, em função dos caudais que afluíam às unidades em função do grau de estrangulamento à saída da EB.

**Tabela 4.3** Gradiente hidráulico e tempo de retenção nos pré-filtro para abertura parcial da válvula à saída da EB.

Abertura da válvula e taxa de filtração $v_f$	Camadas do leito	Gradiente hidráulico $G$ ( $s^{-1}$ )	Tempo de retenção $t$ (min)	Gt
30% 0,56m/h	Fundo (d = 19,1mm)	16	26	24 960
	Intermédio (d = 12,7mm)	24	17	24 480
	Topo (d = 9,5mm)	33	17	33 660
50% 0,68m/h	Fundo (d = 19,1mm)	20	21	25 200
	Intermédio (d = 12,7mm)	30	14	25 200
	Topo (d = 9,5mm)	40	14	33 600
100% 0,69m/h	Fundo (d = 19,1mm)	20	21	25 200
	Intermédio (d = 12,7mm)	30	14	25 200
	Topo (d = 9,5mm)	40	14	33 600

$$V_f\text{-30\% de abertura} = 0,56\text{m/h} \rightarrow G_{\text{total}} = 73s^{-1} \rightarrow T_{r\text{-total}} = 60\text{min} \rightarrow Gt_{\text{total}} = 83\ 100$$

$$V_f\text{-50\% de abertura} = 0,68\text{m/h} \rightarrow G_{\text{total}} = 90s^{-1} \rightarrow T_{r\text{-total}} = 49\text{min} \rightarrow Gt_{\text{total}} = 84\ 000$$

$$V_f\text{-100\% de abertura} = 0,69\text{m/h} \rightarrow G_{\text{total}} = 90s^{-1} \rightarrow T_{r\text{-total}} = 49\text{min} \rightarrow Gt_{\text{total}} = 84\ 000$$

**Tabela 4.4** Gradiente hidráulico e tempo de retenção nos pré-filtro para abertura total da válvula à saída da EB.

Compartimento do pré-filtro e taxa de filtração $v_f$	Camadas do leito	Gradiente hidráulico $G$ ( $s^{-1}$ )	Tempo de retenção $t$ (min)	Gt
D1 0,717m/h	Fundo (d = 19,1mm)	21	20	25 200
	Intermédio (d = 12,7mm)	31	13	24 180
	Topo (d = 9,5mm)	42	13	32 760

**Tabela 4.4** Gradiente hidráulico e tempo de retenção nos pré-filtro para abertura total da válvula à saída da EB.

Compartimento do pré-filtro e taxa de filtração $v_f$	Camadas do leito	Gradiente hidráulico $G$ ( $s^{-1}$ )	Tempo de retenção $t$ (min)	$Gt$
D2 0,719m/h	Fundo (d = 19,1mm)	21	20	25 200
	Intermédio (d = 12,7mm)	31	13	24 180
	Topo (d = 9,5mm)	42	13	32 760
D3 0,712m/h	Fundo (d = 19,1mm)	21	20	25 200
	Intermédio (d = 12,7mm)	31	13	24 180
	Topo (d = 9,5mm)	41	13	31 980
D4 0,711m/h	Fundo (d = 19,1mm)	21	20	25 200
	Intermédio (d = 12,7mm)	31	14	26 040
	Topo (d = 9,5mm)	41	14	34 440

$$v_{f-D1} = 0,717\text{m/h} \rightarrow G_{\text{total}} = 94\text{s}^{-1} \rightarrow T_{r\text{-total}} = 46\text{min} \rightarrow Gt_{\text{total}} = 82\ 140$$

$$v_{f-D2} = 0,719\text{m/h} \rightarrow G_{\text{total}} = 94\text{s}^{-1} \rightarrow T_{r\text{-total}} = 46\text{min} \rightarrow Gt_{\text{total}} = 82\ 140$$

$$v_{f-D3} = 0,712\text{m/h} \rightarrow G_{\text{total}} = 93\text{s}^{-1} \rightarrow T_{r\text{-total}} = 46\text{min} \rightarrow Gt_{\text{total}} = 81\ 360$$

$$v_{f-D4} = 0,711\text{m/h} \rightarrow G_{\text{total}} = 93\text{s}^{-1} \rightarrow T_{r\text{-total}} = 48\text{min} \rightarrow Gt_{\text{total}} = 85\ 680$$

#### 4.4 Desempenho das Unidades de Filtração Lenta

O desempenho das unidades de filtração lenta foi avaliado somente para as variáveis hidráulicas (taxa de filtração e resistência do filtro) com posterior comparação com os dados de projecto e os critérios de dimensionamento encontrados em literatura.

Os dados usados para o cálculo foram os seguintes:

- $Q_{30\%}$  de abertura = 104,71m<sup>3</sup>/h;
- $Q_{50\%}$  de abertura = 125,26m<sup>3</sup>/h;
- $Q_{100\%}$  de abertura = 128,72m<sup>3</sup>/h

- $d_{\text{eff}} = 0,25\text{mm}$ ;
- Esfericidade dos grãos  $s = 0,7$ ;
- Porosidade  $p = \omega = 47\%$ .

**Tabela 4.5** Taxa de filtração e resistência inicial no filtro lento.

Parâmetro	Fórmula	Abertura da válvula e taxa de filtração	Valor
Nº de Reynolds	$R_e = \frac{1}{p_0} \cdot \frac{v_f \cdot d}{v} < 5$	30%; 0,22m/h	0,03
		50%; 0,26m/h	0,04
		100%; 0,27m/h	0,04
Resistência inicial do filtro	$H_0 = 180 \cdot \frac{v}{g} \cdot \frac{(1 - p_0)^2}{p_0^3} \cdot \frac{v_f}{d^2} \cdot L_f$	30%; 0,22m/h	0,044m
		50%; 0,26m/h	0,052m
		100%; 0,27m/h	0,054m

Tratando-se de filtros lentos, a resistência máxima admissível foi inferida de forma teórica a partir das características das unidades (altura do leito, altura da camada sobrenadante) uma não ter sido possível fazer o cálculo a partir de registos de medições directas da pressão da água no leito (com piezómetros). Na figura abaixo é ilustrado o modelo gráfico adoptado para a referida determinação donde se conclui que com a construção existente a resistência máxima é da ordem dos 1,2m.

Em termos de limpeza, após o leito filtrante estar completamente colmatado, procede-se à raspagem de camadas e posterior *resanding* (a retrolavagem não é aplicada).

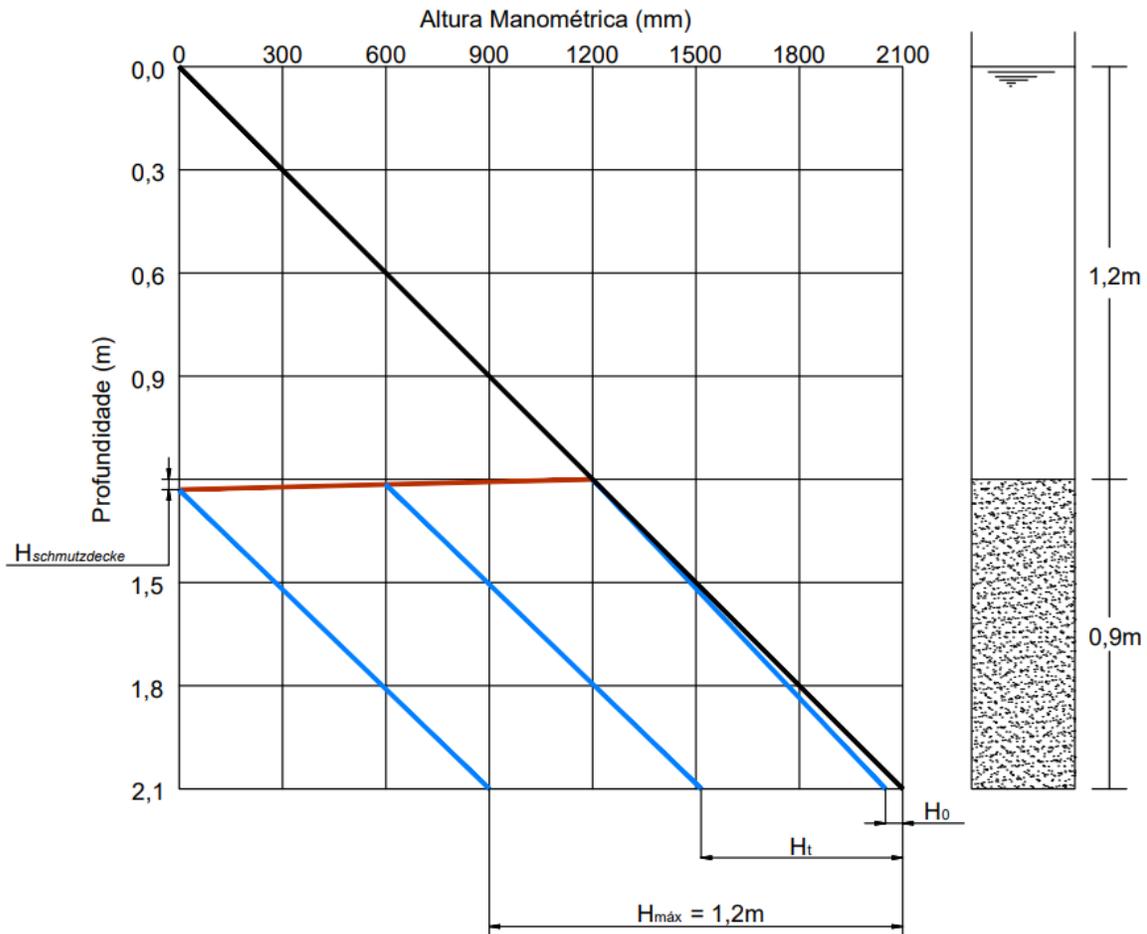


Figura 4.4 Distribuição de pressões no leito do filtro lento.

