



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**DIMENSIONAMENTO HIDRÁULICO DE UMA ESTAÇÃO DE
TRATAMENTO DE ÁGUA DE CICLO COMPLETO COM SISTEMAS DE
MISTURA RÁPIDA E FLOCULAÇÃO CONSTITUÍDOS DE TRECHOS DE
CANALIZAÇÕES EM CONDUTO FORÇADO**

PAULO HENRIQUE VISCONDE SANTOS

UBERLÂNDIA

FEVEREIRO 2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL

**DIMENSIONAMENTO HIDRÁULICO DE UMA ESTAÇÃO DE
TRATAMENTO DE ÁGUA DE CICLO COMPLETO COM SISTEMAS DE
MISTURA RÁPIDA E FLOCULAÇÃO CONSTITUÍDOS DE TRECHOS DE
CANALIZAÇÕES EM CONDUTO FORÇADO**

PAULO HENRIQUE VISCONDE SANTOS
PROF. IRIDALQUES FERNANDES DE PAULA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Faculdade de Engenharia Civil da Universidade
Federal de Uberlândia como requisito parcial
para a obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Civil.

UBERLÂNDIA

FEVEREIRO 2019

Resumo

As tecnologias de tratamento de águas compreendem dois grandes grupos: as que utilizam a coagulação química e as que não utilizam a coagulação química, definidas em função das características de qualidade da água bruta a tratar. Das tecnologias que utilizam a coagulação química, destaca-se o tratamento de Ciclo Completo, composto, basicamente das unidades de Mistura Rápida, Flocculação, Decantação e Filtração, compondo a etapa de clarificação, e a unidade de Desinfecção, onde se promove também a Fluoretação e a Correção do pH. No presente trabalho pretende-se propor elementos de concepção e dimensionar as unidades componentes de uma Estação de Tratamento de Água (ETA) de Ciclo Completo, para a vazão de projeto de 50 L/s, utilizando água bruta, de manancial superficial, com características de qualidade compatíveis com a tecnologia de tratamento proposta. Da concepção da ETA proposta nesse trabalho constam a utilização de sistemas de Mistura Rápida hidráulica e Flocculação hidráulica alternativos aos usualmente utilizados e sistema de Filtração de concepção mais atualizada, pela utilização de sistema de coleta de água filtrada constituído de malha de crepinas (bocais) assentados diretamente sobre a laje de fundo, sem a necessidade de laje de fundo falso para a sua sustentação. Da análise dos resultados obtidos no dimensionamento, conclui-se que a ETA proposta é capaz de gerar água potável, com alternativas eficientes e de baixo custo, resultando em um projeto que pode ser utilizado em projetos hidráulicos que visam a construção, reforma ou ampliação de estações de tratamento de água de Ciclo Completo, para pequenas comunidades.

Palavras-chave: Estação de Tratamento de Água (ETA), coagulação, flocculação, decantação, filtração, desinfecção.

Abstract

Water treatment technologies comprise two main groups: those that use chemical coagulation and those that do not use chemical coagulation, defined according to the quality characteristics of the raw water to be treated. Of the technologies that use chemical coagulation, we highlight the Full Cycle treatment, composed basically of the Fast Mix, Flocculation, Decantation and Filtration units, composing the clarification stage, and the Disinfection unit, which also promotes Fluoridation and pH Correction. In the present work we intend to propose design elements and dimension the component units of a Full Cycle Water Treatment Station (ETA), for the design flow rate of 50 L/s, using raw water, with surface water, with characteristics compatible with the proposed treatment technology. From the ETA design proposed in this work are the use of hydraulic Fast Mixing and Hydraulic Flocculation systems, which are alternative to those usually used, and the most up-to-date design Filtration system, using a filtered water collection system consisting of seated crepins (nozzles) directly on the bottom slab, without the need for false bottom slab for its support. From the analysis of the results obtained in the design, it is concluded that the proposed ETA is able to generate potable water, with efficient alternatives and low cost, resulting in a project that can be used in hydraulic projects that aim at the construction, remodeling or expansion of Full Cycle water treatment plants for small communities.

Keywords: water treatment plant, coagulation, flocculation, decantation, filtration, disinfection.

Lista de Ilustrações

Figura 1 – Esquema de uma ETA convencional de Ciclo Completo	11
Figura 2 – Misturador hidráulico: Calha Parshall	12
Figura 3 – Misturador mecânico: turbina axial	12
Figura 4 – Flocluladores hidráulicos	13
Figura 5 – Floclulador mecanizado	14
Figura 6 – Decantadores convencionais: horizontal e vertical	14
Figura 7 – Decantador de alta taxa	15
Figura 8 – Filtro rápido por gravidade	16
Figura 9 – Tanque de contato	16
Figura 10 – Unidade de Mistura Rápida (unidades em centímetros)	22
Figura 11 – Vista em planta do floclulador (unidades em centímetros).....	23
Figura 12 – Corte longitudinal da Unidade de Floclulação (unidades em centímetros) .	24
Figura 13 – Placas dos decantadores (unidades em centímetros).....	24
Figura 14 – Poços de lodo (unidades em centímetros).....	26
Figura 15 – Fundo do decantador (unidades em centímetros)	27
Figura 16 – Tubulação de água floclulada (unidades em centímetros)	27
Figura 17 – Dimensões dos orifícios (unidades em centímetros).....	28
Figura 18 – Corte com diâmetros da tubulação de distribuição de água floclulada.....	29
Figura 19 – Calha de coleta de água decantada.....	29
Figura 20 – Corte transversal dos decantadores (unidades em centímetros).....	31
Figura 21 – Planta do decantador de alta taxa (unidades em centímetros)	31
Figura 22 – Expansão dos meios filtrantes.....	34
Figura 23 – Dimensões das crepinas (unidades em centímetros).....	35
Figura 24 – Canaleta no fundo do filtro (unidades em centímetros).....	36
Figura 25 – Corte longitudinal do filtro (unidades em centímetros).....	37
Figura 26 – Gráfico de desempenho hidrodinâmico das crepinas.....	39
Figura 27 – Corte longitudinal da tubulação de água filtrada	40

Figura 28 – Corte longitudinal da tubulação de água para lavagem	41
Figura 29 – Planta da Unidade de Filtração (unidades em centímetros).....	42
Figura 30 – Corte longitudinal do tanque de contato (unidades em centímetros).....	44
Figura 31 – Planta do tanque de contato (unidades em centímetros)	44
Figura 32 – T de derivação (unidades em centímetros)	47
Figura 33 – Esquema da ETA em planta.....	54
Figura 34 – Esquema da ETA – corte longitudinal	55

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Características do leito filtrante	33
Tabela 2 – Comprimentos equivalentes	39
Tabela 3 – Tempo de contato mínimo para desinfecção por meio de cloração.....	43

Sumário

1. Introdução	10
2. Unidades componentes de uma ETA de Ciclo Completo.....	11
3. Parâmetros básicos de projeto - Modelos de dimensionamento	17
3.1 Sistemas de mistura da fase de clarificação (Mistura Rápida e Flocculação)	17
3.2 Decantação.....	19
3.2.1 Decantadores de alta taxa.....	19
3.3 Filtração	20
3.4 Desinfecção, Fluoretação e Correção de pH.....	20
3.4.1 Desinfecção	20
4. Dimensionamento das unidades componentes da ETA	21
4.1. Mistura Rápida.....	21
4.1.1 Diâmetro da tubulação	21
4.1.2 Comprimento da tubulação	21
4.2 Flocculação.....	22
4.3 Decantação.....	24
4.3.1 Velocidade de escoamento entre as placas (v_o)	25
4.3.2 Largura do decantador (B).....	25
4.3.3 Comprimento do decantador (Ld).....	25
4.3.4 Poços de lodo	26
4.3.5 Tubulação de distribuição de água flocculada.....	27
4.3.6 Calha longitudinal central de coleta de água decantada	29
4.3.7 Tubulação de descarga de lodo	30
4.3.8 Dimensões do decantador	30
4.4 Filtração	32
4.4.1 Dimensões de cada filtro.....	32
4.4.2 Entrada de água decantada.....	32

4.4.3 Características do leito filtrante	33
4.4.4 Diâmetro da tubulação de água filtrada (DF).....	33
4.4.5 Lavagem dos filtros.....	33
4.4.6 Fundo do filtro	35
4.4.5 Altura vertical	36
4.6.8 Perdas de carga.....	38
4.5 Desinfecção.....	43
4.5.1 Tempo de contato.....	43
4.5.2 Volume do tanque	43
5. Análise de resultados	45
6. Conclusão.....	50
Referências.....	52
Anexo A.....	54
Anexo B	55

1. Introdução

Uma Estação de Tratamento de Água é um componente de um Sistema de Abastecimento de Água de uma cidade. A água bruta é captada em mananciais, passando por um gradeamento que impede a entrada de elementos grosseiros contidos na água, e depois conduzida para uma ETA por meio de adutoras. Dentro da ETA é realizado todo o processo que torna a água bruta adequada para consumo humano, para então ser conduzida para laboratórios que analisam sua potabilidade. Depois de considerada potável, a água é armazenada em reservatórios antes de ser distribuída. Por fim, por meio de adutoras e das redes de distribuição, a água potável chega até a população.

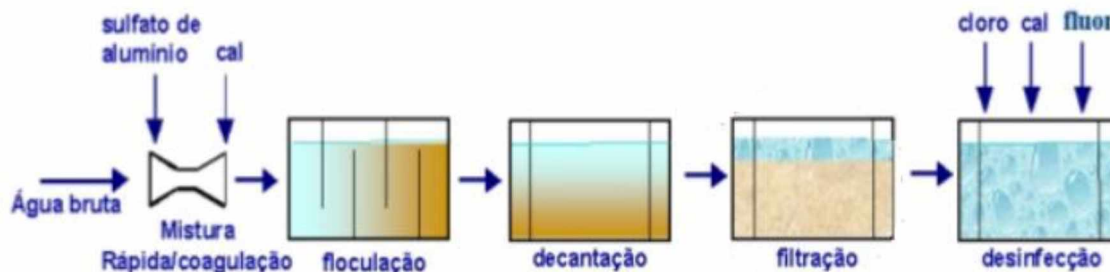
O tratamento de águas de abastecimento provenientes de mananciais superficiais não poluídos visa a clarificação e a desinfecção da água, atendendo a portaria nº 2914/2011 do Ministério da Saúde, que indica os procedimentos adequados para que, ao final do tratamento, a água possua um padrão de potabilidade adequado para consumo humano. Segundo a portaria nº 2914/2011, toda água destinada ao consumo humano proveniente de solução alternativa individual de abastecimento de água, independentemente da forma de acesso da população, está sujeita à vigilância da qualidade da água.

Das tecnologias de tratamento de águas de mananciais superficiais utilizadas no Brasil, destaca-se o tratamento de Ciclo Completo, que necessita de coagulação química, empregado em função das características físicas químicas e biológicas da água bruta captada no manancial. As unidades componentes de uma ETA de Ciclo Completo são:

- **Coagulação/Mistura Rápida:** a água bruta captada chega na unidade de mistura rápida e nela se inicia a aglomeração de impurezas em flóculos. A água é agitada rapidamente e a aglomeração ocorre por meio da adição de reagentes que fazem as partículas se juntarem, sendo normalmente utilizados a cal hidratada e sulfato de alumínio. Existem dois tipos de unidade de mistura rápida: a hidráulica e a mecanizada.
- **Floculação:** é uma continuação do processo de aglutinação de partículas de impurezas. Nesta unidade a água é agitada lentamente para aumentar o diâmetro e a massa dos flóculos. Existem dois tipos de floculador: o hidráulico e o mecanizado.
- **Decantação:** a água floculada deixa de ser agitada quando chega nos decantadores, e através da gravidade os flóculos maiores de sujeira se depositam no fundo do recipiente, enquanto o restante da água segue para os filtros. Existem dois tipos de decantadores: o convencional e o de alta taxa.
- **Filtração:** a água decantada chega aos filtros, que atuam por gravidade, ocorrendo a remoção de flóculos menores e alguns micro-organismos, por meio da passagem da água por camadas de meios filtrantes, sendo os habitualmente utilizados areia, antracito e cascalho.
- **Desinfecção/Fluoretação/Correção de pH:** a água filtrada chega no tanque de contato, recipiente onde ocorre a adição de cloro, flúor e cal hidratada.

A Figura 1 exemplifica o esquema de uma ETA convencional de Ciclo Completo.

Figura 1 – Esquema de uma ETA convencional de Ciclo Completo



Fonte: Ministério da Saúde (2013)

No presente trabalho foram propostas algumas unidades alternativas para o sistema de tratamento da água, mas que apresentam a mesma eficiência que as usualmente utilizadas.

O objetivo geral deste trabalho é dimensionar as unidades constituintes da estação de tratamento de água de Ciclo Completo proposta, com vazão de 50 L/s, a partir da definição da concepção de cada unidade que será utilizada.

Os objetivos específicos são:

- Dimensionar as unidades componentes da etapa de coagulação.
- Dimensionar as unidades componentes da etapa de floculação.
- Dimensionar as unidades componentes da etapa de decantação.
- Dimensionar as unidades componentes da etapa de filtração.
- Dimensionar as unidades componentes da etapa de desinfecção.

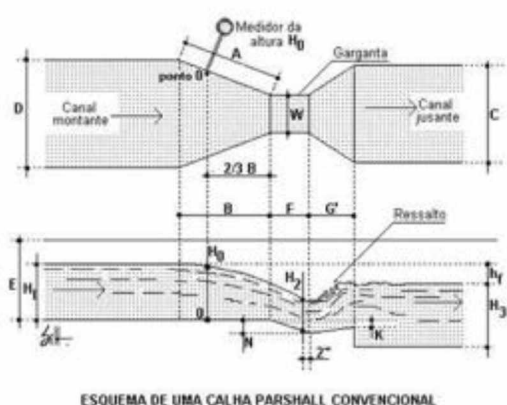
2. Unidades componentes de uma ETA de Ciclo Completo

Coagulação/Mistura Rápida

A primeira unidade de uma ETA de Ciclo Completo é a de Mistura Rápida, que recebe a água bruta dos mananciais. Segundo Richter (2009), o processo de coagulação envolve a aplicação e mistura de produtos químicos para precipitação de compostos em solução e desestabilização de suspensões coloidais de partículas sólidas, que, de outra maneira, não poderiam ser removidas por sedimentação, flotação ou filtração. Portanto, na etapa de coagulação é iniciado a aglomeração das impurezas que posteriormente serão removidas. No Brasil, o coagulante mais utilizado é o sulfato de alumínio ($Al_2(SO_4)_3$).

A Figura 2 ilustra uma Calha Parshall, um exemplo de unidade de mistura rápida do tipo hidráulica, onde a mistura do coagulante é feita por meio da alteração do diâmetro hidráulico de uma tubulação, acelerando a velocidade da água.