#### 4.5 Qualidade da Água e Eficiência de Remoção

Os dados relativos aos parâmetros da qualidade de água foram obtidos de relatórios operacionais fornecidos pelo operador do sistema e que são resumidos nos Anexos 2 a 5 deste relatório. Os parâmetros de análise foram os seguintes:

- Sólidos totais dissolvidos medidos ao nível da câmara de entrada;
- Turvação e pH medidos na entrada e saída da ETA (período de serviço);
- Cloro residual medido a jusante dos filtros lentos;
- Dureza total medida, a jusante dos filtros lentos.

Com base nos mesmos foram determinadas as eficiências parciais das unidades de tratamento e a eficiência global na ETA com recursos á seguinte expressão

$$\text{Eficiência de remoção} = \frac{\text{turvação}_{\text{inicial}} - \text{turvação}_{\text{final}}}{\text{turvação}_{\text{inicial}}} \cdot 100 \quad (19)$$

No que concerne à eficiência parcial, esta foi obtida, obedecendo à ordem cronológica dos dados de medição da turvação no período de arranque (ver Anexo 4), tendo resultado nos seguintes valores:

- Linha de Produção D1 e D2 (para os pré-filtros) → 66,8 e 57%
- Linha de Produção D3 e D4 (para os pré-filtros) → 57,7 e 58%
- Linha de Produção D1 e D2 (para os filtros lentos) → -6,2; 43,4 e 14,1%
- Linha de Produção D3 e D4 (para os filtros lentos) → -2,2; 15,5 e 78,1%

De referir que ainda no período de arranque, parte das medições de turvação foram incoerentes (ver Tabela A5-3 do Anexo 5) a saber:

- A turvação de 15,6NTU na câmara de entrada é diferente de todas turvações afluentes a cada compartimento dos pré-filtros);
- A turvação de 15,0NTU no filtro lento é diferente de todas turvações efluentes de todos compartimentos dos pré-filtros, que vão de 6,25 a 7,36NTU).

Assim sendo, foram tomadas como representativas as medições de turvação inicial e final ao nível dos compartimentos (pré-filtros e filtros lentos) tendo-se obtido os seguintes valores de eficiência:

- Compartimento D1 (para os pré-filtros) → 57,7%
- Compartimento D2 (para os pré-filtros) → 54,9%
- Compartimento D3 (para os pré-filtros) → 58,6%
- Compartimento D4 (para os pré-filtros) → 57,3%

Quanto à eficiência global, seguiu-se a mesma metodologia isto é comparar os valores à entrada da ETA (câmara de entrada) e no efluente dos filtros lentos obedecendo também a ordem cronológica dos dados. Os resultados são ilustrados na forma de gráficos de barras nas figuras a seguir. (ver Anexo 6).

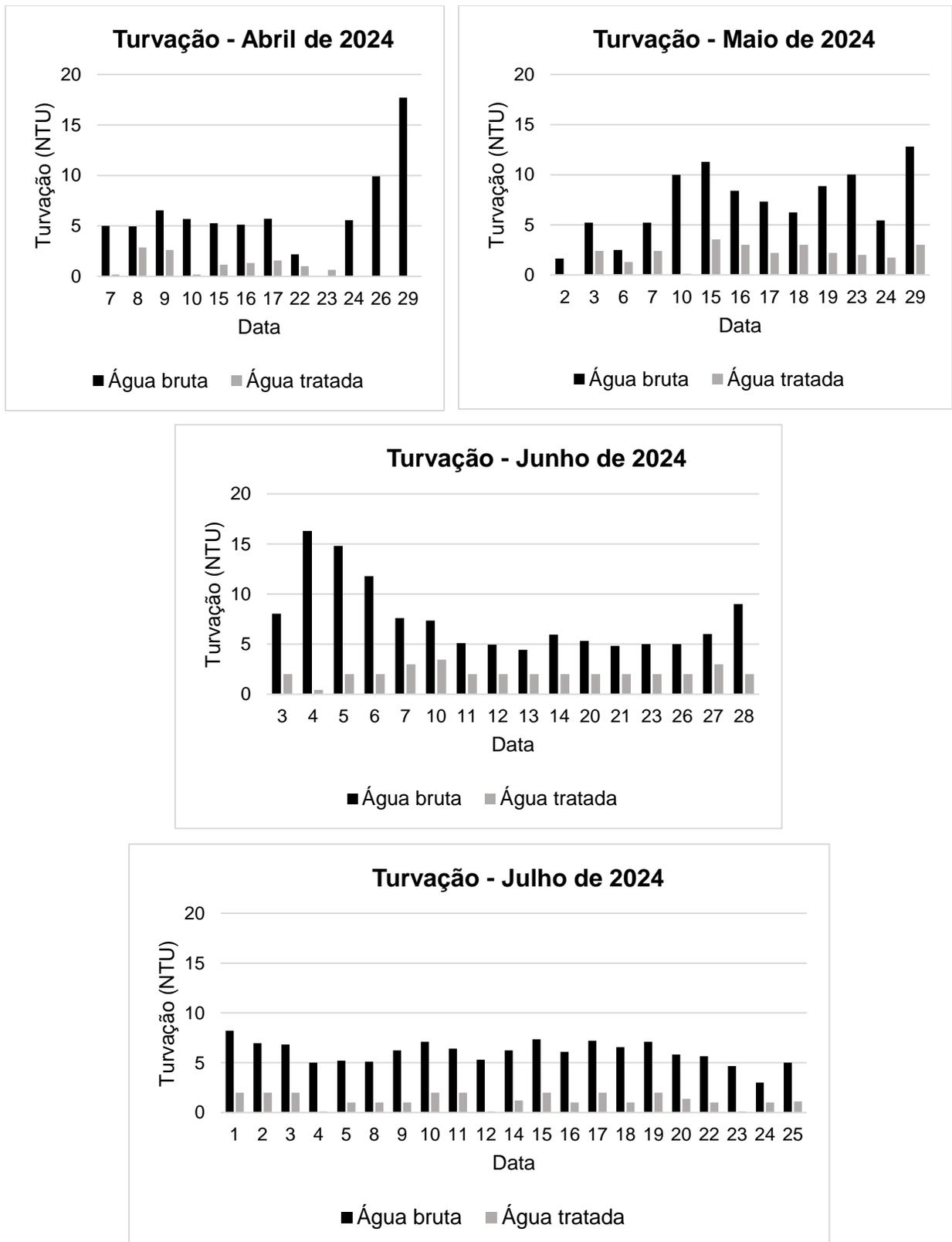


Figura 4.5 Turvações da água bruta e água filtrada.

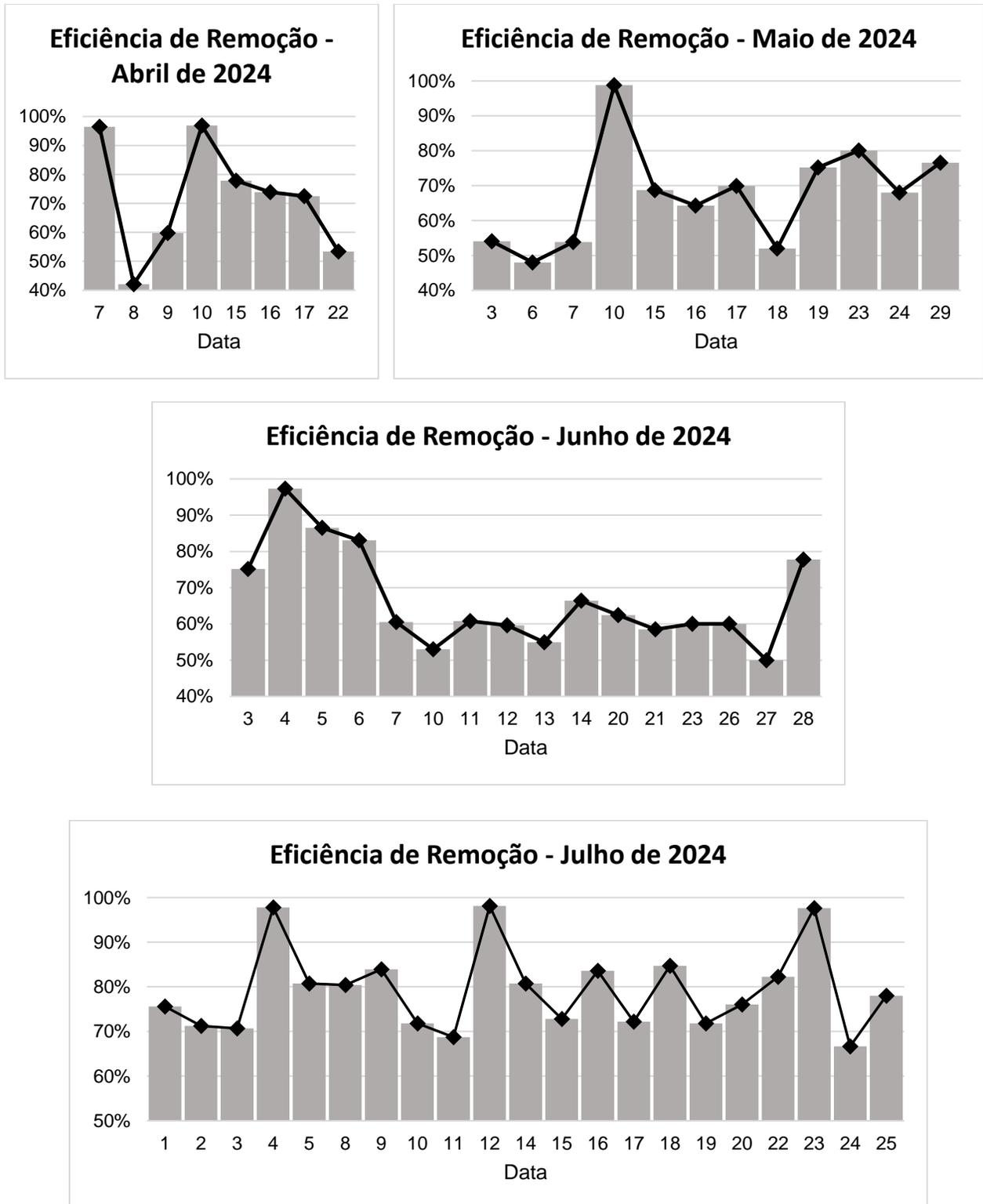


Figura 4.6 Eficiência global de remoção de turvação.

## 5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 5.1 Desempenho Hidráulico

#### 5.1.1 Caudais de produção

De acordo com os resultados analíticos e as medições efetuadas para determinar o caudal, a produção actual do sistema está situada entre 80 – 135 m<sup>3</sup>/h, o que corresponde à aproximadamente 29,6 – 50,0% do caudal de dimensionamento do sistema no ano horizonte. Como a ETA foi construída com 2 dos 3 módulos de produção, o caudal de produção deveria ser de 180 m<sup>3</sup>/h o que significa que a produção actual está entre 61,1% e 64% do ideal. Além disso, constatou-se que o VSD adoptado de 84% não é adequado, visto que o seu caudal debitado é menor que o da demanda actual (105,5m<sup>3</sup>/h).

A solução operacional adoptada de estrangulamento da válvula de saída da EE não se traduziu em variações significativas do caudal aduzido (variação observada é de menos de 20%) o que provavelmente se deve ao facto de a adutora correspondente ser de diâmetro que conduz à velocidades baixas na adutora (< 0.6 m/s) e como tal, a perda de carga induzida pelo estrangulamento ser baixa. Da análise dos resultados das medições de caudal afluente às unidades de pré-filtração constata-se por outro lado que o caudal total inferido é de 132,6m<sup>3</sup>/h (resultante da soma dos caudais filtrados pelos quatro compartimentos dos pré-filtros), valor que supera os caudais obtidos de forma analítica e os resultantes de medições pelo método volumétrico na câmara de entrada. Para além de factores já apontados relacionados com imprecisões nas medições, esta variação é atribuída à contribuição dos caudais provenientes da cisterna de águas de purga/lavagem na estação de tratamento que tem instalada uma electrobomba de débito nominal 50 m<sup>3</sup>/h operada de forma intermitente.

Atendendo a estes resultados, recomenda-se que a regulação dos grupos para um VSD de 84% seja revista para 90%. Atendendo por outro lado que a combinação das bombas em paralelo, cenário operacional definido para o horizonte de projecto, não conduz ao alcance dos caudais pretendidos (270 m<sup>3</sup>/h), ao invés da terceira bomba ficar de reserva, esta passa a aduzir a água em paralelo com as duas, nas mesmas condições do VSD ideal. Além disso, a terceira bomba deve possuir uma curva característica superior as outras bombas,

tal que se assegure o caudal pretendido de 270 m<sup>3</sup>/h ou maior que este (em situações de emergência do ano horizonte).

### **5.1.2 Taxas de filtração efectivas nos pré-filtros e filtros lentos**

De acordo com a literatura (Smet et al., 1990), para a operação de pré-filtros, o intervalo óptimo de taxas de filtração é de 0,5 – 1,0m/h. Os resultados de verificação das taxas de filtração efectivamente estabelecidas nestas unidades sugerem que as mesmas estiveram no intervalo 0,55 – 0,8m/h, portanto, em conformidade com os intervalos estabelecidos em sede de elaboração do projecto (0,3m/h – 1,0m/h) e na literatura. Conclui-se assim, desta análise, que os pressupostos assumidos em sede de elaboração do projecto e durante esta fase inicial de exploração do sistema as taxas de filtração alcançadas estiveram dentro dos intervalos recomendados para o bom desempenho das unidades.

Já com relação aos filtros lentos, as taxas de filtração obtidas foram comparadas de acordo com os intervalos teóricos, a saber:

- Para Abdiyev et al (2023): 0,08 – 0,4m/h, para concentrações de partículas sólidas no afluente inferior ou igual a 25 mg/L;
- Para Abdiyev et al (2023): 0,1 – 0,2m/h, para concentrações de partículas sólidas no afluente superior a 25 mg/L;
- Para Mishra & van Breemen (1987): 0,1 – 0,4m/h.

Atendendo aos dados de caracterização da água bruta afluente aos filtros lentos (turvação afluente > 5 NTU) os intervalos recomendados por Abdiyev et al, 2023 são os mais recomendados para a operação dos filtros lentos na ETA de Murrupula. Os resultados obtidos da verificação das taxas de filtração nestas unidades indicam valores de 0,22 a 0,27m/h, valores próximos dos adoptadas em sede de elaboração do projecto (0,3m/h), mas que estão em conformidade com os intervalos recomendados quer por Mishra & van Breemen (1987) e por Abdiyev et al, 2023 e também dos recomendados em literatura da especialidade. De realçar que esta avaliação não toma em consideração a concentração de partículas sólidas no afluente (baseia-se nos dados de turvação) dado que não foi possível obter registos de medição desta variável à entrada dos filtros lentos, pois, o único registo de dados nesta categoria foi realizado ao nível da câmara de entrada.

## 5.2 Desempenho Processual

### 5.2.1 Dosagem de coagulação e grau de mistura

A concentração das soluções de sulfato de alumínio aplicadas durante o funcionamento normal da ETA foi constante e igual a 16,7g/l. Esta é uma dosagem empírica pois não resultou de ensaios de *Jar-Test* mas sim da adoção de uma dosagem de 15 a 20g/l conforme é recomendado na literatura. Esta é uma abordagem conservadora uma vez que a dosagem ideal de coagulante é função das características de turvação (e outras variáveis como a alcalinidade e o pH) do afluente às unidades de coagulação. Teoricamente, quanto mais altos são os níveis de turvação afluente, maiores são as necessidades de coagulante. E em casos de turvações muito baixas a aplicação deste é dispensável.

Os registos fornecidos pelo operador indicam ter havido momentos em que se registou escassez de água (por conta do nível baixo da água na albufeira) que levaram à extração de água bruta misturada com sedimentos depositados no fundo da represa), durante os quais foi empregue uma dosagem de 14g/l. Atendendo ao facto de que quanto maior a turvação, maior é a dosagem de coagulante necessária, esta abordagem pode ter contribuído para alguma ineficácia da coagulação e, por inferência, da eficácia dos processos subsequentes na remoção de turvação.

### 5.2.2 Pré-filtro como floculador hidráulico

A análise dos resultados constantes nas tabelas 4.3 e 4.4, mostra que para os caudais e taxas de filtração estabelecidas ao nível dos pré-filtros, os gradientes hidráulicos obtidos situaram-se à volta dos  $90s^{-1}$  com valores parciais variando entre 16 a  $42s^{-1}$  de acordo com a distribuição granulométrica das camadas que compõem o leito filtrante (os valores mais baixos correspondem à fracção de maior granulometria). Comparando estes valores com os recomendados em teoria ( $20 - 70s^{-1}$  segundo Mishra & Breemen, 1987), conclui-se os valores de gradiente hidráulico foram ligeiramente superiores ao limite superior acima mencionado o que sugere algum potencial para quebra dos flocos e conseqüente transferência para as unidades subsequentes de tratamento. Outros autores como por exemplo Degrémont (1991) sugerem valores de referência superiores a  $100s^{-1}$  ( $80-120s^{-1}$ ) que são, no entanto, informados por estudos de floculação por agitação mecânica e não em meio granular.

No que concerne ao tempo de retenção, observa-se a partir dos resultados que todos valores obtidos para a camada intermédia e do topo estiveram abaixo dos mínimos teóricos (20–30min), mas que em termos globais o tempo de retenção para a floculação oscilou entre os 40 – 50 min. Quanto ao produto do gradiente pelo tempo de retenção (número de Camp) que traduz a eficácia dos processos de floculação, os valores obtidos estiveram dentro dos intervalos recomendados em literatura (20 000 – 150 000).

Logo, recomenda-se a redução da espessura até da camada de inerte mais grossa, tendo como intervalo mínimo teórico de 0,3m (a espessura actual da camada é de 0,6m), para providenciar tempos de retenção globais e gradientes hidráulicos globais próximos dos valores teóricos recomendados por Mishra & Breemen (1987), e por consequência valores adequados do produto do gradiente pelo tempo, garantindo melhoria na floculação hidráulica.

Do ponto de vista de remoção de partículas, os dados disponíveis sugerem terem-se alcançado eficiências de remoção da ordem dos 55 – 57,8% em todas unidades de pré-filtração valores que se situam abaixo das eficiências reportadas em literatura. Ao nível destas unidades, a remoção de turvação foi em grande medida garantida pela sedimentação na camada do leito filtrante com a granulometria mais grossa e próxima da purga/descarga.