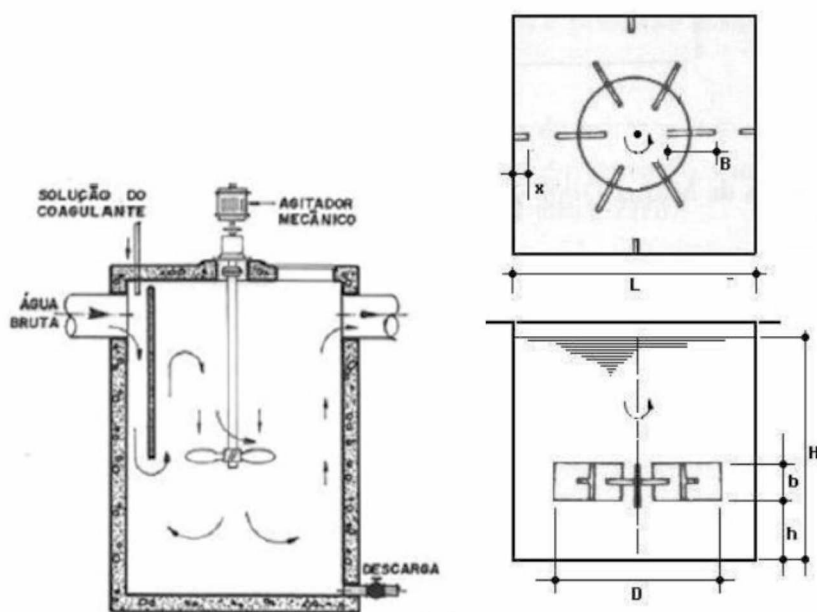
Figura 2 – Misturador hidráulico: Calha Parshall



Fonte: Fenômenos da Engenharia (2018)

Na unidade de mistura rápida mecanizada, o processo ocorre com a utilização de agitadores mecanizados, podendo ser utilizados turbinas (Figura 3), hélices, rotores ou paletas giratórias.

Figura 3 – Misturador mecânico: turbina axial



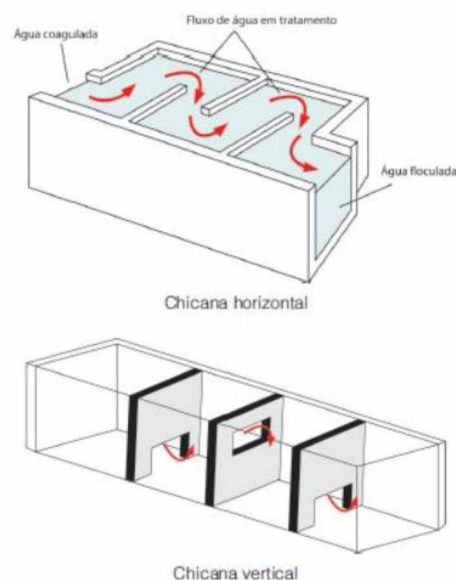
Fonte: AEMS (2018)

Floculação

A unidade de Floculação recebe a água coagulada e nela é continuado o processo de aglutinação das impurezas. Enquanto a finalidade dos coagulantes é gerar os flocos através da desestabilização das partículas, os agentes floculantes, adicionados na unidade de floculação, tem função de aumentar o diâmetro e peso desses flocos. Esse aumento ocorre nos floculadores por meio de tubulações (ou chicanas) que apresentam baixos gradientes de velocidade, já que flocos maiores não suportam grandes agitações. No Brasil, o agente floculante mais utilizado é o policloreto de alumínio $[Aln(OH)mCl(3m-n)]$. [RUBIM, 2013].

Nos floculadores hidráulicos a agitação da água é feita pela mudança de direção da mesma, na horizontal ou na vertical, sendo que esse deslocamento pode ser feito por meio de tubulações com mudanças de direção ou utilizando chicanas (Figura 4).

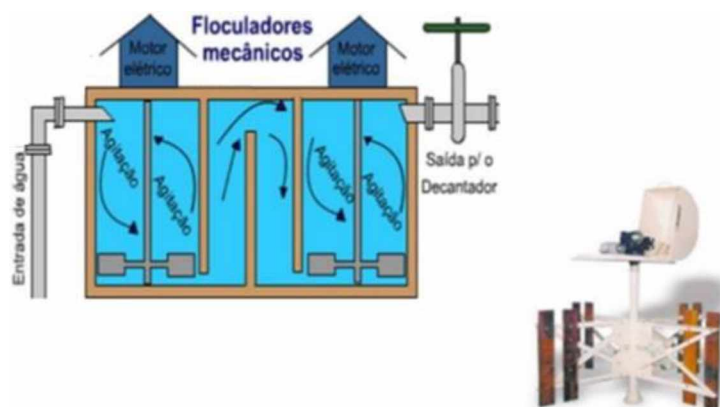
Figura 4 – Floculadores hidráulicos



Fonte: Rubim (2013)

No caso de floculadores mecanizados (Figura 5), assim como na unidade de mistura rápida, a agitação da água é feita por meio de agitadores impulsionados por motores.

Figura 5 – Floclador mecanizado



Fonte: O2 Engenharia (2018)

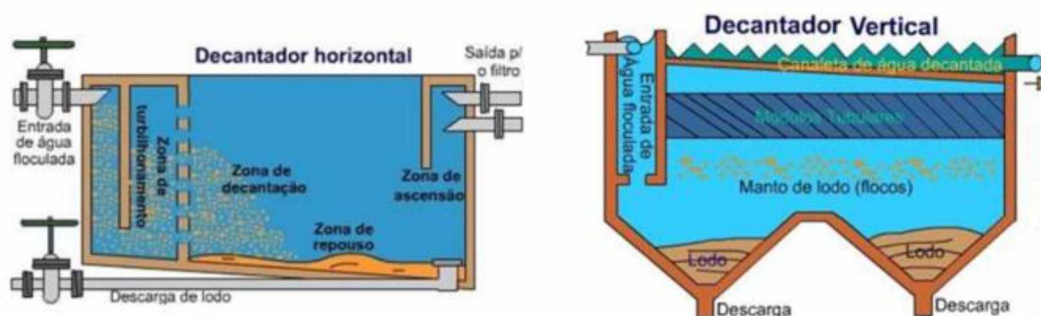
Decantação

Após a floclação, a água floclada passa para os decantadores. A decantação consiste no ato de separar, por meio da gravidade, os sólidos sedimentáveis que estão contidos em uma solução líquida. Os sólidos sedimentam no fundo do decantador de onde acabam sendo removidos como lodo, enquanto o efluente, livre dos sólidos, decanta pelo vertedouro [Opersan, 2015].

Existem diversos modelos de unidade de decantação, podendo ser a limpeza do lodo de modo hidrostático ou mecanizado, e o escoamento ocorrer de forma horizontal ou vertical. Em geral, os decantadores podem ser divididos em dois tipos: convencional e de alta taxa.

De acordo com Legner (2013), os decantadores convencionais (Figura 6) são mais antigos e comuns e demandam de certa área de aplicação, enquanto os de alta taxa (Figura 7) são aqueles que necessitam de superfícies inclinadas de decantação, reduzindo a área de aplicação e ocupando áreas menores.

Figura 6 – Decantadores convencionais: horizontal e vertical



Fonte: O2 Engenharia (2018)

Figura 7 – Decantador de alta taxa



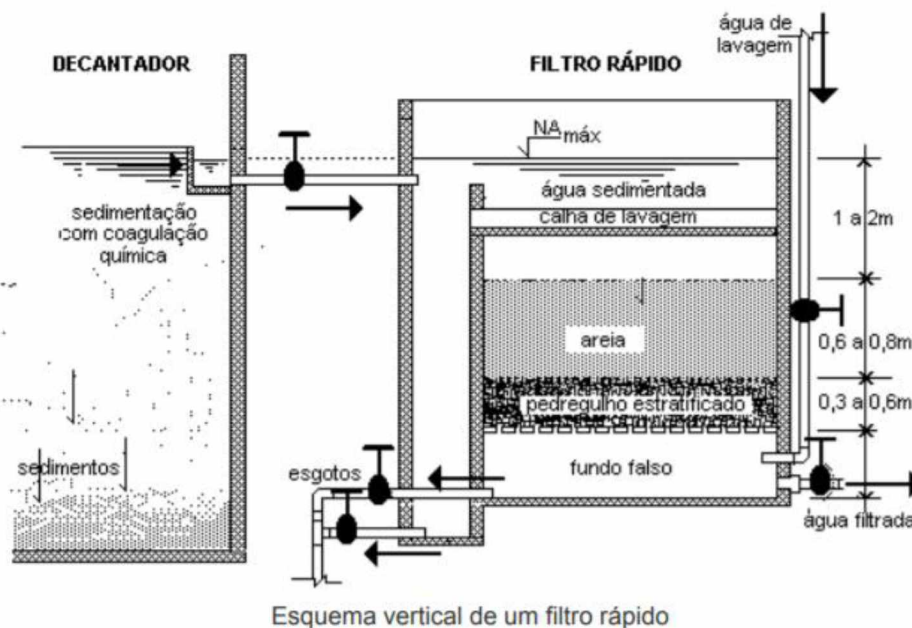
Fonte: AEMS (2018)

Filtração

A água decantada é direcionada para a unidade de filtração. A filtração é um processo físico em que a água atravessa um leito filtrante, em geral areia ou areia e antracito, de modo que partículas em suspensão sejam retidas produzindo um efluente mais limpo [BIOPROJECT, 2018]. Nela são removidos flóculos de impurezas menores, que não foram sedimentados no processo de decantação, e também alguns micro-organismos presentes na água.

Existem dois tipos de filtração: a rápida e a lenta. O processo de filtração lenta é um pouco estático em suas alternativas de projeto, enquanto o processo de filtração rápida é bastante dinâmico em termos de alternativa, podendo ser projetado com materiais diferentes no leito filtrante, dispositivos para aumento da capacidade de filtração, bem como fluxos por gravidade ou forçados, ascensionais ou descendentes [BIOPROJECT, 2018]. A Figura 8 mostra o esquema de um filtro rápido por gravidade.

Figura 8 – Filtro rápido por gravidade

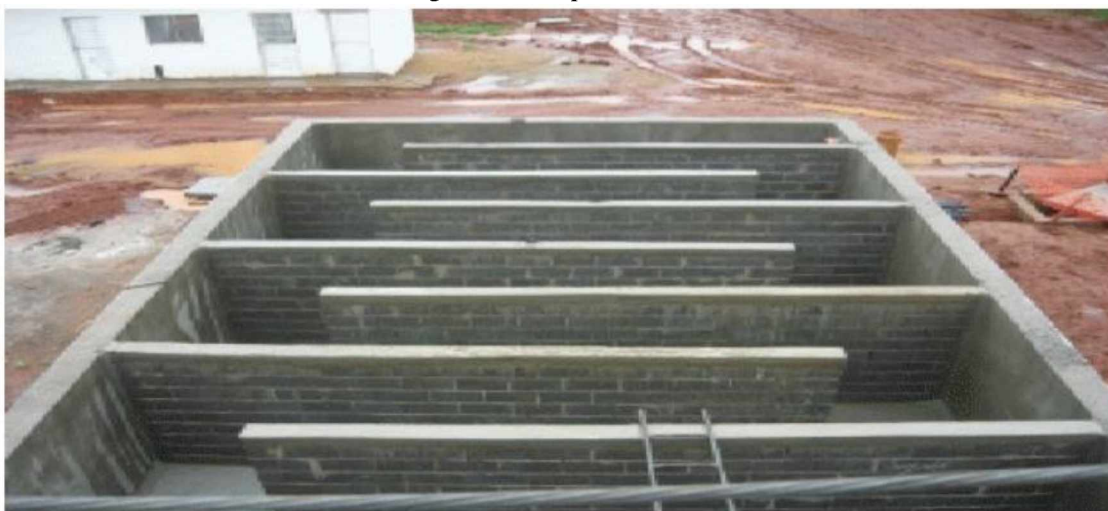


Fonte: Bioproject (2018)

Desinfecção/Fluoretação/Correção pH

Os processos desinfecção, fluoretação e correção do pH ocorrem todos no tanque de contato (Figura 9), recipiente onde são aplicados na água filtrada: o cloro (desinfecção), o flúor (fluoretação) e a cal hidratada (correção de pH). O cloro é responsável pela remoção de micro-organismos que não foram eliminados na filtração, visando reduzir a ocorrência de doenças na população. A finalidade do flúor é a prevenção da incidência de cáries na população. A cal hidratada, corrigindo o pH da água, reduz a corrosividade da mesma, evitando a danificação das tubulações de distribuição [MICHA, 2018].

Figura 9 – Tanque de contato



Fonte: AEMS (2018)

3. Parâmetros básicos de projeto - Modelos de dimensionamento

Equações básicas

$$V = QT \quad (1)$$

em que:

V : volume útil (m³);

Q : vazão (m³/s);

T : Tempo (s).

$$Q = vS \quad (2)$$

em que:

v : velocidade de escoamento (m/s);

S : seção transversal de (ao) escoamento (m²).

Equação de Darcy-Weisbach/fórmula universal de perda de carga:

$$h = \frac{8 f C Q^2}{g \pi^2 D_h^5} \quad a \quad (3)$$

em que:

h : perda de carga (m);

f : coeficiente de atrito (adimensional);

C : comprimento da tubulação (m);

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

D_h : diâmetro hidráulico = diâmetro da tubulação (m) - condutos forçados.

3.1 Sistemas de mistura da fase de clarificação (Mistura Rápida e Flocculação)

Parâmetros de projeto: vazão (Q), gradiente médio de velocidade (G), tempo de detenção (T).

Equação básica de dimensionamento

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu V}} \quad (4)$$

em que:

G : gradiente médio de velocidade (s^{-1});

P : potência dissipada (N.m/s);

μ : coeficiente de viscosidade dinâmica da água ($\frac{N.s}{m^2}$).

Sistemas hidráulicos de mistura:

$$P = \gamma Qh \quad (5)$$

em que:

γ : peso específico da água (N/m^3).

Combinando as equações (4) e (5) obtém-se a equação:

$$G = \sqrt{\frac{\gamma h}{\mu T}} \quad (6)$$

Considerando a equação (6) e aplicando a equação de (3), obtém-se a equação:

$$G = \sqrt{\frac{32\gamma f Q^3}{\mu g \pi^3 D_h^7}} \quad (7)$$

Orientações da ABNT NBR 12216:1992 para adoção de valores de gradiente de velocidade e tempo de detenção em sistemas de mistura, da fase de clarificação, quando esses parâmetros não podem ser otimizados em laboratório, a partir de ensaios com a água a tratar:

Mistura Rápida

$G = 700 \text{ s}^{-1}$ a 1100 s^{-1} ; $T \leq 5 \text{ s}$.

Floculação

$G = 70 \text{ s}^{-1}$ (máximo na primeira câmara) a 10 s^{-1} (mínimo na última câmara); $T = 20 \text{ min}$ a 30 min (tempo total de floculação para sistemas hidráulicos).

3.2 Decantação

3.2.1 Decantadores de alta taxa

Parâmetros de projeto: vazão (Q), v_s (velocidade de sedimentação do floco).

Equações básicas de dimensionamento

$$\frac{v_s}{v_o} = \frac{S_c}{(\text{sen } \theta + L \cos \theta)} \quad (8)$$

em que:

v_o : velocidade de passagem da água pelos sedimentadores (m/s);

S_c : adimensional que varia com as características dos sedimentadores;

L : comprimento relativo (adimensional). No caso de sedimentadores constituídos de placas planas paralelas L seria determinado pela relação $\frac{l}{e_p}$, em que l é o comprimento da placa (comprimento de percurso da água na placa - m) e e_p é o espaçamento entre placas - m;

θ : ângulo entre as placas e o eixo horizontal.

$$Q_{\text{calha}} = 1,38 b H m^{\frac{3}{2}} \quad (9)$$

Em que:

Q_{calha} : vazão da calha (m³/s);

b : largura interna da calha (m);

Hm : altura de água na calha.

$$Q_v = 1,4 H v^{\frac{5}{2}} \quad (10)$$

Em que:

Q_v : vazão no vertedor (m³/s);

Hv : altura de água no vertedor (m).

$$S_d = \frac{Ah \sqrt{Ht}}{4850 T} \quad (11)$$

Em que:

S_d : seção da tubulação de descarga (m²);

Ht: altura de água sobre a tubulação de descarga (m);

Ah: área horizontal do decantador (m²);

T: tempo de esvaziamento (h).

3.3 Filtração

Equação básica de dimensionamento

$$A_f = \frac{Q_f}{TF} \quad (12)$$

em que:

A_f : área horizontal do filtro (m²);

Q_f : vazão do filtro (m³/dia);

TF : taxa de filtração ($\frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{dia}}$).