### **5.2.3 Desempenho da filtração lenta**

Do ponto de vista puramente hidráulico, com base nos resultados da tabela 3.6, conclui-se que as condições ideais de funcionamento destas unidades (escoamento laminar, traduzido pelo  $n^{\circ}$  de Reynolds  $< 5$ ) foram estabelecidas em todos os ciclos de operação destas unidades. Quanto ao processo de colmatação, que é consequência imediata da retenção de partículas no leito filtrante, não foi possível inferir, ao longo deste estudo a evolução da resistência do filtro ao longo do tempo dada a falta de dispositivos/condições instaladas para a leituras de pressão. Deste modo, não foi possível inferir sobre irregularidades no funcionamento dos filtros lentos e a estimativa da necessidade de limpeza dos mesmos. O único indicativo de avaliação do grau de colmatação do leito (resistência máxima) foi o monitoramento (por observação) do alcance da altura máxima de dimensionamento da camada supernatante (1,2m) que, do ponto de vista operacional não pode ser excedida,

para evitar o galgamento dos filtros. De acordo com informação fornecida pelo operador dos sistema, no primeiro mês de operação das unidades (fase de arranque), foram reportadas pelo menos duas ocasiões de galgamento dos filtros lentos da segunda linha de produção que foram atribuídos à deficiências operacionais (regulação incorrecta das válvulas de saída dos filtros que conduziram à uma partição desigual dos caudais pelas linhas de produção) e não propriamente à colmatação do leito filtrante. Mesmo assim os filtros foram submetidos à um processo de limpeza.

Do ponto de vista de remoção de turvação, constatou-se que a turvação efluente esteve no geral abaixo dos 5NTU nas duas linhas de produção, mas que em determinados dias, a linha de produção 1 (D1 e D2) das linhas de produção, na altura como a menos colmatada, apresentou efluentes com turvações maiores que a da linha parcialmente entupida (ver Tabela A4-1 do Anexo 4). Porém, nos 4 meses subsequentes ao mês que apresentou estas anomalias, os valores de turvação à saída dos filtros lentos estiveram sempre dentro dos padrões estabelecidos.

#### **5.2.4 Eficiência de remoção**

Ao nível dos pré-filtros, as taxas de remoção de turvação situaram-se, em média, em torno dos 55,0 – 57,8%, em grande medida garantidas pela sedimentação na fracção de camada mais grossa do leito filtrante, próxima da purga/descarga. Parte das partículas coloidais que possuem dimensões intermédias a das camadas acabam preenchendo os vazios de cada camada, as interfaces entre as mesmas e as bordas do leito.

Já com relação aos filtros lentos, as taxas de remoção de turvação estiveram no geral em torno dos 6,2 – 78,1%, que, embora baixas quando comparado com as expectativas garantiram no geral efluentes com qualidade aceitável (Turvação  $\leq$  5NTU) em quase todo o período de análise.

No que diz respeito à eficiência global da ETA, foi tomado como representativo o período de serviço (ver Anexo 6), tendo resultados entre 42 – 98%. Foi constatado que a eficiência de remoção foi maior que 80% somente em dois dias dos meses de Abril e Maio (ver figura 4.6). Logo depois dos tais dias, a eficiências caiu bruscamente por razões desconhecidas. Além disso, em Junho e Julho foram 3 a 5 dias com eficiência maior que 80%, e da mesma

forma esta eficiência reduziu. O ideal seria que a eficiência reduzisse gradualmente ao longo do tempo, até atingir um valor considerado satisfatório, para que de imediato, se procedesse a limpeza das unidades da ETA, e logo após esta, se obtivesse novamente bons resultados de remoção de partículas.

Em suma, a qualidade da água tratada mostrou-se variável e nalguns casos fora dos limites admissíveis no período de arranque do sistema, muito provavelmente devido ao facto de os processos unitários estarem em período de maturação (filtros lentos) e, possivelmente, taxas de filtração ou caudais que divergem dos valores estabelecidos em projecto. Para além disso, é importante levar em conta que o tempo de análise coincidiu como o período chuvoso de 2023 (Outubro de 2023 a Março de 2024) e por conseguinte, níveis de turvação elevados na represa de captação.



**Figura 5.1** Qualidade de água – água bruta, água pré-filtrada e água filtrada após primeiro enchimento.

## **5.3 Procedimentos Operacionais**

### **5.3.1 Limpeza/purga dos pré-filtros**

A restauração da eficiência dos pré-filtros é feita por operações de purga gravítica dos mesmos à uma taxa de descarga de 4m/h conforme definido em projecto. Segundo o projecto, observou-se que o processo de lavagem (purga) precisa ser escalonado (os mesmos deverão ser lavados um de cada vez para evitar o transbordo das câmaras de purga) e que tal operação deve ser devidamente registada de modo a constar do manual de operação providenciado ao operador.



**Figura 5.2** Esvaziamento dos pré-filtros e limpeza por retrolavagem.



**Figura 5.3** Limpeza dos pré-filtros – descarga de água de purgas.

### **5.3.2 Maturação dos filtros lentos**

De forma geral, um bom indicativo de funcionamento do filtro lento é a formação do *schmutzdecke* na superfície do leito filtrante e a sua maturação. No que diz respeito a maturação dos filtros lentos, por falta de medições de parâmetros que permitiriam esta avaliação (OD no supernatante e do filtrado, concentrações de amónia etc), não há como avaliar este fenómeno.

Quanto a aeração dos filtros lentos, a teoria sustenta recirculação da água a fim de obter sempre condições aeróbicas (Huisman & Wood, 1974). Sabendo que a ETA opera por gravidade, este fenómeno de aeração teria o sentido inverso de escoamento, resultando em instalação de pequenas bombas para o efeito e as respectivas condutas. Porém, em

termos construtivos, o circuito de recirculação da água não foi concebido, implicando que toda água de purga não chega a ser reaproveitada, o que representa um desperdício. Além disso, detalhes técnicos relativos a aeração, não foram encontrados no projecto. Logo, em termos de viabilidade económica, pode-se aferir que custo de execução do circuito de recirculação da água supera as perdas de água na descarga.

### 5.3.3 Limpeza dos filtros lentos

No caso dos filtros lentos, para a sua restauração procede-se a remoção da camada de areia mais acima de forma gradual para não danificar o leito filtrante precedida da verificação do possível *schmutzdecke* formado no topo da camada. Dado que não houve como aferir ao longo do tempo o processo de colmatção do leito filtrante, o indicativo da evolução da resistência do leito filtrante foi o alcance da altura máxima do supernatante que não podia superar 1,2m.

No que diz respeito a frequência e execução de limpeza dos filtros lentos, não foram obtidos registos destas operações. Foi constatado por outro lado que durante o período de análise o valor de turvação da água bruta esteve sempre abaixo de 20 NTU, o que, de acordo com Pescod OBE (s/d), pressupões intervalos de limpeza de 2-3 meses de operação. Ainda assim, não há forma de proceder ao ajuste das operações futuras de limpeza, por conta do défice de registos.



**Figura 5.4** Esvaziamento dos filtros lentos e remoção da lama do topo da areia fina importada.

## 6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

### 6.1 Conclusões

Tendo como base os resultados discutidos acima, tanto sobre os parâmetros físico-químicos como para as variáveis de dimensionamento, as conclusões principais deste estudo são as seguintes:

- Os caudais medidos somente a entrada da ETA, embora satisfaçam a demanda actual, não permitem concluir se estes são exactamente os mesmos na saída da ETA, pois, pode haver recirculação de águas de purgas durante a operação. Da mesma forma, medir os STD's somente a entrada da ETA e a dureza apenas na saída é indiferente, pois, não tem como aferir a remoção de sólidos ou transição de água dura para mole. Entretanto, no período de serviço, a turvação e o pH foram medidos tanto na entrada como na saída da ETA, juntos do cloro residual a saída, o que conferiu maior confiança nestes últimos parâmetros, tanto no período de arranque como no período de serviço;
- As taxas de filtração obtidas estiveram dentro dos intervalos das taxas de dimensionamento do projecto, tanto para pré-filtração como para filtração lenta, indicando um bom fluxo de água pelos meios porosos das unidades. Todavia, para o pré-filtro como floculador hidráulico, os valores globais de gradiente hidráulico e tempo de retenção estiveram acima dos intervalos teóricos recomendados, ainda que somente o produto do gradiente pelo tempo obedeça a literatura.
- As taxas de aplicação do coagulante não foram precisas, pois, a sua aplicação foi empírica, isto é, optou-se em aplicar *alum* na água bruta com turvações relativamente altas (e cloro, se necessário), e não colocar nada se esta água tiver baixa turvação;
- No período de arranque, de forma particular (ao nível de cada unidade), os pré-filtros e filtros lentos não apresentaram o funcionamento requerido, pois houve grande colmatção e arrastamento de partículas deduzido mediante as turvações;
- As limitações observadas nos processos unitários estão em grande parte na coagulação e na filtração, pois, para este primeiro processo, a não-empregabilidade de dosagens óptimas de coagulação (em função da turvação e SS) implicou a aplicação de alum em dosagens fixas (ex: aplicação de 16,7g/l para 20 – 60NTU e não aplicação para turvação < 20NTU). Para o outro processo unitário, a filtração lenta carece da avaliação analítica

de obstrução dos poros ao longo do tempo, e assim sendo, nem medições directas com piezómetros foram executadas. Além disso, a falta de mecanismos de recirculação de água para um novo tratamento da mesma pode implicar redução do caudal efluente a ETA devido a perdas na descarga.

Em suma, a qualidade de água teve um melhoramento significativo durante o tempo de serviço, pois os níveis de turvação, STD's, dureza total e cloro total residual respeitaram os limites admissíveis. Todavia, para poder aferir na plenitude a qualidade de água, seria necessário avaliar também a presença de coliformes.