A taxa de filtração (TF) equivale à velocidade de aproximação (relação entre a vazão e a área horizontal do filtro). Para projeto, a ABNT NBR 12216:1992 limita a taxa de

filtração a $180 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{dia}}$, para projetos de filtros com camada filtrante única de areia e a

$360 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{dia}}$, para projetos de filtros com camada filtrante constituída de antracito e areia (dupla camada).

3.4 Desinfecção, Fluoretação e Correção de pH.

3.4.1 Desinfecção

Para a desinfecção, a equação básica de dimensionamento é a equação (1).

O tempo de contato mínimo (T) é definido pela portaria nº 2914/2011, com base na concentração de cloro residual na saída do tanque de contato, do pH de desinfecção e da temperatura da água na desinfecção.

4. Dimensionamento das unidades componentes da ETA

4.1. Mistura Rápida

Será utilizado sistema hidráulico de Mistura Rápida, efetuada em trecho da tubulação de chegada de água bruta, provida de sistema de malhas e sistemas difusores de alcalinizante e coagulante.

4.1.1 Diâmetro da tubulação

Segundo Di Bernardo, para tubulações em estações de tratamento de água, recomenda-se adotar por segurança o valor do coeficiente de atrito (f) igual à 0,03. Para a água, o peso específico é igual à 1000kgf/m³ e o coeficiente de viscosidade dinâmica igual à 0,0001029 kgf.s/m². Considerando os parâmetros de projeto recomendados para o gradiente de velocidade e aplicando a equação (7):

$$1100 = \sqrt{\frac{32 \times 1000 \times 0,03 \times 0,05^3}{0,0001029 \times 9,81 \times \pi^3 \times D^7}} \rightarrow D = 0,16 \text{ m}$$

$$700 = \sqrt{\frac{32 \times 1000 \times 0,03 \times 0,05^3}{0,0001029 \times 9,81 \times \pi^3 \times D^7}} \rightarrow D = 0,19 \text{ m}$$

Portanto, o diâmetro de projeto adotado será de 200 mm. Recalculando o gradiente de velocidade para este diâmetro:

$$G = \sqrt{\frac{32 \times 1000 \times 0,03 \times 0,05^3}{0,0001029 \times 9,81 \times \pi^3 \times 0,2}} \rightarrow G = 547 \text{ s}^{-1}$$

4.1.2 Comprimento da tubulação

Calculando a velocidade por meio da equação (2):

$$0,05 = v \times \frac{\pi \times 0,2^2}{4} \rightarrow v = 1,59 \text{ m/s}$$

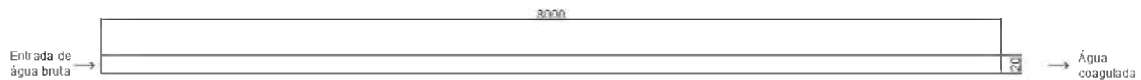
Com tempo de detenção de 5 segundos, foi calculado o comprimento (L) da tubulação:

$$L = 1,59 \times 5 = 7,96 \text{ m}$$

Portanto, foi adotado um comprimento da tubulação de Mistura Rápida de 8 metros.

A Figura 10 ilustra o corte longitudinal da unidade de Mistura Rápida.

Figura 10 – Unidade de Mistura Rápida (unidades em centímetros)



Fonte: Autor (2018)

4.2 Floculação

Será utilizado sistema hidráulico de Floculação constituído de 3 trechos de canalizações em série, com diâmetros crescentes no sentido do escoamento.

Para a unidade de Floculação, foram mantidos comprimentos iguais de 100 metros para cada um dos 3 trechos, visando facilitar a construção dos floculadores. Considerando os parâmetros de projeto recomendados, foi aplicada a mesma sequência de cálculos da unidade de Mistura Rápida.

Primeiro trecho

$$50 = \sqrt{\frac{32 \times 1000 \times 0,03 \times 0,05^3}{0,0001029 \times 9,81 \times \pi^3 \times D^7}} \rightarrow D = 0,40 \text{ m} \rightarrow \text{DN400}$$

$$0,05 = v \times \frac{\pi \times 0,4^2}{4} \rightarrow v = 0,40 \text{ m/s}$$

Tempo de detenção = 4 min 10 s = 250 s

$$L = 0,40 \times 250 = 100 \text{ m}$$

Segundo trecho

$$20 = \sqrt{\frac{32 \times 1000 \times 0,03 \times 0,05^3}{0,0001029 \times 9,81 \times \pi^3 \times D^7}} \rightarrow D = 0,51 \text{ m} \rightarrow \text{DN500}$$

$$0,05 = v \times \frac{\pi \times 0,5^2}{4} \rightarrow v = 0,25 \text{ m/s}$$

Tempo de detenção = 6 min 40 s = 400 s

$$L = 0,25 \times 400 = 100 \text{ m}$$

Terceiro trecho

$$10 = \sqrt{\frac{32 \times 1000 \times 0,03 \times 0,05^3}{0,0001029 \times 9,81 \times \pi^3 \times D^7}} \rightarrow D = 0,63 \text{ m} \rightarrow \text{DN600}$$

$$0,05 = v \times \frac{\pi \times 0,6^2}{4} \rightarrow v = 0,18 \text{ m/s}$$

Tempo de detenção = 9 min 15 s = 555 s

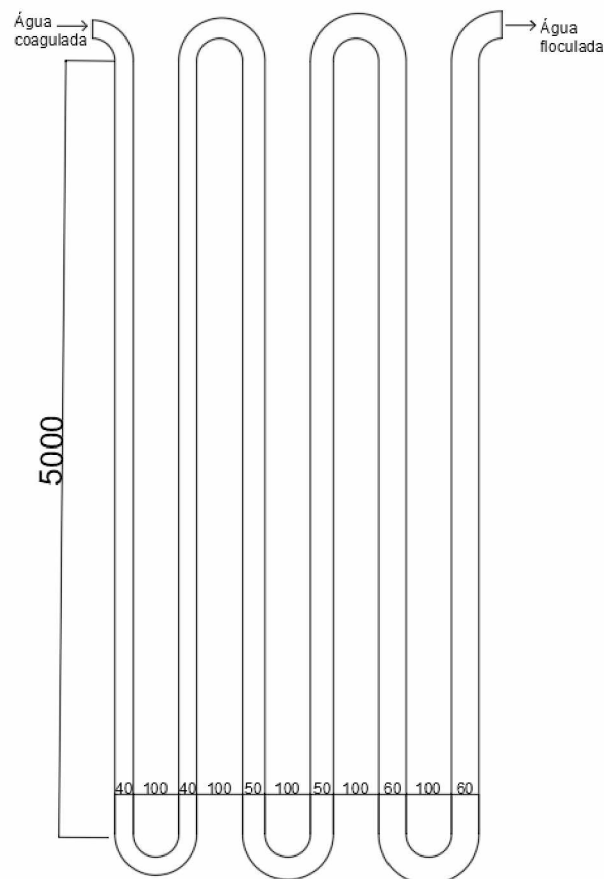
$$L = 0,18 \times 555 = 100 \text{ m}$$

Tempo total de Floculação = 20 min 5 s

Comprimento total da tubulação = 300 m

A Figura 11 ilustra a vista em planta da unidade de Floculação, cada um dos trechos de diâmetros crescentes calculados anteriormente foi dividido em dois trechos de 50 metros de comprimento, paralelos no plano horizontal e conectados por curvas de 180°, sendo o espaçamento entre as tubulações de 1 metro visando facilitar a manutenção das mesmas.

Figura 11 – Vista em planta do floculador (unidade em centímetros)



Fonte: Autor (2018)

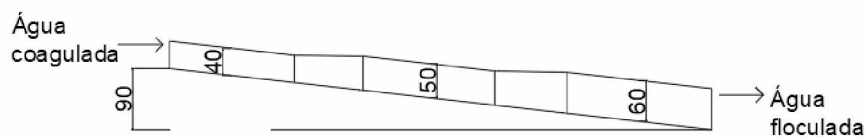
Para compensar a perda de carga durante o percurso da água na unidade de Floculação, deve existir um desnível entre a chegada de água coagulada e a saída de água floculada, calculado utilizando a equação (3):

$$\Delta h_{\text{floculador}} = \frac{8 \times 0,03 \times 100 \times 0,05^2}{9,81 \times \pi^2 \times 0,4^5} + \frac{8 \times 0,03 \times 100 \times 0,05^2}{9,81 \times \pi^2 \times 0,5^5} + \frac{8 \times 0,03 \times 100 \times 0,05^2}{9,81 \times \pi^2 \times 0,6^5}$$

$$\Delta h_{\text{floculador}} = 0,061 + 0,020 + 0,008 = 0,089 \text{ m}$$

Portanto, do início do floculador até o seu final deve existir uma diferença de altura de 0,9 m, visando corrigir os efeitos de perda de carga. A Figura 12 apresenta o corte longitudinal da Unidade de Floculação.

Figura 12 – Corte longitudinal da Unidade de Floculação (unidade em centímetros)

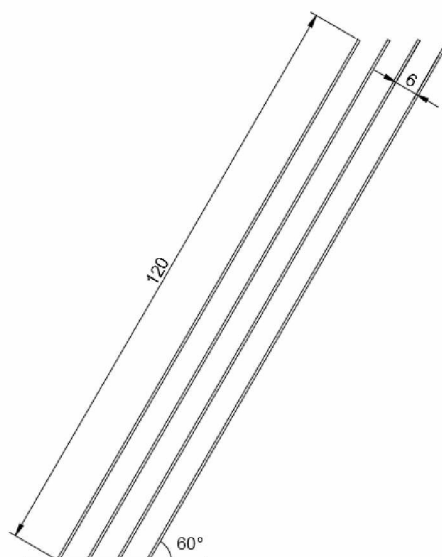


Fonte: Autor (2018)

4.3 Decantação

Serão utilizados 2 decantadores de alta taxa, com sedimentadores constituídos de placas planas paralelas (Figura 13), de 1,20 metros de comprimento e 0,5 centímetros de espessura, que formam ângulo de 60° com o plano horizontal e possuem um espaçamento entre elas de 6 centímetros. Para placas planas paralelas, o valor de Sc na equação (8), é igual a 1. A velocidade de sedimentação do floco (v_s) adotada nos decantadores será de 40 m/dia.

Figura 13 – Placas dos decantadores (unidades em centímetros)



Fonte: Autor (2018)

4.3.1 Velocidade de escoamento entre as placas (v_o)

Cálculo da relação (L) entre o comprimento do percurso de água nas placas (l) e o espaçamento entre placas (e_p):

$$L = \frac{l}{e_p} = \frac{120}{6} = 20$$

Com o valor calculado de L, foi aplicada a equação (8) para determinação da velocidade de escoamento entre as placas:

$$40 = \frac{v_0 \times 1}{20 \cos 60^\circ + \sin 60^\circ} \rightarrow v_0 = 434,6 \text{ m/dia} = 30 \text{ cm/min}$$

4.3.2 Largura do decantador (B)

Cálculo da área útil entre as placas ($A_{\text{útil}}$), utilizando a equação (2):

$$A_{\text{útil}} = \frac{0,025 \times 86400}{434,6} = 4,97 \text{ m}^2$$

Devido a inclinação das placas, deve-se realizar o cálculo da área superficial útil entre as placas (A_{su}):

$$A_{\text{su}} = \frac{A_{\text{útil}}}{\sin \theta} = \frac{4,97}{\sin 60^\circ} = 5,74 \text{ m}^2$$

Portanto, admitindo-se uma relação de 1,5 entre o comprimento do decantador (L_d) e a sua largura (B):

$$A_{\text{su}} = B \times L_d = 1,5B \times B = 5,74 \text{ m}^2 \rightarrow B = 1,96 \text{ m}$$

A largura de projeto dos decantadores será de 2 metros.

4.3.3 Comprimento do decantador (L_d)

Utilizando a área útil, foi encontrado o comprimento útil:

$$L_{\text{útil}} = \frac{A_{\text{útil}}}{B} = \frac{4,97}{2} = 2,49 \text{ m}$$

Dividindo o comprimento útil pelo espaçamento entre as placas, foi definido o número de espaçamentos entre as placas (N_e):

$$N_e = \frac{L_{\text{útil}}}{w} = \frac{2,49}{6} = 41,5 \rightarrow \text{serão adotados 42 espaçamentos entre placas}$$

Portanto, o número de placas (N_{placas}) será:

$$N_{\text{placas}} = N_e + 1 = 42 + 1 = 43 \text{ placas}$$

Cálculo do comprimento do decantador perpendicular as placas (L_p):

$$L_p = N_e \times e_p + N_{\text{placas}} \times \text{Esp} = 42 \times 6 + 43 \times 0,5 = 273,5 \text{ cm}$$

Cálculo do comprimento do decantador relativo ao plano horizontal (L):

$$L = l \times \cos \theta + \frac{L_p}{\text{sen} \theta} = 1,2 \times \cos 60^\circ + \frac{2,735}{\text{sen} 60^\circ} = 3,76 \text{ m}$$

Para facilitar o processo construtivo, será adotado um comprimento de 4 metros.

Recalculando o comprimento do decantador relativo ao plano horizontal:

$$L = l \times \cos \theta + \frac{L_p}{\text{sen} \theta} \rightarrow 4,0 = 1,2 \times \cos 60^\circ + \frac{L_p}{\text{sen} 60^\circ} \rightarrow L_p = 2,94 \text{ m}$$

A partir deste novo comprimento, é recalculado o número de espaçamentos entre as placas:

$$L_p = N_e \times e_p + N_{\text{placas}} \times \text{Esp}$$

$$N_{\text{placas}} = N_e + 1$$

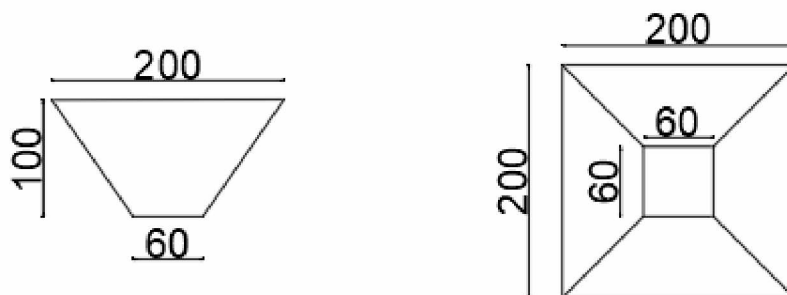
$$294 = N_e \times 6 + (N_e + 1) \times 0,5 \rightarrow N_e = 45,15$$

Portanto, em projeto, os decantadores terão 45 espaçamentos entre placas e, conseqüentemente, 46 placas planas paralelas.

4.3.4 Poços de lodo

Para remoção do lodo sedimentado, o fundo dos decantadores será constituído de poços de lodo em formato de tronco de pirâmide invertido, com 1 metro de altura e dimensões quadradas de 2 metros na parte superior e 0,6m na inferior, como detalhado na Figura 14.

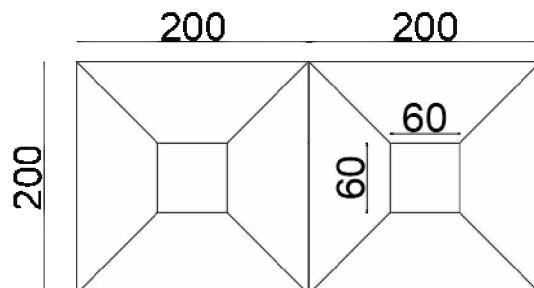
Figura 14 – Poços de lodo (unidades em centímetros)



Fonte: Autor (2018)

Portanto, considerando as dimensões já definidas dos decantadores, o arranjo do fundo dos mesmos será feito com 2 poços de lodo, como ilustrado na Figura 15.

Figura 15 – Fundo do decantador (unidades em centímetros)

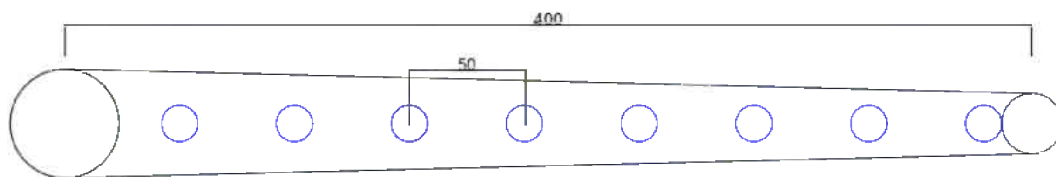


Fonte: Autor (2018)

4.3.5 Tubulação de distribuição de água floculada

A água floculada chegará nos decantadores por uma tubulação de água floculada (Figura 16) com orifícios laterais que distribuirão a água ao longo de todo o comprimento do decantador. Serão 16 orifícios no total, 8 de cada lado, com espaçamento de 0,5 metros centro a centro. Para manter o gradiente de velocidade, o diâmetro da tubulação deverá ser reduzido, conforme a água floculada sai da tubulação e entra no decantador.

Figura 16 – Tubulação de água floculada (unidades em centímetros)



Fonte: Autor (2018)

Adotou-se um gradiente de velocidade no início do decantador igual a 10 s^{-1} , idêntico ao apresentado no final da unidade de floculação. Considerando a vazão em cada decantador de 25 L/s e aplicando a equação (8), foi calculado o diâmetro inicial da tubulação:

$$10 = \sqrt{\frac{32 \times 1000 \times 0,03 \times 0,025^3}{10^{-4} \times 9,81 \times \pi^3 \times D^7}} \rightarrow D = 0,468 \rightarrow \text{DN } 450$$

Recalculado o gradiente de velocidade para o diâmetro de projeto:

$$G = \sqrt{\frac{32 \times 1000 \times 0,03 \times 0,025^3}{10^{-4} \times 9,81 \times \pi^3 \times 0,450^7}} = 11,48 \text{ s}^{-1}$$

Para o diâmetro no meio da tubulação, também foi utilizada a equação (8), considerando agora a vazão igual à metade da inicial.

$$10 = \sqrt{\frac{32 \times 1000 \times 0,03 \times 0,0125^3}{10^{-4} \times 9,81 \times \pi^3 \times D^7}} \rightarrow D = 0,348 \rightarrow \text{DN 350}$$

Recalculado o o gradiente de velocidade para o diâmetro de projeto:

$$G = \sqrt{\frac{32 \times 1000 \times 0,03 \times 0,0125^3}{10^{-4} \times 9,81 \times \pi^3 \times 0,350^7}} = 9,79 \text{ s}^{-1}$$

Cálculo da vazão de cada orifício ($Q_{\text{orifício}}$):

$$Q_{\text{orifício}} = \frac{0,025}{16} = 0,0015625 \text{ m}^3/\text{s}$$

Utilizando a equação (8) para definição do diâmetro dos orifícios:

$$10 = \sqrt{\frac{32 \times 1000 \times 0,03 \times 0,0015625^3}{10^{-4} \times 9,81 \times \pi^3 \times D^7}} \rightarrow D_{\text{orifícios}} = 0,143 \rightarrow D_{\text{orifícios,proj}} = 0,15 \text{ m}$$

Recalculando o gradiente de velocidade nos orifícios:

$$G_{\text{orifício}} = \sqrt{\frac{32 \times 1000 \times 0,03 \times 0,0015625^3}{10^{-4} \times 9,81 \times \pi^3 \times 0,15^7}} = 8,39 \text{ s}^{-1}$$

A distância entre as faces externas dos orifícios ($L_{\text{orifícios}}$) será:

$$L_{\text{orifícios}} = 0,5 - 0,15 = 0,35 \text{ m}$$

A Figura 17 detalha as dimensões dos orifícios.

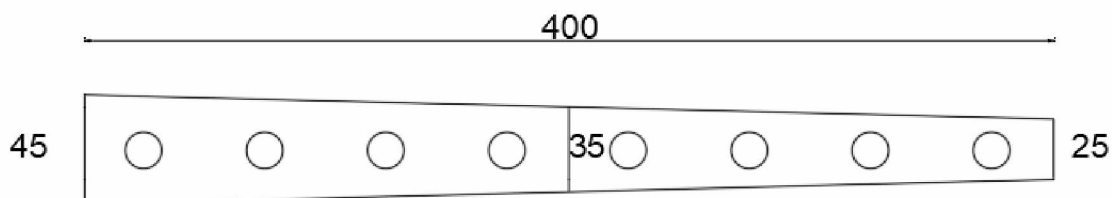
Figura 17 – Dimensões dos orifícios (unidades em centímetros)



Fonte: Autor (2018)

A Figura 18 representa o corte longitudinal da tubulação de água filtrada com suas dimensões definidas.

Figura 18 – Corte com diâmetros da tubulação de distribuição de água floculada (unidades em centímetros)

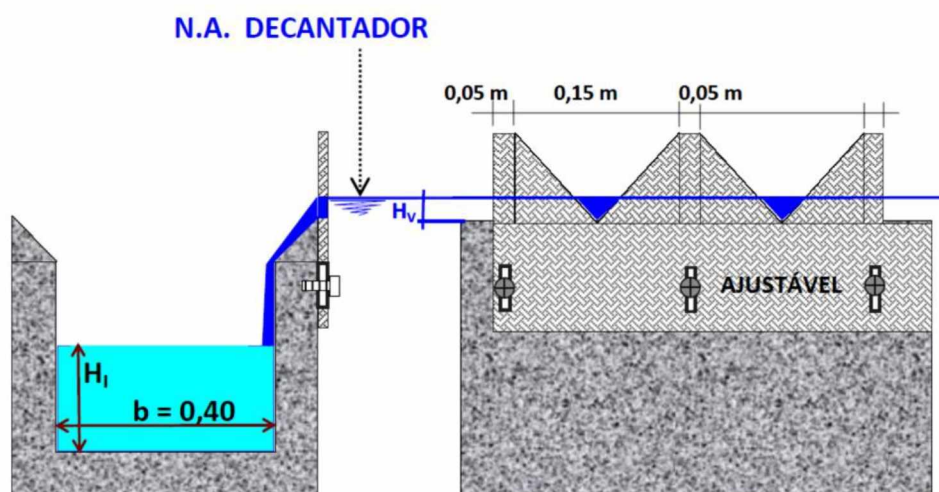


Fonte: Autor (2018)

4.3.6 Calha longitudinal central de coleta de água decantada

A calha longitudinal central de coleta de água decantada será provida de vertedores triangulares, sendo 5 vertedores por metro de calha, como ilustra a Figura 19:

Figura 19 - Calha de coleta de água decantada



Fonte: Autor (2019)

A calha de coleta de água decantada possuirá 4 metros de comprimento, portanto, o comprimento de borda será de 8 metros. Cálculo da vazão por metro de borda (q):

$$q = \frac{Q_{calha} \left(\frac{L}{s} \right)}{8 \text{ (m de borda)}} = \frac{25}{8} = 3,125 \frac{L}{s \cdot m}$$

O cálculo da altura máxima de água na calha foi feito utilizando a equação (9):

$$0,025 = 1,38 * 0,40 * Hm^{\frac{3}{2}}$$

$$Hm = 0,13 \text{ m}$$

Para calha metálica (espessura de parede desprezível), com borda livre de 0,17 m, a altura total da calha será de 0,30 m.

O cálculo da altura máxima de água nos vertedores foi feito utilizando a equação (10):

$$\frac{0,003125}{5} = 1,4 Hv^{\frac{5}{2}}$$

$$Hv = 0,046 \text{ m}$$

4.3.7 Tubulação de descarga de lodo

A distância adotada entre o fundo dos poços de lodo e a saída da tubulação de descarga foi de 0,5 m, portanto, a altura (Ht) da borda da calha à saída da tubulação de descarga será:

$$Ht = 0,3 + 0,5 + 1,04 + 0,5 + 0,45 + 0,5 + 1 + 0,5 = 4,79 \text{ m.}$$

O cálculo do diâmetro da tubulação de descarga (Dd) foi feito utilizando a equação (11):

$$\frac{\pi * Dd}{4} = \frac{8 \sqrt{4,79}}{4850 * 0,5}$$

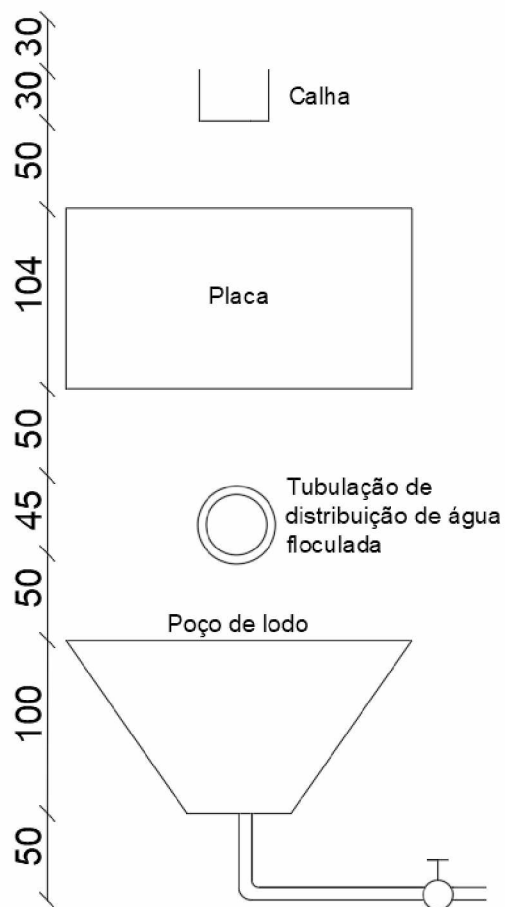
$$Dd = 0,10 \text{ m}$$

Portanto, será adotada tubulação de descarga de 150 mm, conforme preconização da NBR 2216:1992.

4.3.8 Dimensões do decantador

Foi adotada uma distância de 0,50 m entre os poços de lodo e a tubulação de água floculada, entre a tubulação de água floculada e as placas planas e também entre as placas planas e as calhas coletoras de água decantada. A borda livre acima da calha coletora de água decantada será de 0,30 m. O corte transversal dos decantadores, com as dimensões calculadas neste item, é ilustrado na Figura 20.

Figura 20 - Corte transversal dos decantadores (unidades em centímetros)

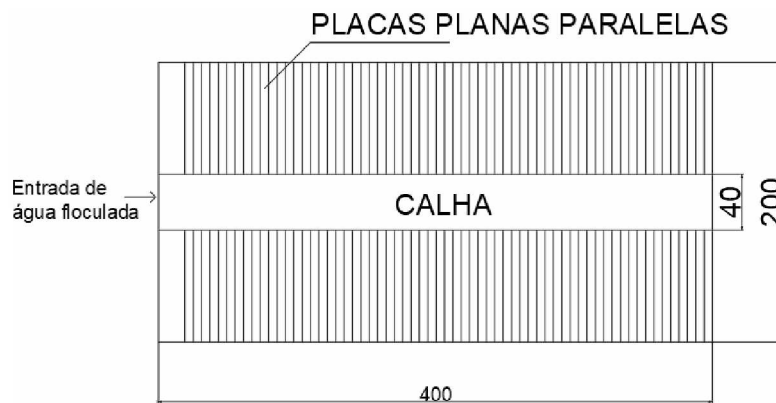


Fonte: Autor (2019)

Considerando a borda livre de 0,3 m, o decantador terá uma altura de 5,09 m.

A Figura 21 apresenta a vista do decantador em planta.

Figura 21 – Planta do decantador de alta taxa (unidades em centímetros)



Fonte: Autor (2019)

4.4 Filtração

Serão utilizados filtros rápidos por gravidade, com leito filtrante de camada única de areia, funcionando com taxa de filtração declinante variável. A lavagem dos filtros será efetuada a contracorrente, com água para lavagem proveniente de reservatório elevado, sendo lavado 1 filtro por vez.

4.4.1 Dimensões de cada filtro

Cálculo da volume de água filtrada diário considerando a ETA em funcionamento 24 horas por dia:

$$0,05 \times 86400 = 4320\text{m}^3/\text{dia}$$

Obedecendo as recomendações da ABNT NBR 12216:1992 para filtros de camada de areia única, foi estipulada taxa de filtração de $120 \left(\frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{dia}} \right)$. Portanto, aplicando a equação (12):

$$A_f = \frac{0,05 \times 86400}{120} = 36 \text{ m}^2$$

Também segundo a ABNT NBR 12216:1992, uma ETA deve possuir no mínimo 3 filtros. Portanto, no presente trabalho foram adotados 4 filtros, otimizando o funcionamento da filtração na ETA. Sendo assim,:

$$\text{Área de cada filtro} = \frac{36}{4} = 9\text{m}^2$$

Portanto, serão construídos filtros quadrados com 3 metros de lado.

4.4.2 Entrada de água decantada

A água decantada será conduzida aos filtros por canal de seção transversal retangular. A entrada de água em cada filtro se dará por vertedor retangular de 3 metros de soleira (largura do filtro), localizado na parede de entrada, acima do nível de água máximo de filtração. Portanto, altura de água no vertedor (HV):

$$\frac{0,05}{4} = 1,838 \times 3 \times HV^{\frac{3}{2}} \rightarrow HV = 0,02\text{m}$$

4.4.3 Características do leito filtrante

A Tabela 1, elaborada com base na ABNT NBR 12216:1992, apresenta as características do leito filtrante de camada única de areia.

Tabela 1 – Características do leito filtrante

Camada	Tamanho efetivo (mm)	Maior grão (mm)	Menor grão (mm)	Coefficiente de uniformidade (mm)	Espessura da camada (m)
Areia	0,45	1,2	0,35	1,5	0,55

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 12116:1992

4.4.4 Diâmetro da tubulação de água filtrada (DF)

De acordo com Vianna (2002), é recomendada velocidade de água na tubulação de água filtrada entre 0,8 m/s e 1,7 m/s. Para o cálculo do diâmetro da tubulação, utilizou-se uma velocidade de tubulação de água filtrada de 1,25 m/s:

$$\frac{0,05}{4} = \frac{1,25 \times \pi \times DF^2}{4} \rightarrow DF = 0,113 \rightarrow DN150$$

Recalculando a velocidade de projeto:

$$\frac{0,05}{4} = \frac{v \times \pi \times 0,15^2}{4} \rightarrow v_{FIL} = 0,71 \text{ m/s}$$

4.4.5 Lavagem dos filtros

Vazão de água para lavagem

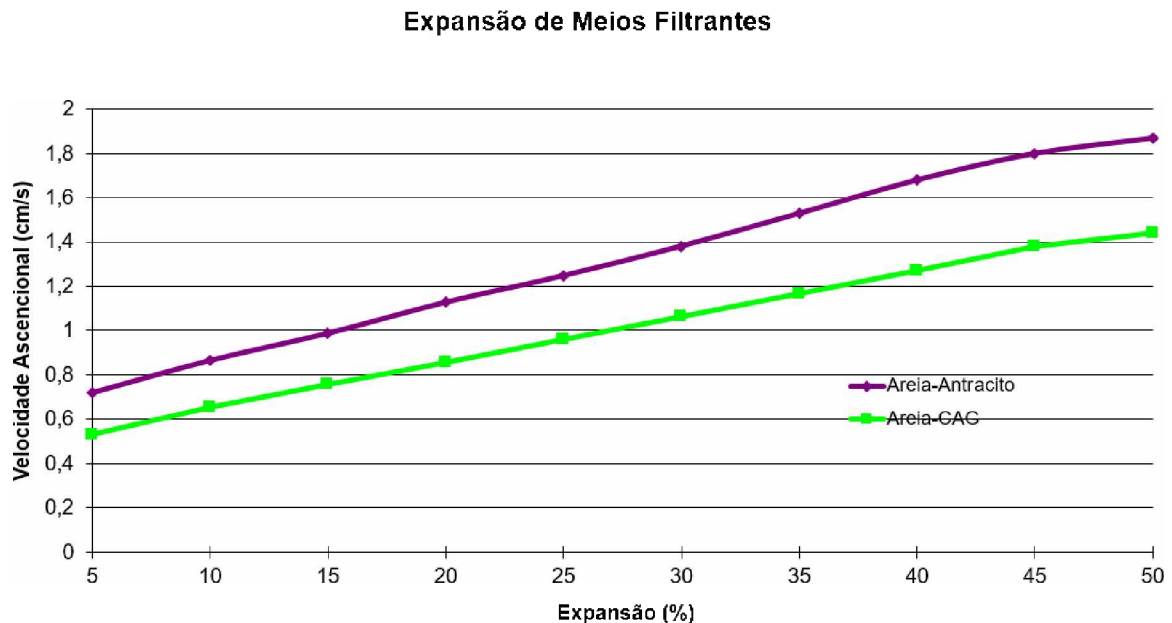
Para $v_{ASC} = 0,60 \text{ m/min} = 0,01 \text{ m/s}$:

$$Q_{lav} = 0,01 \times 9 = 0,09 \text{ m}^3/\text{s}$$

Expansão do leito filtrante

A Figura 22 apresenta o gráfico para determinação da expansão do meio filtrante de acordo com a velocidade ascensional.