## 6.2 Recomendações

As recomendações deste estudo são inerentes aos procedimentos e rotinas necessárias para melhorar o desempenho da ETA e compreendem o seguinte:

- Regulação dos grupos de electrobombas para VSD de 90% e instalação da terceira bomba tendo maior capacidade de carga (em altura e caudal);
- Comunicação entre os operários da ETA e os da estação de captação, no âmbito da água armazenada na albufeira e suas condições de uso (ex: limpeza de sedimentos no fundo da albufeira para reduzir níveis de turvação que sobrecarreguem a ETA);
- Redução da espessura da camada mais grossa do URFL até 0,3m no máximo;
- Monitoramento contínuo e diário dos parâmetros de qualidade de água em três pontos: câmara de saída, a jusante dos pré-filtros e a jusante dos filtros lentos;
- Operação da ETA com caudal constante para evitar oscilações de taxas de filtração;
- Instalação de contador de água para medição certa do caudal afluente (na entrada e saída da ETA);
- Uso do equipamento *Jar-Test* e registo das dosagens adequadas para caudais e turvações tanto do tempo chuvoso como do tempo de estiagem;
- Abertura contínua da válvula afluente ao SSF para compensar a obstrução dos poros;
- Registo de actividades de processo de limpeza e restauração dos pré-filtros e filtros lentos, a fim de avaliar de imediato a eficiência das unidades logo após a limpeza (que se espera que seja a máxima possível);
- Monitoramento da formação do *schmutzdecke* antes da limpeza a rigor dos filtros lentos.

## 7. BIBLIOGRAFIA

### 7.1 Referências Bibliográficas

- [1] Abdiyev, K., Azat, S., Kuldeyev, E., Ybyraiymkul, D., Kabdrakhmanova, S., Berndtsson, R., Khalkhabai, B., Kabdrakhmanova, A., Sultakhan, S. (2023). Review of Slow Sand Filtration for Raw Water Treatment with Potential Application in Less-Developed Countries. Satbayev University, Cazaquistão. <https://doi.org/10.3390/w15112007>
- [2] Babenkov, E. D. (1982). The Role of Structure Formation in the Process of Filtration Clarification of Water, *Khimiya i Tekhnologiya Vody*, 4, 1. 35-39.
- [3] Degrémont (1991). *Water Treatment Handbook*, 6ª Edição, Lavoisier Publishing, Paris, France.
- [4] Di Bernardo, L. & Dantas, A. D. (2005). *Métodos e Técnicas de Tratamento de Água*, 2ª Edição, Vol I, RiMa Editora, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Brasil.
- [5] Di Bernardo, L. & Sabogal Paz, L. P. (2010). *Seleção de tecnologias de tratamento de água*. São Carlos: LDiBe.
- [6] Drinan, J. E. & Spellman, F. R. (2013). *Water and Wastewater Treatment*, 2ª Edição, CRC Press, Estados Unidos da América, pp 49-118.
- [7] Hipólito, J. R. & Vaz, Á. C. (2017). *Hidrologia e Recursos Hídricos*. 3ª Edição, IST Press.
- [8] Huisman, L. (2004). *Sedimentation and flotation*, *Sanitary Engineering Department*, Delft University of Technology, Holanda.
- [9] Huisman, L. (2004). *Slow Sand Filtration*, *Sanitary Engineering Department*, Delft University of Technology, Holanda.
- [10] Huisman, L. & Wood, W. E. (1974). *Slow Sand Filtration*, World Health Organization (ISBN 92 4 154037 0), Suíça.
- [11] Krenkel, P.A. & Novotny, V. (1980). *Water Quality Management*, Academic Press Inc, Nova Iorque.

[12] Lakatos, M. & Marconi, A. (2001). Fundamentos metodologia científica, 4ª Edição, São Paulo: Atlas.

[13] LeChevallier, M. W. & Au, K. (2004). Water Treatment and Pathogen Control: Process Efficiency in Achieving Safe Drinking Water, *World Health Organization*.

[14] Matsinhe, N. P. (2008). Challenges and Opportunities for Safe Water Supply in Mozambique, Water Resources Engineering, Lund University, Suécia.

[15] Mishra, K. K. & van Breemen, A. N. (1987). Gravel-bed flocculation, *Communication on the Sanitary Engineering & Water Management*, Faculty of Civil Engineering, TU Delft (ISSN-01691-6246), Holanda.

[16] Paniagua, C. E. (2020). Tratamento de Água de Abastecimento e Águas Residuárias, Editora Atena (ISBN 978-65-5706-631-7), Ponta Grossa, Brasil, p73, DOI 10.22533/at.ed.317202511.

[17] Paramasivam, H. (1989). Slow Sand Filtration – Phase IV, Final Report, *National Environment Engineering Research Institute*, Índia.

[18] Pescod OBE, M. B. (s/d). Slow Sand Filtration: A low cost Treatment for Water Supplies in Developing Countries, *World Health Organization's Regional Office for Europe by the Water Research Centre*, Reino Unido.

[19] Public Health Engineering Equipment Sectional Committee (1990, Outubro). General Requirements for Slow Sand Filters – Part 2 Design, Construction, Operation and Maintenance; Bureau of *Indian Standards*, Nova Deli.

[20] Quiroga, E. (1988). Estudio preliminar sobre pretratamientos, Reporte final, *Area de Abastecimiento y Remoción de Aguas*, Universidad del Valle, Cali, Colombia, Univalle/CIR.

[21] Shammas, N. K. (2005). Handbook of Environmental Engineering: Physicochemical Treatment Process, The Human Press Inc., Nova Jérсия, Estados Unidos da América.

[22] Smethurst, G. (1979). Basic Water Treatment for application world-wide, Thomas Telford Ltd, Londres.

[23] Smet, J. E. M., Visscher, J. T., Castilla, A., Engels, C., Galvis, G., Huisman, L., Ives, K. J., Mbwette, T. S. A., Pardón, M., Poggenburg, W., Quiroga, E., Rajapakse, J. P., Wegelin, M., Wheeler, D., & Wolters, H. (1990, Julho). Pre-treatments Methods for Community Water Supply: An overview of techniques and present experience, *IRC International Water and Sanitation Centre*, 2ª Edição, Holanda.

[24] Wegelin, M. (1992). Surface Water Treatment by Roughing Filters with special emphasis on horizontal-flow roughing filtration, *International Reference Centre for Waste Disposal (IRCWD)* (p24), Suíça.

## 7.2 Outra Bibliografia Consultada

[25] Campos, J., Reali, M., Daniel, L. (2005). Conceitos Gerais sobre Técnicas de Tratamento de Águas de Abastecimento, Esgotos Sanitários e Desinfecção, *Departamento de Hidráulica e Saneamento*, Escola de Engenharia de São Carlos, São Paulo.

[26] Dastanaie, J. (2007). Use of horizontal roughing filtration in drinking water treatment. *Int. J. Sci. Technol.*, 4(3): 379-382.

[27] Guimarães, Carvalho e Silva (2007). Saneamento Básico – IT 179.

[28] Libânio, M. (2010). *Fundamentos de qualidade e tratamento de água*. Campinas: Átomo.

[29] Luff, R. (2000). Instruction manual for Water Filtration Equipment – Covering roughing and slow sand filtration, *Oxfam Water Supply Scheme for Emergencies*, Londres.

[30] Ministério da Saúde: Brasília (2006). *Boas práticas no abastecimento de água: procedimentos para a minimização de riscos à saúde* (pp 61-62), Secretaria de Vigilância em Saúde, Brasil.

[31] MISAU (2004). *Regulamento sobre a Qualidade de Água para o Consumo Humano*; Boletim da República de Moçambique, I Série, Nr. 37, Diploma Ministerial n.º 180/2004 de 15 de Setembro, Maputo, Moçambique.

[32] Pereira, G. L., Da Silva G. A., Libânio, M. (2018). Proposição de sistema de indicadores de desempenho operacional de estações de tratamento de água à luz do prestador de serviço: aplicação a cinco estações de ciclo completo. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 23, n. 6, pp 1163-1172.

[33] Nkontwa, O., Olufayo, O., Ochieng, G., Ademayo, J., Otieno, F. (2010). Turbidity Removal: Gravel and Charcoal as Roughing Filtration Media. *South African Journal of Science*, 106(11/12), Art. #196, 5 pages. <https://doi.org/10.4102/sajs.v106i11/12.196>.

[34] Silva, P. A G. & Moruzzi, R. B. (2017). Reversibility of al-kaolin and al-humic aggregates monitored by stable diameter and size distribution. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, n. 3 pp 1029-1038.

[35] Zhang, K., Achari, G., Sadiq, R., Langford, C. H., Dore, M. H. I. (2012). An integrated performance assessment framework for water treatment plants. *Water Research*, n. 46, pp 1673-1683.

## **ANEXOS**

### **Anexo 1: Diagramas ilustrativos do processo de tratamento de água na ETA de Murrupula**

- Instalação da ETA em perfil;
- Instalação da ETA em planta;
- Câmara de entrada em perfil (pormenores);
- Pré-filtro em perfil (pormenores);
- Pré-filtro em alçado posterior (pormenores);
- Filtro lento em perfil (pormenores);
- Filtro lento em alçado frontal (pormenores).

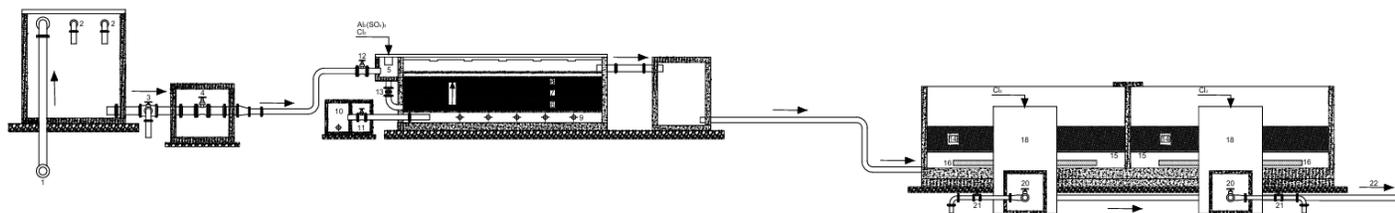


Figura A1-1 Esquema da instalação em perfil – sem escala.