Figura 22 – Expansão de meios filtrantes



Fonte: Ferreira Filho (2017)

Portanto, de acordo com a Figura 22, a expansão do leito filtrante será de 27%, dentro do recomendado pela NBR ABNT 12216:1992 (entre 20% e 30%).

Capacidade do reservatório de água para lavagem (CR)

Seguindo orientações da NBR ABNT 12216:1992:

$$CR \geq 2 \times 0,09 \times 10 \times 60 = 108 \text{ m}^3$$

Por segurança, a capacidade do reservatório de água para lavagem será de 150m³.

Diâmetro da tubulação de água para lavagem (Dlav)

Recomenda-se velocidade de água para lavagem entre 2 m/s e 4 m/s. Sendo assim, utilizou-se uma velocidade de 3 m/s para o cálculo do diâmetro da tubulação de água para lavagem:

$$0,09 = 3 \times \pi \times \frac{D_{lav}^2}{4} \rightarrow D_{lav} = 0,20\text{m} \rightarrow \text{DN200}$$

Recalculando a velocidade de água para lavagem:

$$0,09 = v_{LAV} \times \pi \times \frac{0,2^2}{4} \rightarrow v_{LAV} = 2,86 \text{ m/s}$$

Coleta de água de lavagem

A coleta de água de lavagem será efetuada através de 1 canal longitudinal lateral de 3 metros. Assim, utilizando a fórmula de Francis para vertedores, a altura de água sobre a borda do canal (HC) será:

$$0,09 = 1,838 \times 3 \times HC^{\frac{3}{2}} ; \rightarrow HC = 0,064\text{m}$$

Sendo a largura útil do canal adotada igual à 0,70 m, a altura de água no início do canal (HI) será:

$$0,09 = 1,838 \times 0,7 \times HI^{\frac{3}{2}} ; \rightarrow HI = 0,17\text{m}$$

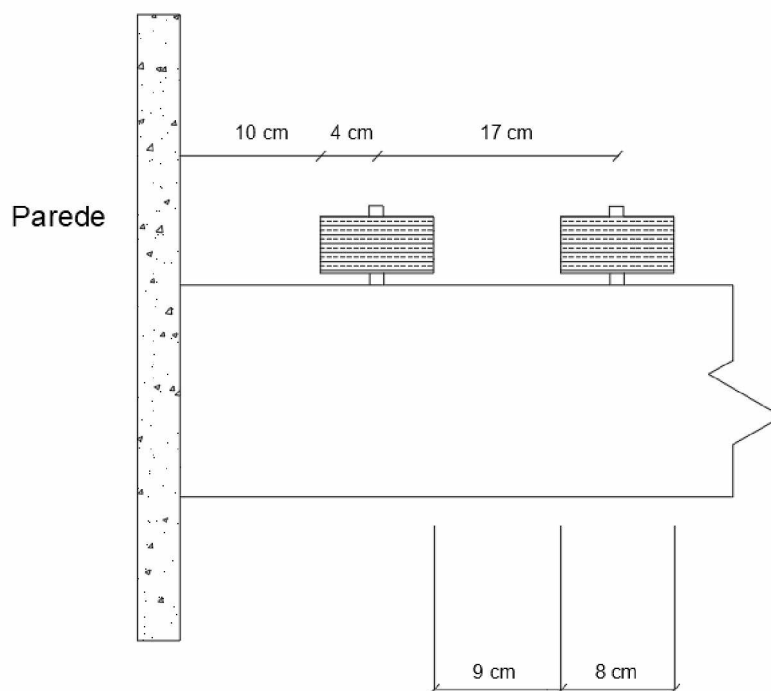
4.4.6 Fundo dos filtros

Após passagem pelo leito filtrante, a água chegará ao fundo do filtro, onde a passagem para tubulação de água filtrada ocorrerá por meio de crepinas localizadas em todo o fundo do filtro, organizadas em filas. Essa tubulação será direcionada para uma canaleta central no fundo do filtro, que escoará a água para a unidade de desinfecção.

Número de crepinas

A Figura 23 exemplifica as dimensões das crepinas localizadas no fundo dos filtros,

Figura 23 – Dimensões das crepinas (unidades em centímetros)



Fonte: Autor (2018)

Considerando as dimensões demonstradas na Figura 23, e filtro com dimensões quadradas de 3 metros, o número de espaços entre filas de blocos será:

$$\text{Nespaços} = \frac{3 - 2 \times 0,14}{0,17} \rightarrow = 16$$

Portanto, o número de crepinas por fila será:

$$\text{Ncrepinas} = \text{Nespaços} + 1 = 16 + 1 = 17$$

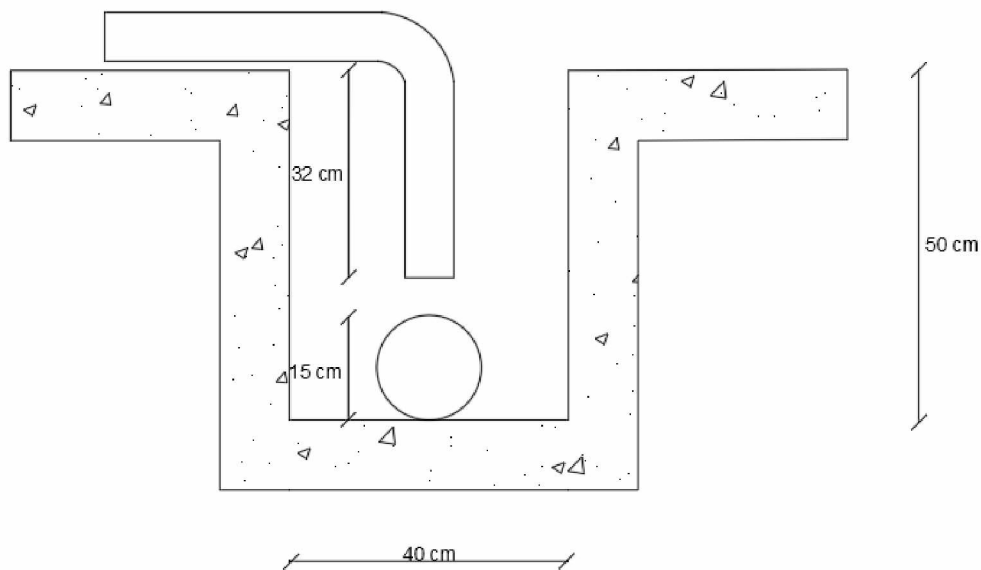
Como serão 17 filas, o número de crepinas por filtro será:

$$\text{Número de crepinas por filtro} = 17 \times 17 = 289 \text{ crepinas}$$

Altura vertical da tubulação de água para lavagem

A Figura 24 mostra o corte da canaleta localizada no fundo do filtro, que apresenta altura de 50 centímetros.

Figura 24 – Canaleta no fundo do filtro (unidades em centímetros)



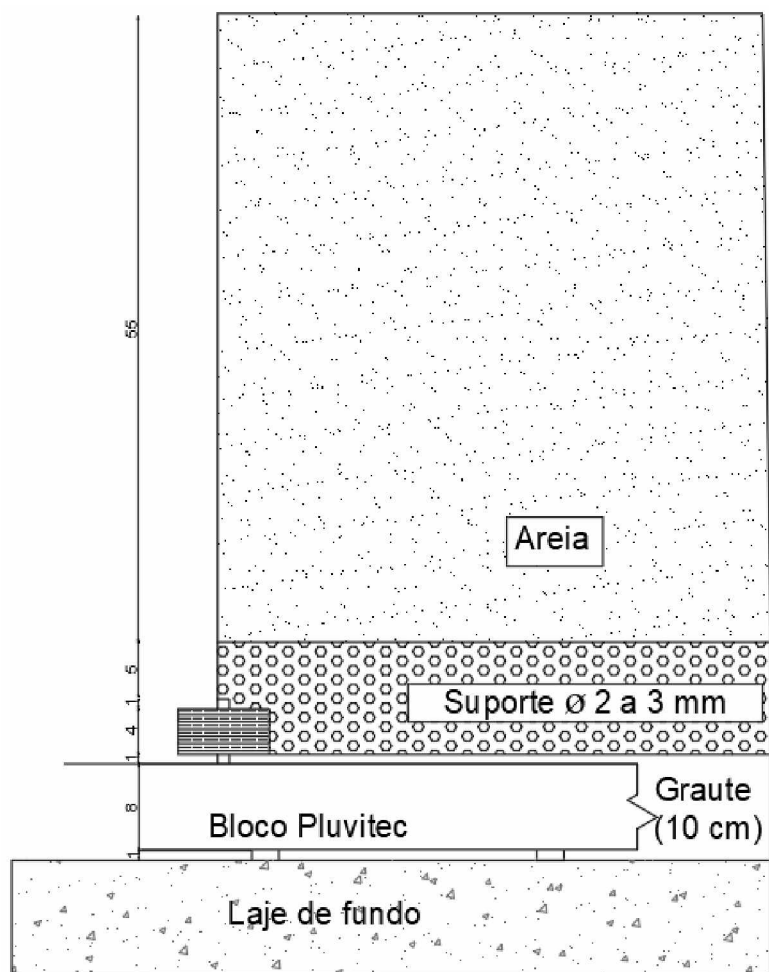
Fonte: Autor (2018)

4.4.5 Altura vertical

Altura da laje de fundo ao topo do leito filtrante

A Figura 25 representa um corte com as distâncias entre a laje de fundo e o topo do leito filtrante em repouso.

Figura 25 – Corte longitudinal do filtro (unidades em centímetros)



Fonte: Autor (2018)

Sendo assim, considerando as distâncias da Figura 25:

Altura da laje de fundo ao topo do leito filtrante = $1 + 8 + 1 + 4 + 1 + 5 + 55 = 75$ cm

Altura de expansão do leito filtrante sobre o topo do leito filtrante em repouso

Considerando a expansão de 27%:

Altura de expansão do leito filtrante = $0,27 \times 0,55 = 0,15$ m

Altura total do filtro

De acordo com a ABNT NBR 12216:1992, a altura mínima do topo do leito filtrante expandido à borda do canal de água de lavagem deve ser igual a 15% da dimensão do filtro perpendicular ao canal:

Altura mínima do topo do leito filtrante expandido à borda do canal = $0,15 \times 3 = 0,45$ m

Somando os valores obtidos, a altura mínima da laje de fundo à borda do canal de água de lavagem deve ser:

$$\text{Altura mínima} = 75 + 15 + 45 = 135 \text{ cm} = 1,35 \text{ m}$$

No caso, carga hidráulica disponível para filtração acima do topo do leito filtrante em repouso:

$$\text{Carga hidráulica} = 0,15 + 0,45 = 0,60 \text{ m}$$

A carga hidráulica sobre o topo do leito filtrante em repouso corresponde à perda de carga inicial que ocorre com o filtro recém lavado (fixa) acrescida da carga hidráulica para retenção de impurezas (variável durante a carreira de filtração). Para a manutenção de carreiras de filtração adequadas (24 horas como referência), Azevedo Netto (1987) cita a faixa de 1,40 m a 1,60 m para altura de água sobre o topo do leito filtrante em repouso. Cita também que, para taxas de filtração de até 150 m³/m².dia, essa altura deverá ser de, no mínimo, 1,20m.

No presente trabalho deverá ser adotada a altura de água, sobre o topo do leito filtrante em repouso, de 1,60 m. A borda de descarga no canal de água de lavagem deverá situar-se 0,30 m acima do nível de água máximo de filtração.

$$\text{Altura interna do filtro} = 0,30 + 1,60 + 0,55 + 0,10 + 0,10 = 2,65 \text{ m}$$

Somando a altura interna do filtro à altura da canaleta central de coleta de água filtrada:

$$\text{Altura vertical} = 2,65 + 0,50 = 3,15 \text{ m}$$

4.6.8 Perdas de carga

Para dimensionamento das unidades de Filtração, deverão ser consideradas as perdas de carga água durante a lavagem dos filtros e durante a filtração. No primeiro caso, para compensar essas perdas de carga, a lâmina de água deve possuir uma altura (H1) acima do leito filtrante. nas tubulações que partem do reservatório de água para lavagem até o filtro. Enquanto no segundo caso, deve ser acrescida uma altura (H2) nas tubulações que partem do reservatório de água para lavagem até o filtro.

As perdas de carga localizadas foram calculadas utilizando o método dos comprimentos equivalentes, consultando a Tabela 2.

Tabela 2 – Comprimentos equivalentes

Comprimentos equivalentes a perdas localizadas. (Expressos em metros de canalização retilínea)*

DIÂMETRO D mm pul	COTOVELO 90°		RAIO LONGO		COTOVELO 90°		RAIO MÉDIO		COTOVELO 90°		RAIO CURTO		COTOVELO 45°		CURVA 90°	R/D=11	CURVA 90°	R/D=1	CURVA 45°	ENTRADA NORMAL	ENTRADA DE BORDA	REGISTRO DE GAVETA ABERTO	REGISTRO DE GLOBO ABERTO	REGISTRO DE ÂNGULO ABERTO	TÉ PASSAGEM DIRETA	TÉ SAÍDA DE LADO	TÉ SAÍDA BILATERAL	VÁLVULA DE PE E CRIVO	SAÍDA DA CANALIZ.	VÁLVULA DE RETENÇÃO TIPO LEVE	VÁLVULA DE RETENÇÃO TIPO PLANADO
	mm	pul	mm	pul	mm	pul	mm	pul	mm	pul	mm	pul	mm	pul	mm	pul	mm	pul	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
13	1/2	0,5	0,4	0,5	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,4	0,1	4,9	2,6	0,3	1,0	1,0	3,6	0,4	1,1	1,6	
19	3/4	0,4	0,6	0,7	0,1	0,3	0,4	0,2	0,2	0,5	0,1	6,7	3,6	0,4	1,4	1,4	5,6	0,5	1,6	2,4	0,5	0,1	6,7	3,6	0,4	1,4	1,4	5,6	0,5	1,6	2,4
25	1	0,5	0,7	0,8	0,4	0,3	0,5	0,2	0,3	0,7	0,2	8,2	4,6	0,5	1,7	1,7	7,3	0,7	2,1	3,2	0,2	0,2	8,2	4,6	0,5	1,7	1,7	7,3	0,7	2,1	3,2
32	1 1/4	0,7	0,9	1,1	0,5	0,4	0,6	0,3	0,4	0,9	0,2	11,3	5,6	0,7	2,1	2,3	10,0	0,9	2,7	4,0	0,2	0,2	11,3	5,6	0,7	2,1	2,3	10,0	0,9	2,7	4,0
38	1 1/2	0,9	1,1	1,3	0,6	0,5	0,7	0,3	0,5	1,0	0,3	13,4	6,7	0,9	2,8	2,8	11,6	1,0	3,2	4,8	0,3	0,3	13,4	6,7	0,9	2,8	2,8	11,6	1,0	3,2	4,8
50	2	1,1	1,4	1,7	0,8	0,6	0,9	0,4	0,7	1,5	0,4	17,4	8,5	1,1	3,5	3,5	14,0	1,5	4,2	6,4	0,4	0,4	17,4	8,5	1,1	3,5	3,5	14,0	1,5	4,2	6,4
63	2 1/2	1,3	1,7	2,0	0,9	0,8	1,0	0,5	0,9	1,9	0,4	21,0	10,0	1,3	4,3	4,3	17,0	1,9	5,2	8,1	0,5	0,5	21,0	10,0	1,3	4,3	4,3	17,0	1,9	5,2	8,1
75	3	1,6	2,1	2,5	1,2	1,0	1,3	0,6	1,1	2,2	0,5	26,0	13,0	1,6	5,2	5,2	20,0	2,2	6,3	9,7	0,6	0,6	26,0	13,0	1,6	5,2	5,2	20,0	2,2	6,3	9,7
100	4	2,1	2,8	3,4	1,5	1,3	1,6	0,7	1,6	3,2	0,7	34,0	17,0	2,1	6,7	6,7	23,0	3,2	8,4	12,9	0,7	0,7	34,0	17,0	2,1	6,7	6,7	23,0	3,2	8,4	12,9
125	5	2,7	3,7	4,2	1,9	1,6	2,1	0,9	2,0	4,0	0,9	43,0	21,0	2,7	8,4	8,4	30,0	4,0	10,4	16,1	0,9	0,9	43,0	21,0	2,7	8,4	8,4	30,0	4,0	10,4	16,1
150	6	3,4	4,3	4,9	2,3	1,9	2,5	1,1	2,5	5,0	1,1	51,0	26,0	3,4	10,0	10,0	39,0	5,0	12,5	19,3	1,1	1,1	51,0	26,0	3,4	10,0	10,0	39,0	5,0	12,5	19,3
200	8	4,3	5,5	6,4	3,0	2,4	3,3	1,5	3,3	8,0	1,4	67,0	34,0	4,3	13,0	13,0	52,0	6,0	16,0	25,0	1,4	1,4	67,0	34,0	4,3	13,0	13,0	52,0	6,0	16,0	25,0
250	10	5,5	6,7	7,9	3,8	3,0	4,1	1,8	4,5	7,5	1,7	85,0	43,0	5,5	16,0	16,0	65,0	7,5	20,0	32,0	1,7	1,7	85,0	43,0	5,5	16,0	16,0	65,0	7,5	20,0	32,0
300	12	6,1	7,9	9,5	4,6	3,6	4,8	2,2	5,5	9,0	2,1	102,0	51,0	6,1	19,0	19,0	78,0	9,0	24,0	38,0	2,1	2,1	102,0	51,0	6,1	19,0	19,0	78,0	9,0	24,0	38,0
350	14	7,3	9,5	10,5	5,3	4,4	5,4	2,5	6,2	11,0	2,4	120,0	60,0	7,3	22,0	22,0	90,0	11,0	28,0	45,0	2,4	2,4	120,0	60,0	7,3	22,0	22,0	90,0	11,0	28,0	45,0

*Os valores indicados para registros de globo aplicam-se também às torneiras, válvulas para chuveiros e válvulas de descarga

Fonte: Macyntire (1997)

H1 – Perdas de carga durante a filtração

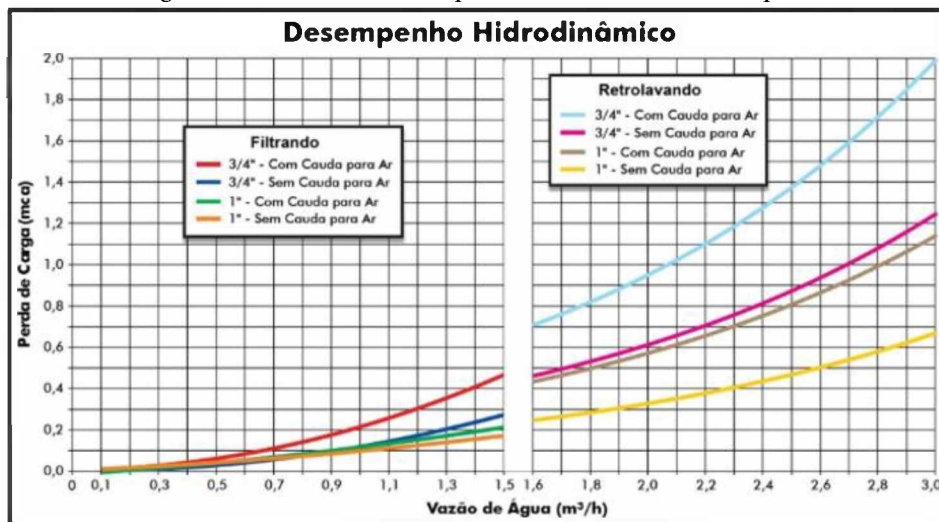
Para cálculo da perda de carga nas crepinas durante a filtração ($H_{crep,filtr}$), é necessário o calculo da vazão de água em cada crepina, a partir da vazão de cada filtro de 12,5 L/s.

$$\text{Vazão do filtro} = 0,0125 \text{ m}^3/\text{s} = 45 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$\text{Vazão/crepina} = \frac{45}{289} = 0,16\text{m}^3/\text{h}$$

De acordo com o catálogo da Hidro Solo (Figura 26) de desempenho hidrodinâmico:

Figura 26 – Gráfico de desempenho hidrodinâmico das crepinas



Fonte: HIDRO SOLO (2018)

Com diâmetro do tubo vertical de ligação da crepina com a tubulação do ramal de 3/4" sem cauda para a e vazão de 0,16m³/h:

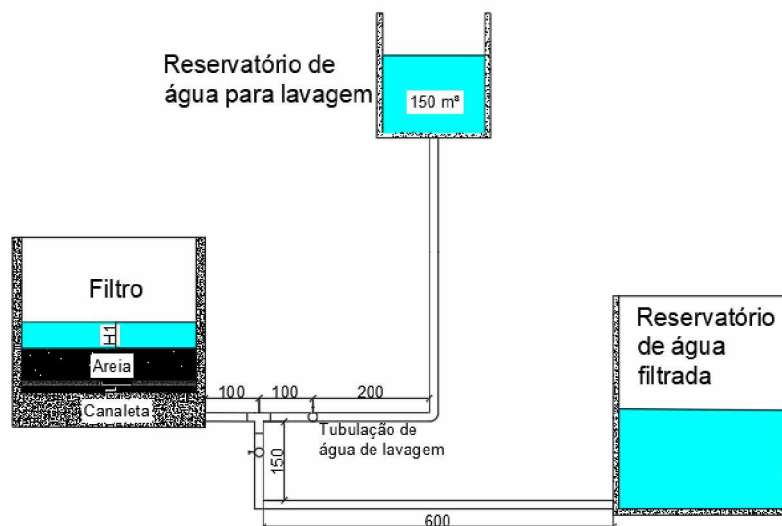
$$H_{\text{crep,filtr}} = 0,02 \text{ m}$$

Cálculo da perda de carga da camada de areia na filtração ($H_{\text{areia, filtr}}$):

$$\frac{H_{\text{areia}}}{\text{TF}} = 0,005 \times \text{TF} \rightarrow H_{\text{areia, filtr}} = 0,005 \times 120 \times 0,55 \rightarrow H_{\text{areia, filtr}} = 0,33 \text{ m}$$

Para cálculo da perda de carga nas tubulações durante a filtração (h_{filtr}), é necessário somar as perdas de carga distribuída e localizada em todo o percurso. Portanto com os dados da Figura 27 e da Tabela 2, a soma do comprimento das tubulação de água filtrada e dos comprimento equivalente (L_{filtr}) será:

Figura 27 – Corte longitudinal da tubulação de água filtrada



Fonte: Autor (2018)

$$L_{\text{filtr}} = 1 + 1,5 + 6 + 10(\text{Tê saída de lado}) + 1,1 (\text{registro de gaveta aberto}) + 1,9 (\text{curva } 90^\circ) = 21,5 \text{ m}$$

Aplicando a equação (3):

$$h_{\text{filtr}} = \frac{8 \times 0,03 \times 21,5 \times 0,0125^2}{9,81 \times \pi^2 \times 0,15^5} = 0,11 \text{ m}$$

Somando todas as perdas de carga, a perda de carga total durante a filtração será:

$$H_1 = 0,11 + 0,02 + 0,33 \rightarrow H_1 = 0,46 \text{ m}$$

H2 – Perda de carga durante a lavagem

Para cálculo da perda de carga nas crepinas durante a lavagem também foi utilizado o catálogo da Hidro Solo (Figura 26). Considerando ramal de 1,50 m e velocidade

ascensional de 65 cm/min. Esta velocidade ascensional é próxima da velocidade de 60 cm/min utilizada neste trabalho. A perda de carga será:

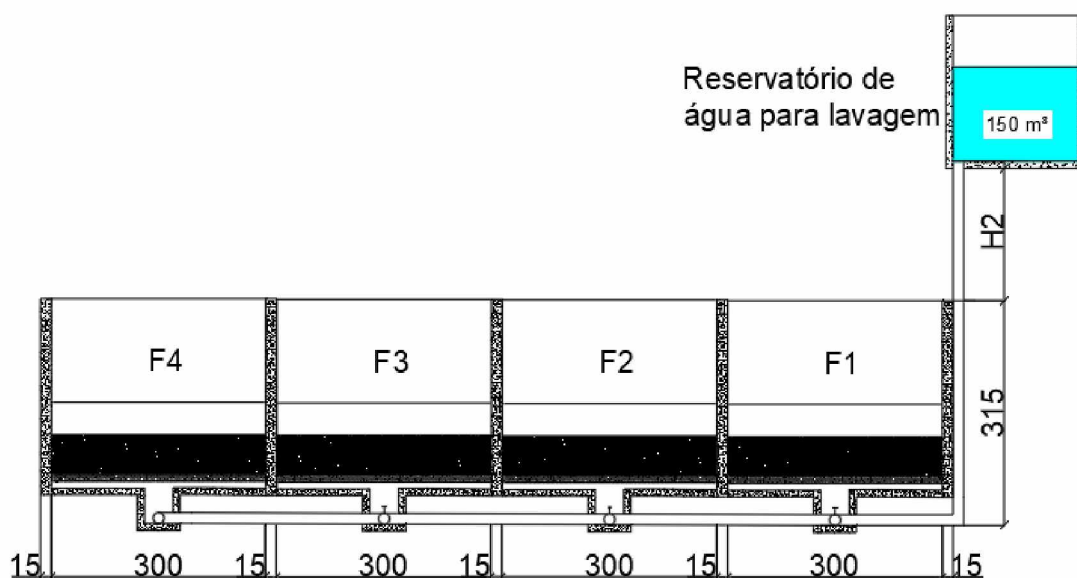
$$H_{\text{crep,lav}} = 0,25\text{m}$$

Considerando a perda de carga na camada de areia durante a lavagem igual a 96% da altura do leito filtrante:

$$H_{\text{areia,lav}} = 0,96 \times 0,55 \rightarrow H_{\text{areia,lav}} = 0,53 \text{ m}$$

A Figura 28 mostra o corte longitudinal da tubulação de água para lavagem, sendo que o complemento do caminho da água de lavagem já foi mostrado na Figura 24, sendo possível determinar o comprimento de todo o caminho do reservatório de água para lavagem até os filtros.

Figura 28 – Corte longitudinal da tubulação de água para lavagem



Fonte: Autor (2018)

Comparando os dois filtros com maior perda de carga, no caso, os mais distantes, é possível ver que o terceiro filtro possui uma maior perda de carga localizada, enquanto o quarto filtro possui maior perda de carga distribuída. Utilizando a Tabela 2 e as Figuras 24 e 25, foram calculados os comprimentos equivalentes L3 e L4, dos filtros 3 e 4, respectivamente:

$$L_3 = L_{\text{dist}} + L_{\text{loc}} = 2 + 1 + 1 + 1,5 + 0,15 + 3 + 0,15 + 3 + 0,15 + 3,15 + h_1 + 3 \times 4,3$$

(Tê passagem direta) + 13(Tê saída de lado) + 1,4 (registro de gaveta aberto)

$$L_3 = (42,40 + h_1) \text{ m}$$

$$L4 = L_{\text{dist}} + L_{\text{loc}} = 2 + 1 + 1 + 1,5 + 0,15 + 3 + 0,15 + 3 + 0,15 + 3 + 0,15 + 3,15 + h_1 + 4 \times 4,3 \text{ (Tê passagem direta)} + 2,4 \text{ (curva } 90^\circ) + 1,4 \text{ (registro de gaveta aberto)}$$

$$L4 = (39,25 + h_1) \text{ m}$$

Portanto, a maior perda de carga nas tubulações ocorre na lavagem do filtro 3. Somando o comprimento equivalente com as perdas de carga para encontrar o valor do comprimento total ($L_{\text{total,lav}}$):

$$L_{\text{total,lav}} = 0,25 + 0,53 + 42,40 + h_{\text{lav}} = 43,18 + h_{\text{lav}}$$

Aplicando a equação (3):

$$h_{\text{lav}} = \frac{8 \times 0,03 \times (43,18 + h_{\text{lav}}) \times 0,09^2}{9,81 \times \pi^2 \times 0,2^5} = 2,71 + 0,063 h_{\text{lav}} = 2,89 \text{ m}$$

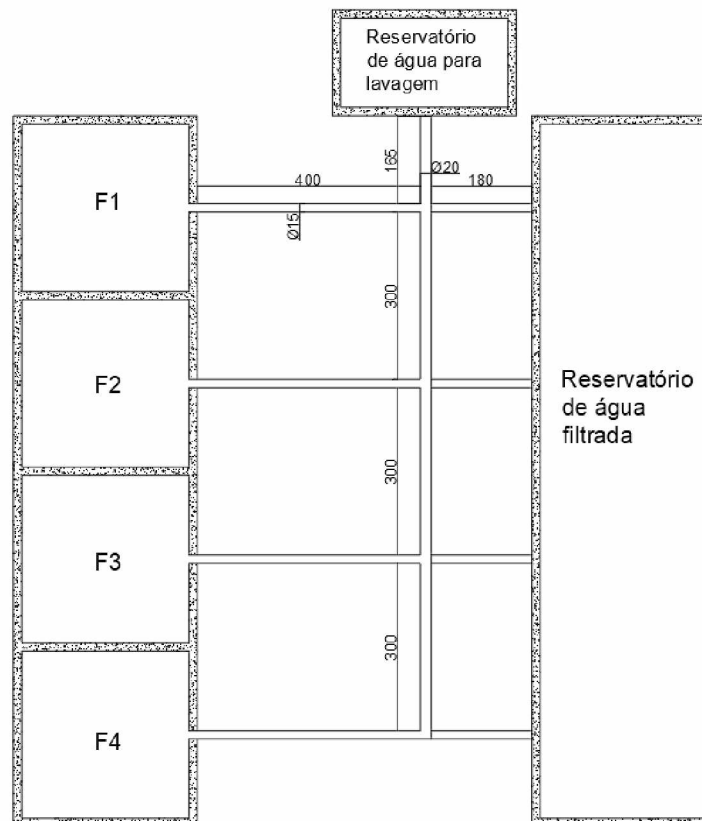
Somando todas as perdas de carga, a perda de carga total durante a lavagem será:

$$H_2 = 0,25 + 0,53 + 2,89 \rightarrow H_2 = 3,67 \text{ m}$$

Para facilitar o processo construtivo, será adotada uma altura H_2 de 3,70 m.