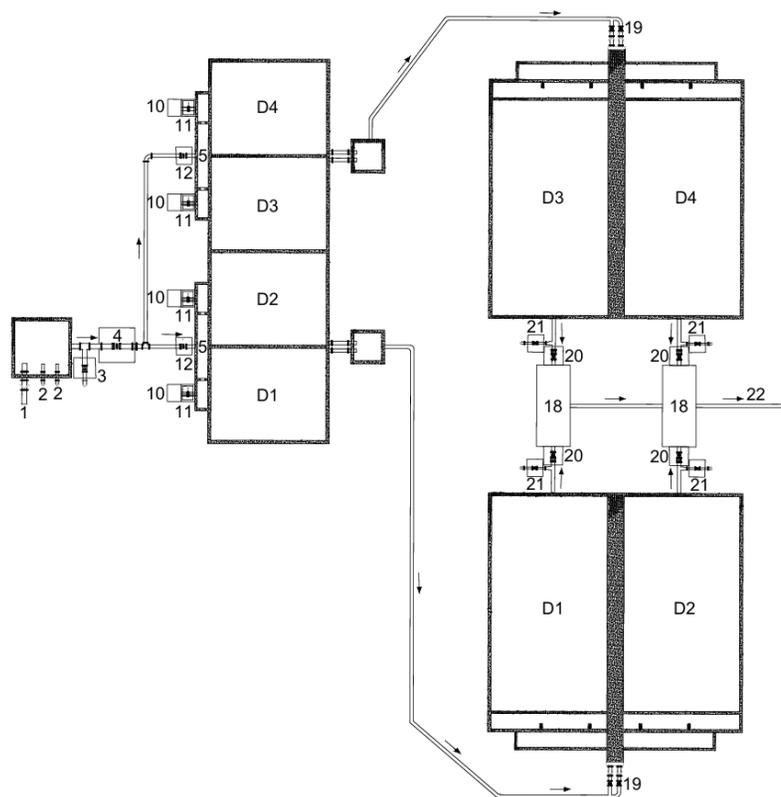


Figura A1-2 Esquema da instalação em planta – sem escala.

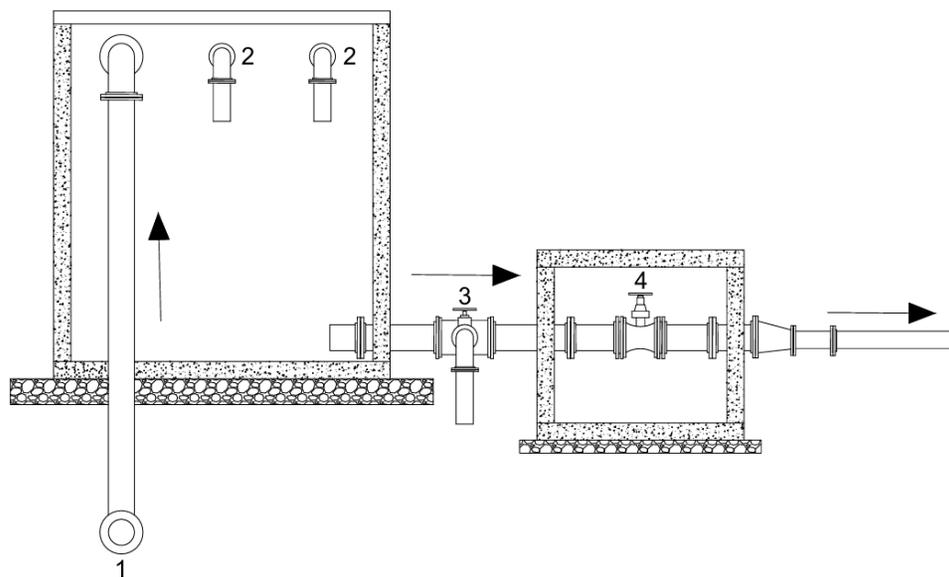


Figura A1-3 Câmara de entrada (ampliada) em perfil – sem escala.

**Legenda**

- 1 – Entrada da água bruta da proveniente da estação de captação
- 2 – Descarga/purga da água bruta supernatante
- 3 – Válvula de seccionamento para drenagem subterrânea
- 4 – Válvula de seccionamento efluente a câmara de entrada

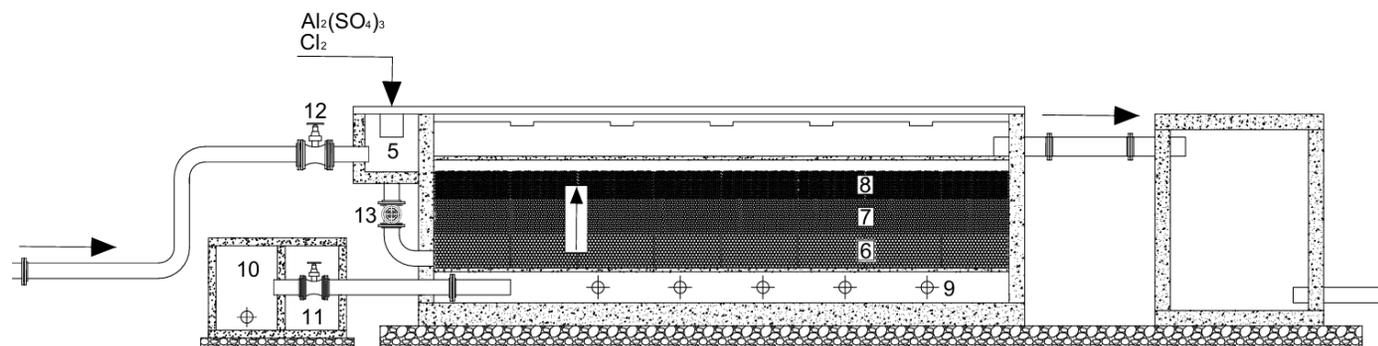


Figura A1-4 Pré-filtro por arrastamento de fluxo ascendente em camadas (ampliado) em perfil – sem escala.

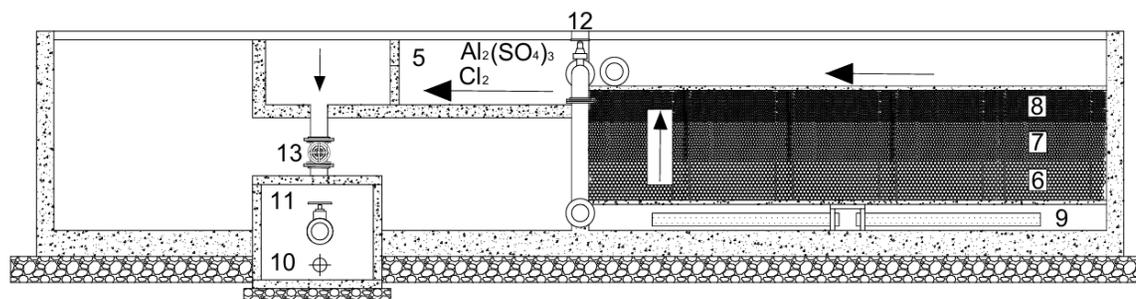


Figura A1-5 Pré-filtro por arrastamento de fluxo ascendente em camadas (ampliado) em alçado posterior – sem escala.

**NB:** nesta última figura, foram apresentados os detalhes externos do pré-filtro para o compartimento esquerdo; e no compartimento direito, os detalhes internos do mesmo.

### Legenda

5 – Compartimento de doseamento de solutos

6 – Material filtrante grosso

7 – Material filtrante médio

8 – Material filtrante fino

9 – Drenagem subterrânea

10 – Caixa de drenagem

11 – Válvula de descarga/purga do URFL

12 – Válvula de entrada ao compartimento de solutos

13 – Válvula de entrada ao URFL

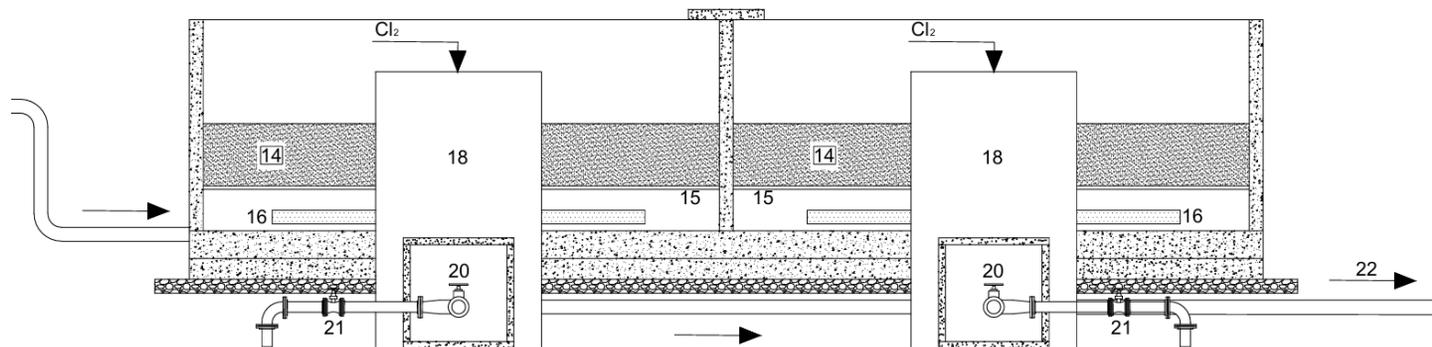


Figura A1-6 Filtro lento de areia (ampliado) em perfil – sem escala.