A Figura 29 apresenta o projeto em planta da Unidade de Floculação.

Figura 29 – Planta da Unidade de Filtração (unidades em centímetros)



Fonte: Autor (2019)

4.5 Desinfecção

O sistema de desinfecção da ETA utiliza o hipoclorito de sódio como desinfetante. Também será realizada nesta unidade a fluoretação, utilizando flúor, e a correção de pH, por meio da cal hidratada.

4.5.1 Tempo de contato

O tempo de contato mínimo para desinfecção é definido pela Tabela 3, retirada da Portaria 2914/2011.

Tabela 3 - Tempo de contato mínimo para a desinfecção por meio da cloração.

C ⁽²⁾	Temperatura = 20°C							Temperatura = 25°C							Temperatura = 30°C						
	Valores de pH							Valores de pH							Valores de pH						
	≤6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	≤6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	≤6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0
≤ 0,4	14	17	20	25	29	34	40	9	12	14	18	21	24	28	6	8	10	12	15	17	20
0,6	10	12	14	17	21	24	28	7	8	10	12	15	17	20	5	6	7	9	10	12	14
0,8	7	9	11	14	16	19	22	5	6	8	10	11	13	16	3	5	6	7	8	10	11
1,0	6	8	9	11	13	16	18	4	5	6	8	9	11	13	3	4	5	6	7	8	9
1,2	5	7	8	10	11	13	16	4	5	5	7	8	10	11	3	3	3	5	6	7	8
1,4	5	6	7	9	10	11	14	3	4	5	6	7	8	10	2	3	3	4	5	6	7
1,6	4	5	6	8	9	11	12	3	4	4	5	6	7	9	2	3	3	4	4	5	6
1,8	4	5	6	7	8	10	12	3	3	4	5	6	7	8	2	2	3	3	4	5	6
2,0	3	4	5	6	7	9	10	2	3	4	4	5	6	7	2	2	3	3	4	4	5
2,2	3	4	5	6	7	8	9	2	3	3	4	5	6	7	2	2	2	3	3	4	5
2,4	3	4	4	5	6	8	9	2	3	3	4	4	5	6	2	2	2	3	3	4	4
2,6	3	3	4	5	6	7	8	2	2	3	3	4	5	6	1	2	2	3	3	4	4
2,8	3	3	4	5	6	7	8	2	2	3	3	4	5	5	1	2	2	2	3	3	4
3,0	2	3	4	4	5	6	7	2	2	3	3	4	4	5	1	2	2	3	3	3	4

Fonte: Portaria 2914 (2011)

Considerando os seguintes parâmetros:

Residual de cloro livre na saída do tanque de contato (C) = 1 mg/L

Temperatura da água (T) = 20°C (temperatura ambiente para a região Sudeste)

pH de desinfecção = 7,0

Portanto, segundo a Portaria 2914/2011, o tempo de contato mínimo é de 9 minutos. Porém, para otimizar a qualidade do processo será utilizado um tempo de contato de 25 minutos.

4.5.2 Volume do tanque

Aplicando a equação (1):

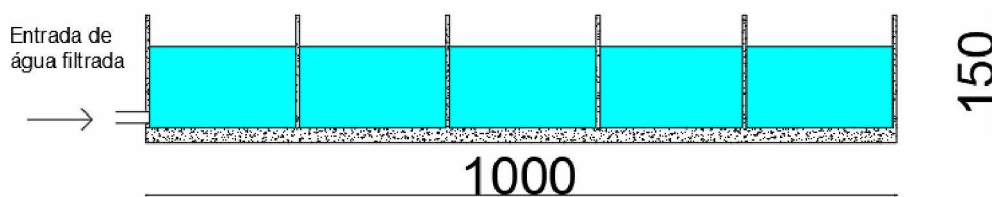
$$V = 0,05 \times 25 \times 60 = 75 \text{ m}^3$$

Adotando para o projeto uma altura do tanque (h) de 1,5 metros:

$$\text{Área do Tanque} = \frac{V}{h} = \frac{75}{1,5} = 50 \text{ m}^2$$

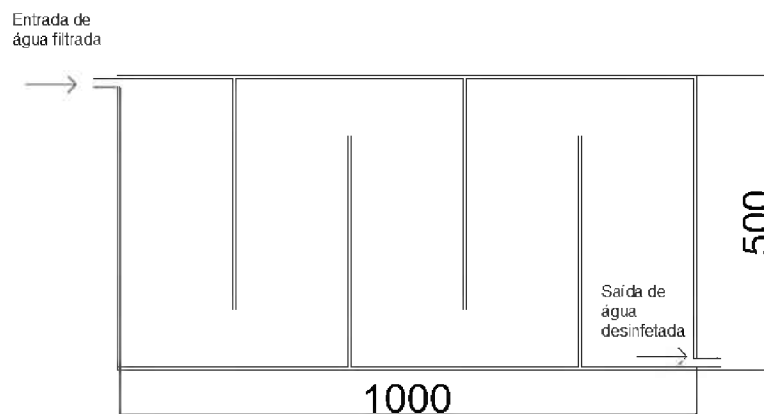
Será construído um tanque com comprimento de 10 metros e largura de 5 metros, além da altura já determinada de 1,5 metros. Serão construídas chicanas a cada 2 m de tanque, visando a maior dispersão do desinfetante, por meio da agitação gerada pelo contato da água com as paredes. Os detalhes do corte de contato podem ser vistos nas Figuras 30 e 31.

Figura 30 – Corte longitudinal do tanque de contato (unidades em centímetros)



Fonte: Autor (2019)

Figura 31 – Planta do tanque de contato (unidades em centímetros)



Fonte: Autor (2019)

Os esquema completos da ETA em planta e em corte se encontram nos Anexos A e B, respectivamente.

5. Análise de resultados

No presente trabalho, foram estudadas concepções alternativas de unidades componentes de uma estação de tratamento de água de Ciclo Completo, de baixo custo e de operação simplificada, podendo ser utilizadas em projetos e ampliações desses sistemas. Com base na ABNT NBR 12216:1992 e na Portaria nº 2914/2011, do Ministério da Saúde, complementadas pela literatura consultada, foi feito o dimensionamento de cada unidade componente da ETA, avaliando, individualmente, suas características e eficiências, objetivo principal desse trabalho. Para cada unidade componente da ETA, foram apresentados esquemas, com dimensões, para compreensão do seu funcionamento, em situação dinâmica de operação. Apesar de amplamente conhecido o fluxograma de funcionamento de uma ETA de Ciclo Completo, o arranjo físico definitivo dependerá de outros fatores, que incluem o levantamento plani-altimétrico do local de sua instalação. Essas condições definirão o perfil hidráulico geral de funcionamento da ETA, um dos componentes de um projeto executivo. Análise simplificada dos resultados obtidos é feita a seguir.

Para fixação da vazão de projeto da ETA, do presente trabalho, em 50 L/s, admitiu-se sistema de abastecimento de água com funcionamento de 24 h/dia, para atendimento exclusivo à população (inexistência de consumos especiais) e que a ETA contará com sistema de recuperação e condução, ao início do tratamento, da fase líquida das águas residuárias geradas na lavagem de filtros e na descarga de lodo dos decantadores, não desenvolvido nesse trabalho. Assim, a vazão de projeto da ETA será equivalente à vazão média consumida no dia de maior consumo. Considerando a cota média per capita de

consumo de água de $200 \frac{\text{L}}{\text{hab. dia}}$ e que o consumo de água no dia de maior consumo, é

20% superior ao consumo médio diário (valores de referência), a população de projeto atendida será de 18000 habitantes, o que confere a essa comunidade a classificação de pequena cidade (cidade pequena), por seu porte populacional ser inferior a 100000 habitantes (IBGE, 2019).

Em parte dessas cidades classificadas como pequenas, os serviços de abastecimento de água são oferecidos por concessionárias com baixa capacidade de investimento e captação de recursos em todos os níveis, podendo ser beneficiadas com a utilização de soluções simplificadas e eficientes para a prestação de seus serviços, desde a fase de projeto até as fases de implantação e operação dos sistemas, como as propostas na concepção de unidades componentes da ETA, objeto do presente trabalho. Unidades componentes da ETA podem se projetadas com soluções alternativas de baixo custo, porém de eficiência que pode ser comprovada, podendo também contar com materiais atualizados, de fácil implantação e manutenção, como componentes de unidades projetadas.

Não consta desse trabalho o dimensionamento da adutora que conduz a água bruta da captação até a ETA, admitida em ferro fundido. Na chegada dessa adutora à ETA, será

feita a conexão, para funcionamento em série, do trecho de tubulação DN 200, de 8 m de comprimento, onde será promovida a Mistura Rápida. No início desse trecho serão aplicadas, sob pressão (superior à pressão da linha adutora de água bruta, nesse ponto), a suspensão do alcalinizante (cal hidratada) e a solução do coagulante (sulfato de alumínio), respectivamente. As bombas dosadoras, localizadas na Casa de Química, utilizadas para aplicação desses produtos, serão selecionadas para garantir as vazões e as pressões necessárias.

Para dimensionamento das unidades componentes da ETA, foi considerada a temperatura da água de 20° C, característica de águas superficiais captadas na região sudeste do Brasil.

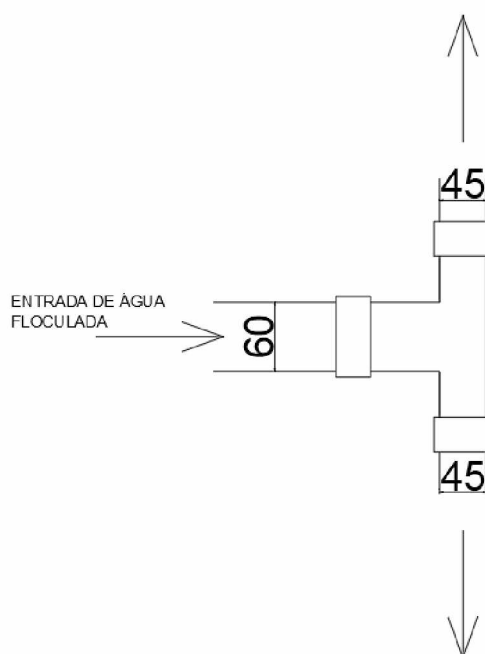
O dispositivo hidráulico de Mistura Rápida utilizado, constituído de trecho de canalização de 8 m de comprimento, em ferro fundido dúctil DN 200, de juntas flangeadas, produzirá o gradiente de velocidade de 547 s^{-1} e tempo de detenção de 5,03 s. A ABNT NBR 12216:1992 recomenda que as condições ideais de gradiente de velocidade, tempo de mistura e concentração da solução de coagulante e da suspensão de alcalinizante, devem ser determinadas preferencialmente através de ensaios de laboratório com a água a tratar, verificando também as recomendações dos fabricantes desses produtos. Na ausência desses ensaios, preconiza a adoção gradientes de velocidade compreendidos entre 700 s^{-1} e 1100 s^{-1} e tempo de mistura não superior a 5 s, não especificando o mecanismo de coagulação utilizado na ETA. De acordo com Ferreira Filho, S.S. (2017), para a coagulação química efetuada no mecanismo da varredura, em ETAs de Ciclo Completo, podem ser utilizados, com eficiência, sistemas de Mistura Rápida com gradientes de velocidade a partir de 300 s^{-1} . Assim, considera-se o gradiente de velocidade de 547 s^{-1} e o tempo de detenção de 5,03 s, adequados a uma eficiente dispersão dos produtos químicos utilizados na coagulação química, na ETA proposta, gerando concentrações adequadas do precipitado $\text{Al}(\text{OH})_3$, principal subproduto da coagulação no mecanismo da varredura, base para a formação de flocos.

O dispositivo hidráulico de Flocculação utilizado, será constituído de 3 trechos de canalizações em ferro fundido flangeado, dispostos em série, de DN 400, DN 500 e DN 600, respectivamente, com comprimentos individuais de 100 m. Esse sistema irá gerar gradientes de velocidade de 48 s^{-1} , 22 s^{-1} e 12 s^{-1} , nos trechos de DN 400, DN 500 e DN 600, respectivamente, e tempo de detenção total de 20,083 min. A ABNT NBR 12216:1992 recomenda que, na ausência de ensaios de laboratório com a água a tratar, sejam previstos trechos com gradientes de velocidade decrescentes entre 70 s^{-1} e 10 s^{-1} , com tempo de detenção total de 20 min a 30 min, para sistemas hidráulicos. Nesse trabalho, o maior gradiente de velocidade de flocculação, de 50 s^{-1} , ocorre no trecho de DN 400 e é inferior a 70 s^{-1} , limite máximo preconizado pela ABNT NBR 12216:1992. Com esse resultado espera-se a produção de flocos consistentes, com baixo índice de desagregação. O menor gradiente de velocidade de flocculação verificado, de 12 s^{-1} , ocorre no trecho de DN 600, acima do limite inferior de 10 s^{-1} , preconizado pela ABNT NBR 12216:1992. Dessa forma, garante-se que os flocos formados sejam mantidos em

suspensão e conduzidos aos decantadores, impedindo que sua sedimentação ocorra também no sistema de floculação, principalmente no último trecho, de menor gradiente de velocidade.

A condução da água floculada será efetuada por canalização DN 600 ($G = 12 \text{ s}^{-1}$) em ferro fundido, disposta em série com a canalização de mesmo diâmetro do último trecho de floculação, até o T de derivação (DN 600), de alimentação dos decantadores (Figura 32). Para alimentação de cada decantador, será instalada, na saída do T , peça de redução em ferro fundido DN 600/450, para acoplamento de tubos, peças e conexões DN 450, que conduzirão a vazão de 25 L/s à canalização distribuidora de água floculada, disposta ao longo do comprimento do decantador, com diâmetro de 450 mm na sua seção de entrada. Esse sistema garante, a manutenção do gradiente de velocidade de 11 s^{-1} , do T de derivação à entrada do decantador, inferior ao observado no último trecho de floculação, de 12 s^{-1} , garantindo a preservação dos flocos formados. Pode-se considerar cada orifício como unidade de jusante de condução de água floculada e as respectivas seções de escoamento, da canalização distribuidora de água floculada, como unidades de montante. Verificou-se gradientes de velocidade de 11 s^{-1} e 10 s^{-1} , respectivamente, na seção de entrada da tubulação distribuidora de água floculada e na seção de escoamento correspondente à metade do seu comprimento. Verificou-se também a ocorrência do gradiente de velocidade de 8 s^{-1} na passagem da água floculada pelos orifícios. Assim, verifica-se nesse sistema de produção e condução de água floculada, que o gradiente de velocidade da unidade de montante não é superado pelo gradiente de velocidade da unidade de jusante, contribuindo para a preservação dos flocos formados.