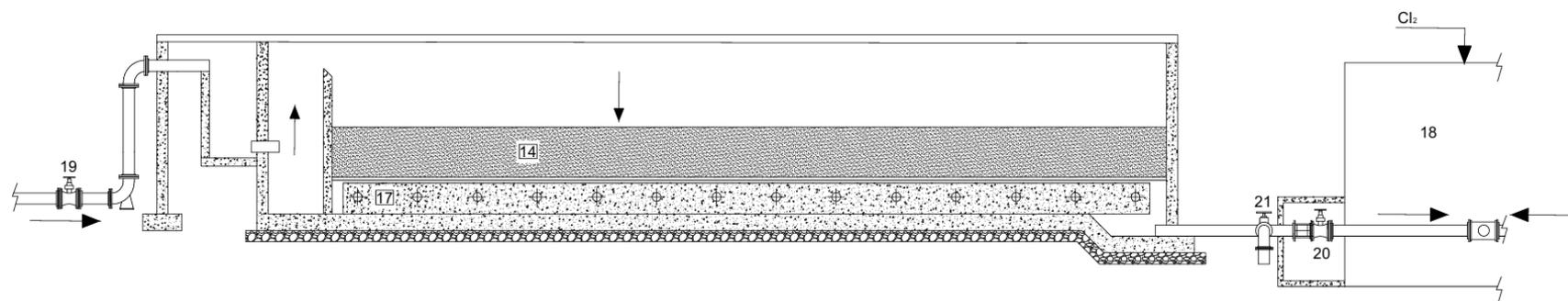


Figura A1-7 Filtro lento de areia (ampliado) em alçado frontal – sem escala.

### Legenda

- 14 – Leito filtrante de areia sílica
- 15 – Camada porosa de protecção entre o leito e o sistema de fundo
- 16 – Tubagem perfurada para recolha de purga do filtro e da água supernatante
- 17 – Canal de escoamento para recolha de purga do filtro e da água supernatante
- 18 – Câmara de recolha de água filtrada
- 19 & 20 – Válvulas afluente/efluente ao SSF
- 21 – Válvula de drenagem do SSF
- 22 – Saída da água tratada para os RAT

Anexo 2: Catálogo das electrobombas instaladas no SAA da vila de Murrupula

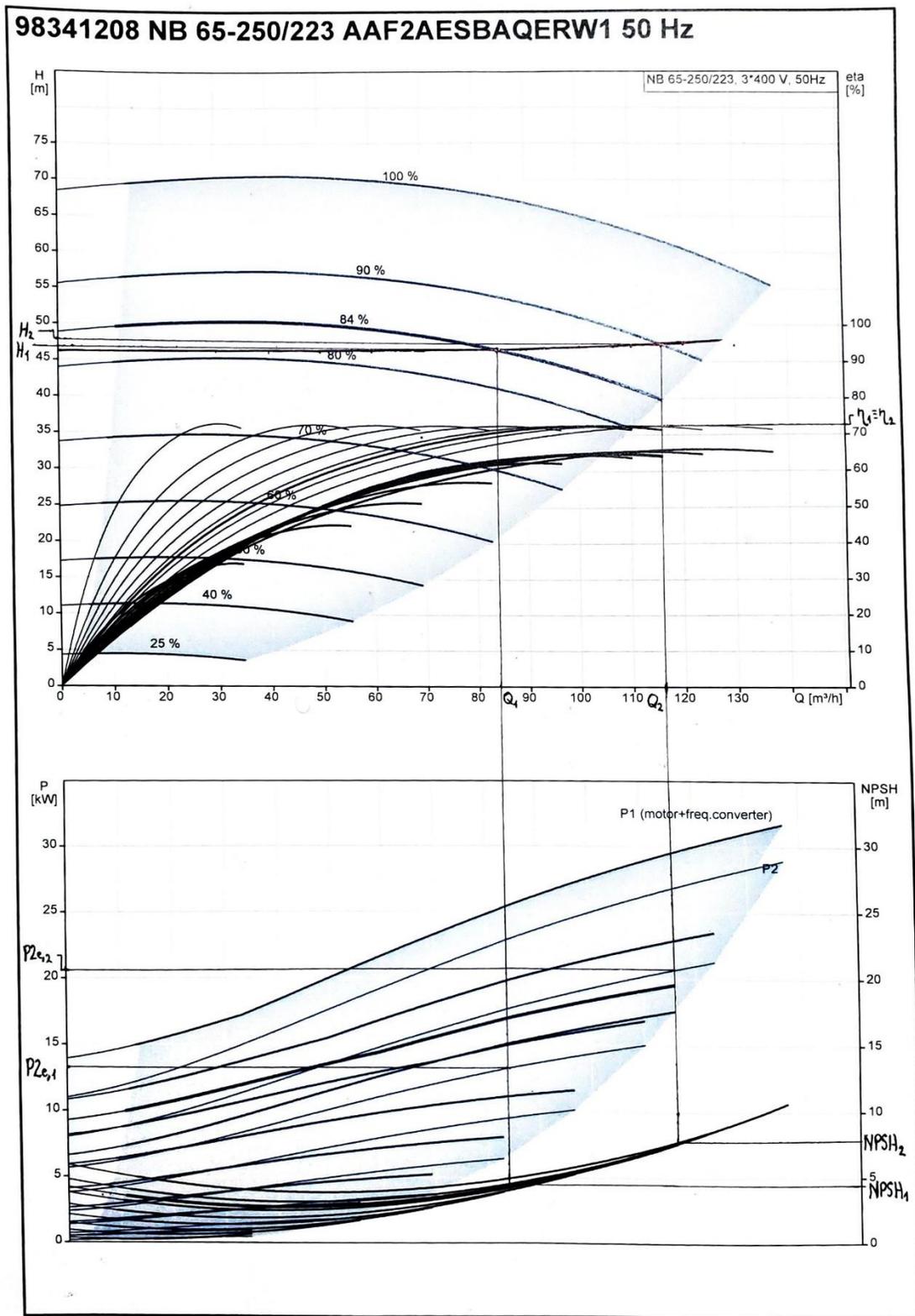


Figura A2-1 Traçado da curva de instalação e leitura dos parâmetros da EE

### Anexo 3: Parâmetros de qualidade de água tratada destinada ao consumo humano e seus riscos para a saúde pública

**Tabela A3-1** Parâmetros microbiológicos. Fonte: Regulamento sobre a Qualidade de Água para o Consumo Humano (2004)

Parâmetro	Limite máximo admissível	Unidades	Riscos para a Saúde Pública
Coliformes totais	Ausente	NMP*/ 100 ml N.º de colônias/ 100 ml	Doenças gastrointestinais
Coliformes fecais	Ausente	NMP*/ 100 ml N.º de colônias/ 100 ml	Doenças gastrointestinais
Vibrio cholerae	Ausente	1000 ml	Doenças gastrointestinais

(NMP): Número Mais Provável

**Tabela A3-2** Parâmetros físicos e organolépticos. Fonte: Regulamento sobre a Qualidade de Água para o Consumo Humano (2004)

Parâmetro	Limite máximo admissível	Unidades	Riscos para a Saúde Pública
Cor	15	TCU	Aparência
Cheiro	Inodoro		Sabor
Condutividade	50-2000	µhmo/cm	
pH	6,5-8,5		Sabor, corrosão, irritação da pele
Sabor	Insípido		
Sólidos totais	1000	mg/l	Sabor, corrosão
Turvação	5	NTU	Aparência, dificulta a desinfecção

**Tabela A3-3** Parâmetros químicos. Fonte: Regulamento sobre a Qualidade de Água para o Consumo Humano (2004)

Parâmetro	Limite máximo admissível	Unidades	Riscos para a Saúde Pública
Amoníaco	1,5	mg/l	Sabor e cheiro desagradável
Alumínio	0,2	mg/l	Afecta o sistema locomotor e causa anemia
Arsénico	0,01	mg/l	Cancro da pele
Antimónio	0,005	mg/l	Cancro no sangue
Bário	0,7	mg/l	Vasoconstrição e doenças cardiovasculares
Boro	0,3	mg/l	Gastroenterites e eritemas
Cádmio	0,003	mg/l	Vasoconstrição urinária
Cálcio	50	mg/l	Aumenta a dureza da água
Chumbo	0,01	mg/l	Intoxicação aguda
Cianeto	0,07	mg/l	Bócio e paralisia
Cloretos	250	mg/l	Sabor desagradável e corrosão
Cloro residual total	0,2-0,5	mg/l	Sabor e cheiro desagradável
Cobre	1,0	mg/l	Irritação intestinal
Crómio	0,05	mg/l	Gastroenterites, hemorragias e convulsões
Dureza total	500	mg/l	Depósitos, corrosão e espumas
Fósforo	0,1	mg/l	Aumenta a proliferação dos microorganismos
Ferro total	0,3	mg/l	Necrose hemorrágica
Fluoreto	1,5	mg/l	Afecta o tecido esquelético
Matéria orgânica	2,5	mg/l	Aumenta a proliferação dos micro-organismos
Magnésio	50	mg/l	Sabor desagradável
Manganês	0,1	mg/l	Anemia, afecta o sistema nervoso
Mercúrio	0,001	mg/l	Distúrbios renais e neurológicos
Molibdénio	0,07	mg/l	Distúrbios urinários
Nitrito	3,0	mg/l	Reduz o O <sub>2</sub> no sangue
Nitrato	50	mg/l	Reduz o O <sub>2</sub> no sangue
Níquel	0,02	mg/l	Eczemas e Intoxicações
Sódio	200	mg/l	Sabor desagradável
Sulfato	250	mg/l	Sabor e corrosão
Selénio	0,01	mg/l	Doenças cardiovasculares
Sólidos totais dissolvidos	1000	mg/l	Sabor desagradável
Zinco	3,0	mg/l	Aparência e sabor desagradáveis
Pesticidas totais	0,0005	mg/l	Intoxicações e distúrbios de vária ordem
Hidrocarbonetos aromáticos policíclicos	0,0001	mg/l	Sabor desagradável, intoxicações e distúrbios de vária ordem

**Anexo 4: Medições em Janeiro de 2024****Tabela A4-1** Registro de turvações em cada unidade da ETA

	Câmara	Pré-filtro	Filtro lento	Observações
22 de Janeiro de 2024				
D1		7,6	64,4	-
D2		7,61	44,9	-
D3		7,64	28,1	-
D4		7,84	22,3	-
23 de Janeiro de 2024 (período da manhã)				
D1		8,2	4,7	-
D2		8,4	4,8	-
D3		7,1	6,1	-
D4		7,2	5,9	-
23 de Janeiro de 2024 (período da tarde)				
D1	12,4	4,25	3,5	Relativamente melhor
D2	12,4	3,99	3,57	Relativamente melhor
D3	12,4	5,3	0,98	Talvez se encontra parcialmente entupido
D4	12,4	5,18	1,32	Talvez se encontra parcialmente entupido
23 de Janeiro de 2024 (período da noite, com abertura da válvula a 50%)				
D1		4,22		-
D2		3,82		-
D3		5,61		-
D4		5,25		-
24 de Janeiro de 2024				
D1		6,47		-
D2		7,36		-

**Tabela A4-1:** Registro de turvações em cada unidade da ETA

	Câmara	Pré-filtro	Filtro lento	Observações
D3		6,25		-
D4		6,45		-

### Anexo 5: Medições em 13 e 14 de Fevereiro de 2024

**Tabela A5-1** Medição do caudal na câmara de entrada, turvação, pH e STD (sólidos totais dissolvidos)

Percentagem de abertura da válvula na saída da bomba (%)	Área superficial útil da câmara de entrada (m <sup>2</sup> )	Profundidade útil de referência (m)	Volume de referência (m <sup>3</sup> )	Tempo (segundos)	Caudal (m <sup>3</sup> /h)	Altura manométrica a saída da bomba (m.c.a)	Turvação (NTU)	pH	STD (mg/l)
30	3,34 x 3,50	0,54	6,31	217,04	104,71	42	64,3	6,7	55
50	3,34 x 3,50	2,00	23,38	671,93	125,26	42	65,2	6,8	55
100	3,34 x 3,50	1,10	12,86	359,63	128,72	42	68,5	6,8	58
						Sobe até 50 m.c.a e depois estabiliza em 42 m.c.a			

**Tabela A5-2** Medição da taxa de filtração dos pré-filtros e filtros lentos

Percentagem de abertura da válvula na saída da bomba (%)	Pré-filtro	Caudal total (m <sup>3</sup> /h)	Área de filtração (1 compartimento)	Taxa de filtração (m/h)	Filtro lento	Caudal total (m <sup>3</sup> /h)	Área de filtração (1 compartimento)	Taxa de filtração (m/h)
		30	104,71	7,60 x 6,10		0,56	104,71	14,10 x 8,10
50	125,26	7,60 x 6,10	0,68	125,26	14,10 x 8,10	0,26		
100	128,72	7,60 x 6,10	0,69	128,72	14,10 x 8,10	0,27		

**Tabela A5-3** Medição do caudal nos descarregadores e turvações (14 e 19 de Fevereiro)

	Compartimentos das linhas de produção	Largura do descarregador (cm)	Altura da lâmina líquida (cm)	Caudal (m <sup>3</sup> /h)	Turvação (NTU)	
Filtros do canal de alimentação (albufeira – poço de captação)					18,2	
					14,9	
Câmara de entrada					15,6	
Pré-filtro	D1	30,3	6,7	33,23	15,3	6,47
	D2	30,4	6,7	33,35	16,3	7,36
	D3	30,1	6,6	33,03	15,1	6,25
	D4	30,1	6,9	32,96	15,1	6,45
Filtro lento	Caixa de recolha de água filtrada				15,0	

**Anexo 6: Histórico de medições de turvação, pH e cloro****Tabela A6-1** Qualidade de água em Abril de 2024

Data	Água bruta		Água tratada		
	Turvação (NTU)	pH	Turvação (NTU)	pH	Cloro (mg/L)
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7	5.01	7.8	0.18	7.82	1.5
8	4.96	7.76	2.87	7	2
9	6.54	7.48	2.63	7.9	0.3
10	5.7	7.5	0.18	7.47	0.5
11					
12					
13					
14					
15	5.28	7.5	1.17	7.96	1.58
16	5.13	7.41	1.34	7.82	0.57
17	5.71	7.52	1.57	7.42	0.94
18					
19					
20					
21					
22	2.19	7.5	1.02	7.33	2
23			0.66	7.24	1.5
24	5.57	7.48			
25					
26	9.91	7.73			

**Tabela A6-1** Qualidade de água em Abril de 2024

Data	Água bruta		Água tratada		
	Turvação (NTU)	pH	Turvação (NTU)	pH	Cloro (mg/L)
27					
28					
29	17.7	7.88			
30					

**Tabela A6-2** Qualidade de água em Maio de 2024

Data	Água bruta		Água tratada		
	Turvação (NTU)	pH	Turvação (NTU)	pH	Cloro (mg/L)
1					
2	1.62	7.36			
3	5.2	7.41	2.39	7.03	1.5
4					
5					
6	2.5	7.41	1.3	7.01	1.5
7	5.2	7.4	2.4	7	1
8					
9					
10	10	7.82	0.12	8.28	1.5
11					
12					
13					
14					
15	11.3	7.26	3.54	7.14	2.14
16	8.4	7.32	3	7.81	1.5
17	7.32	7.51	2.2	7.76	0.24
18	6.25	8.28	3	7.7	1.5
19	8.86	7.49	2.2	7	1

**Tabela A6-2** Qualidade de água em Maio de 2024

Data	Água bruta		Água tratada		
	Turvação (NTU)	pH	Turvação (NTU)	pH	Cloro (mg/L)
20					
21					
22					
23	10.02	7.08	2	7.5	1
24	5.43	7.75	1.74	7.1	1.5
25					
26					
27					
28					
29	12.8	7.13	3	7.5	1.5
30					
31					

**Tabela A6-3** Qualidade de água em Junho de 2024

Data	Água bruta		Água tratada		
	Turvação (NTU)	pH	Turvação (NTU)	pH	Cloro (mg/L)
1					
2					
3	8.04	6.98	2	7.5	1.5
4	16.3	7.53	0.44	7.49	2.11
5	14.8	7.5	2	7.4	1.5
6	11.8	7	2	7.45	2
7	7.6	7.3	3	7.05	1.5
8					
9					
10	7.36	7.6	3.46	7.58	2.11
11	5.1	7.9	2	7.57	1.5

**Tabela A6-3** Qualidade de água em Junho de 2024

Data	Água bruta		Água tratada		
	Turvação (NTU)	pH	Turvação (NTU)	pH	Cloro (mg/L)
12	4.95	7.85	2	7.54	1.5
13	4.44	7.8	2	7.5	2
14	5.96	7.6	2	7	2
15					
16					
17					
18					
19					
20	5.32	7.84	2	7.8	1.5
21	4.82	7.8	2	7.97	2
22					
23	5	7.5	2	7.39	1.5
24					
25					
26	5	7.1	2	7.3	1.5
27	6	7.59	3	7.2	2
28	9	7.42	2	7.42	2.5
29					
30					

**Tabela A6-4** Qualidade de água em Julho de 2024

Data	Água bruta		Água tratada		
	Turvação (NTU)	pH	Turvação (NTU)	pH	Cloro (mg/L)
1	8.2	7.49	2	7.42	1.5
2	6.95	7.59	2	7.4	1.5
3	6.82	7.55	2	7.3	1.5
4	5	6.5	0.11	6.1	2

Tabela A6-4 Qualidade de água em Julho de 2024

Data	Água bruta		Água tratada		
	Turvação (NTU)	pH	Turvação (NTU)	pH	Cloro (mg/L)
5	5.2	6.75	1	6.4	1.5
6					
7					
8	5.1	6.55	1	6.3	2
9	6.23	6.9	1	6.32	2
10	7.1	7.2	2	7.1	2
11	6.4	7.3	2	7.3	1.5
12	5.3	7.1	0.1	6.2	2
13					
14	6.23	6.9	1.2	6.3	1.5
15	7.35	7.1	2	7.17	2
16	6.1	6.98	1	6.3	2
17	7.2	6.99	2	6.69	2
18	6.55	6.94	1	6.5	1.5
19	7.1	6.98	2	6.6	2
20	5.81	6.93	1.39	7.1	2
21	0	0	0	0	
22	5.64	6.8	1	6.2	2
23	4.65	6	0.11	6.1	2
24	3	5.2	1	6.15	1.5
25	5	6.99	1.1	6.6	2.5
26					
27					
28					
29					
30					
31					

## Anexo 7: Soluções de produtos químicos e dureza total

**Tabela A7-1** Soluções de coagulação (sulfato de alumínio)

	Condições normais de funcionamento da ETA	Condições de escassez de água na albufeira (Setembro de 2024)
Soluto (coagulante)	250g	1000g
Solvente (água bruta)	15l	200l
Solução	16,7g/l	5g/l

**Tabela A7-2** Soluções de cloro em condições de escassez de água na albufeira (Setembro de 2024)

	Cloro a montante dos pré-filtros	Cloro a jusante dos filtros lentos
Soluto	900g	4000g
Solvente	100l	200l
Solução	9g/l	20g/l

- Dureza total (Setembro de 2024): 32mg/l