Figura 32 – T de derivação (unidades em centímetros)



Fonte: Autor (2019)

O sistema de decantação da ETA é composto de 2 decantadores de alta taxa, optando-se pela utilização de sedimentadores constituídos de placas planas paralelas, em PVC, que geralmente apresentam durabilidade superior à de dutos pré-fabricados, em PVC ou material similar, de pequena espessura de parede. Esses decantadores requerem, para a mesma vazão de projeto, áreas superficiais bem inferiores às requeridas pelos decantadores convencionais, por trabalharem com taxas de aplicação superficial mais elevadas. Utilizando como coagulante primário o sulfato de alumínio e considerando que a coagulação química será efetuada no mecanismo da varredura, serão produzidos, nos flocladores, flocos que sedimentam com velocidades de sedimentação entre 1 cm/min e 4 cm/min (valores de referência). A velocidade de sedimentação (v_s) do floco de tamanho crítico (partícula crítica), adotada no dimensionamento dos decantadores, foi de 40 m/dia, equivalente a 2,8 cm/min. Isso significa que serão removidos integralmente, por sedimentação, os flocos que sedimentarem com velocidade igual ou superior a 2,8 cm/min, formados nos flocladores ou por coalescência, nos sedimentadores. Os flocos que sedimentarem com velocidades inferiores a 2,8 cm/min serão parcialmente removidos e comporão a água decantada afluenta aos filtros. Segundo Ferreira Filho, S.S. (2017), decantadores de alta taxa projetados com v_s entre 20 m/dia e 60 m/dia apresentam boa eficiência na remoção de flocos e produzem efluentes com baixa concentração de suspensões, colaborando para a manutenção de carreiras de filtração adequadas.

Da concepção do projeto dos decantadores, foram incluídas 3 distâncias verticais de 0,5 m cada, gerando uma altura de 1,5 m que irá compor a altura total do decantador. A distância vertical de 0,5 m entre a parte superior dos poços de lodo e a geratriz inferior da tubulação distribuidora de água floclada, bastante utilizada em projetos, evita que a expansão do jato, decorrente da passagem da água floclada pelos orifícios, provoque a ressuspensão do lodo depositado. A distância vertical de 0,5 m entre a parte inferior dos sedimentadores (placas planas paralelas) e a geratriz superior da tubulação distribuidora de água floclada, bastante utilizada em projetos, evita que a expansão do jato, decorrente da passagem da água floclada pelos orifícios, retarde o estabelecimento do regime laminar na parte inferior dos sedimentadores. A distância vertical de 0,5 m entre a parte superior dos sedimentadores e o fundo das calhas de coleta de água decantada, bastante utilizada em projetos, evita que as tensões ascensionais geradas na condução da água decantada às calhas provoque arraste de flocos pelo estabelecimento de movimento turbulento na saída dos sedimentadores. A ABNT NBR 12216:1992 limita a vazão de água decantada, na borda da calha, a carga em 2,5 L/s por metro. Ferreira Filho, S.S. (2017), utiliza, em exemplo didático, o valor de 3 L/s por metro. No presente trabalho, a vazão na calha atingiu 3,125 L/s por metro linear de borda, valor considerado aceitável, em função da existência da distância vertical de 0,5 m entre o topo dos sedimentadores e o fundo das calhas, suficiente para impedir arraste de flocos.

Foram dimensionados 4 filtros rápidos por gravidade, com leito filtrante constituído de camada única de areia e concepção que facilita as operações de filtração e lavagem. A

taxa de filtração adotada no dimensionamento, de $120 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{dia}}$, atende às preconizações

da ABNT NBR 12216:1992, que limita esta taxa a $180 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{dia}}$ para filtros de camada

filtrante única de areia. Permite também ampliação da ETA, para tratar vazões até 50% superiores à vazão de projeto, sem a necessidade da construção de novos filtros. O sistema de coleta de água filtrada (fundo de filtro), constituído de malha de crepinas (bocais), permite homogeneidade na coleta da água filtrada e na distribuição de água de lavagem, com desempenho hidráulico adequado, por gerar perdas de carga, nessas operações, inferiores às geradas por outros bocais à disposição no mercado brasileiro. O fundo de filtro utilizado é de concepção recente e permite o seu assentamento sobre a laje de fundo, não tendo a necessidade da utilização de laje de fundo falso para fixação das crepinas. Essa concepção permite projetar filtros com alturas internas menores, pela eliminação do reservatório formado entre a laje de fundo e a laje de fundo falso, além de evitar danos às crepinas e à laje de fundo falso, quando a lavagem do filtro for efetuada com pressão superior à prevista no projeto, que pode ocorrer por falhas de operação. A turbidez da água filtrada (≤ 1 UT) e o tempo de funcionamento do filtro (≤ 40 h) são determinantes para o encerramento da carreira de filtração e constituem-se em elementos de treinamento de operadores, de fácil compreensão.

O tanque de contato foi dimensionado de acordo com o disposto no ANEXO IV da portaria nº 5/2017, do Ministério da Saúde, que fixa o tempo de contato mínimo a ser observado para a desinfecção por meio da cloração, de acordo com a concentração de cloro residual livre, a temperatura e o pH da água. A temperatura da água no tanque de desinfecção de 20°C, característica da região sudeste do Brasil, o pH de desinfecção, no tanque de contato, de valor 7 e a concentração de cloro residual livre requerida na saída do tanque de contato, de 1 mg/L, são parâmetros de referência, utilizados em projetos de sistemas de desinfecção de ETAs desse porte, por garantir a concentração mínima de cloro residual livre de 0,2 mg/L em qualquer ponto da rede de distribuição de água, preconizada pela referida portaria. O tempo de contato de 25 min adotado, é superior ao mínimo de 9 min estabelecido no ANEXO IV, colaborando para que seja atingida a eficiência desejada da desinfecção. A utilização de chicanas no tanque de contato facilita a dispersão do desinfetante na água, pela agitação provocada pelo atrito estabelecido com as paredes e fundo dos canais formados e pela passagem da água pelas curvas.

O sistema proposto permite a utilização de mão-de-obra local, exigindo qualificação e treinamento simplificados, compatíveis com as necessidades de operação do sistema.

6. Conclusão

A tecnologia de tratamento de água de Ciclo Completo é amplamente utilizada na potabilização de águas de mananciais superficiais no Brasil.

As características de concepção e projeto de unidades componentes de uma ETA de Ciclo Completo podem influenciar na sua eficiência, que também pode ser também afetada pela qualidade dos recursos materiais e humanos, em todos os níveis, responsáveis pela sua operação e manutenção. Essa eficiência pode ser também influenciada pela capacidade de investimentos e captação de recursos da concessionária responsável, bastante heterogênea entre as concessionárias brasileiras.

Na elaboração de novos projetos de sistemas de tratamento de águas de abastecimento utilizando a tecnologia de Ciclo Completo, bem como na elaboração de projetos de reforma e ampliação de sistemas existentes, seja para atender ao aumento da demanda, seja pela necessidade de melhorar a eficiência do processo, é possível a utilização de tecnologias de tratamento simplificadas, de baixo custo, alternativas às usualmente empregadas, mesmo contemplando parte das unidades componentes da ETA, porém apresentando eficiência que pode ser comprovada. Com essas simplificações, é possível utilizar mão-de-obra local, com qualificação suficiente para atender às exigências de operação desses sistemas de tratamento.

Na composição da ETA, além de unidades com concepção simplificada, podem ser empregadas unidades de concepção usual e unidades com concepção mais atualizada, apresentando relação custo-benefício favorável à sua utilização.

No presente trabalho, foram propostas e dimensionadas unidades de Mistura Rápida e Floculação simplificadas, de baixo custo, que apresentam facilidades de operação e manutenção, utilizando-se tubos, peças e conexões em ferro fundido, com juntas flangeadas, para a sua montagem.

Nesse trabalho, foram dimensionadas unidades de Decantação de Alta Taxa, usualmente empregadas em projetos de ETAs, que apresentam vantagens como a elevada eficiência na remoção de suspensões, colaborando na manutenção de carreiras de filtração adequadas. Apresenta também a vantagem da redução significativa de área superficial dos decantadores, por trabalhar com taxas de aplicação superficial elevadas, em comparação às utilizadas no dimensionamento de decantadores convencionais.

Foram dimensionados filtros rápidos por gravidade, com camada única filtrante e sistema de drenagem (fundo de filtro) constituído de malha de crepinas (bocais) que apresentam o melhor desempenho hidráulico entre os disponíveis no mercado brasileiro. Normalmente esse fundo de filtro necessita a construção de laje de fundo falso para apoio dos bocais, criando-se um reservatório entre essa laje e a laje de fundo, com aumento significativo da altura interna do filtro. A concepção de filtro proposta nesse trabalho utiliza sistema de crepinas mais atualizado, que pode ser apoiado na laje de fundo,

eliminando a necessidade da laje de fundo falso. Essa concepção elimina também a possibilidade de submeter a laje de fundo falso e as crepinas a pressões elevadas durante a lavagem, em caso de falhas nessa operação, podendo ter como consequência a ruptura de crepinas (bocais) e trincas na laje de fundo falso, principalmente nas construídas em concreto armado.

O unidade de Desinfecção dimensionada é usualmente empregada em sistemas de tratamento de águas de abastecimento.

Com base no dimensionamento efetuado e nos resultados obtidos, utilizou-se a ABNT NBR 12216:1992 e as demais Referências citadas, como indicadores da eficiência das unidades componentes da ETA proposta. Com base no dimensionamento efetuado e nos resultados obtidos, conclui-se que a ETA de Ciclo Completo, proposta nesse trabalho, atende às preconizações da ABNT NBR 12216:1992 esperando-se que produza água tratada potável, com qualidade descrita na da Portaria de Consolidação N° 5/2017, do Ministério da Saúde.

A concepção de tratamento proposta nesse trabalho pode ser utilizada em projetos hidráulicos que visam a construção, reforma ou ampliação de estações de tratamento de água de Ciclo Completo, apresentando, no seu conjunto, soluções simplificadas e eficientes, ao mesmo tempo atualizadas, podendo adaptar-se às necessidades da concessionária local e da comunidade envolvida.

Referências

AEMS. **Tratamento de água para consumo humano**. Disponível em <<https://www.ebah.com.br/content/ABAAAgxr0AA/tratamento-agua-consumo-humano-t-a-1-1?part=2#>>. Acesso em 30 de novembro de 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-12216: Projeto de estação de tratamento de água para abastecimento público**. Rio de Janeiro, 1992.

BIOPROJECT. **Filtração rápida**. Disponível em: <<http://www.bioproject.com.br/>>. Acesso em 30 de novembro de 2018.

DI BERNARDO, L. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Rima, 2005.

FÊNOMENOS DA ENGENHARIA. **Calha Parshall**. Disponível em: <<http://fenomenosdaengenharia.blogspot.com/2013/06/calha-parshall.html>>. Acesso em 30 de novembro de 2018.

FERREIRA FILHO, S. S. **Tratamento de água: concepção, projeto e operações de tratamento**. Rio de Janeiro: Elsevier Editora Ltda., 2017.

HIDRO SOLO. **Crepinas**. Disponível em: <<https://hidrosolo.com.br/pt/produtos/crepinas>>. Acesso em: 7 de dezembro de 2018.

IBGE. **IBGE Cidades**. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 5 de fevereiro de 2019.

LEGNER, C. **Sistema de decantação**. Disponível em: <<http://www.revistatae.com.br/6101-noticias>>. Acesso em 30 de novembro de 2018.

MACYNTIRE, A. **Bombas e instalações de bombeamento**. 2a ed. São Paulo: LTC – Livros Técnicos e Científicos, 1997.

MICHA, R. **O tratamento da água**. Disponível em: <<http://educacao.globo.com/artigo/o-tratamento-da-agua.html>>. Acesso em: 29 de novembro de 2018.

MINISTÉRIO DA SAÚDE. **Inspeção sanitária em abastecimento de água para consumo humano**. Disponível em <<https://pt.slideshare.net/SESMG/inspeo-sanitria-mdulo-ii-maio-2013>>. Acesso em 30 de novembro de 2018.

MINISTÉRIO DA SAÚDE. **Portaria de consolidação nº 5 de 28 de setembro de 2017**.

MINISTÉRIO DA SAÚDE. **Portaria nº 2914 de 12 de dezembro de 2011**.

O2 ENGENHARIA. **Projetos.** Disponível em: <<https://o2engenharia.com.br/index.php/atuacao/projetos>>. Acesso em: 30 de novembro de 2018.

OPERSAN. **Decantador: o que é e como funciona?**. Disponível em: <<http://info.opersan.com.br/decanta%C3%A7%C3%A3o-o-que-%C3%A9-e-como-funciona>>. Acesso em 30 de novembro de 2018.

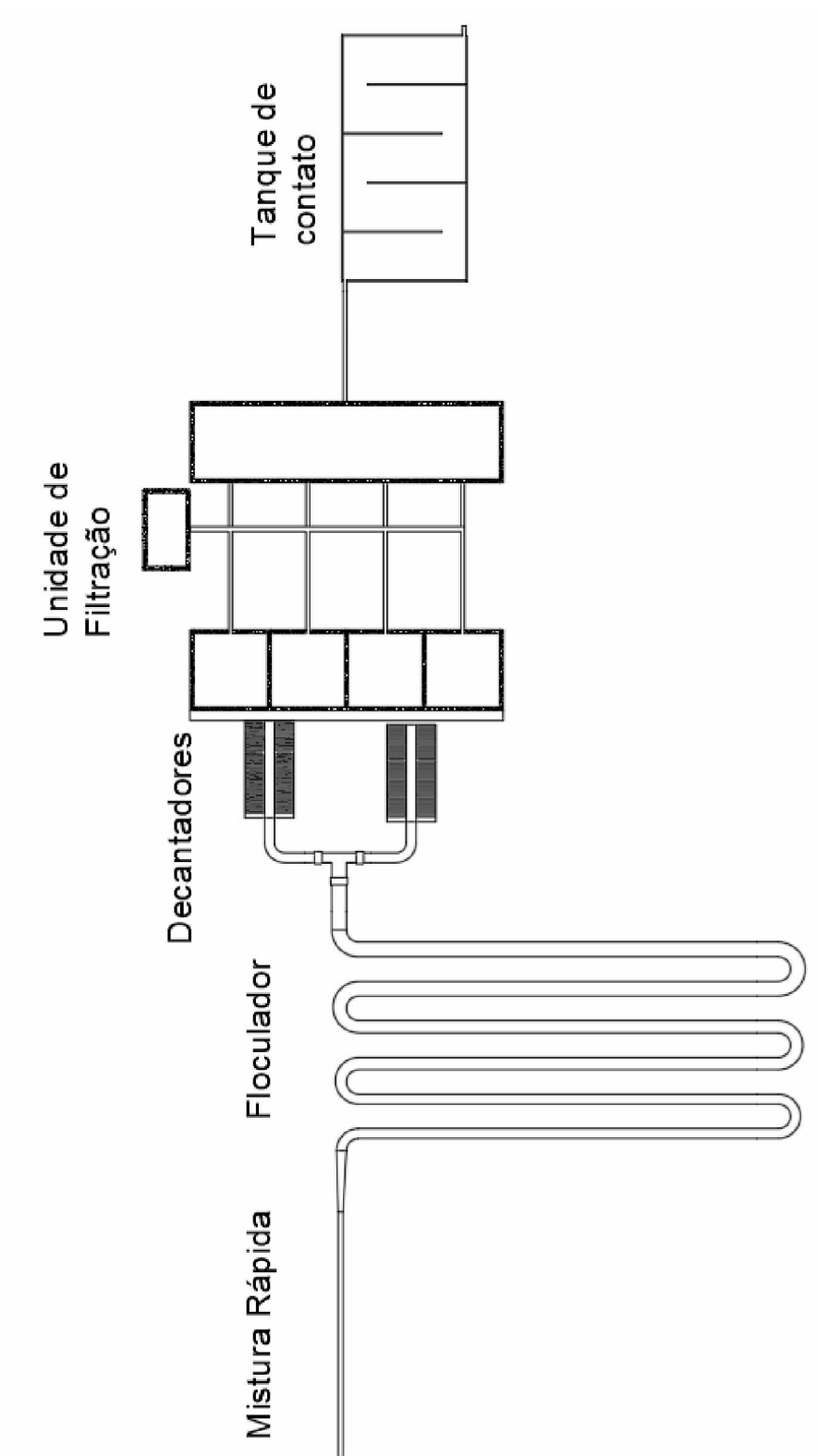
RICHTER, C. A. **Água: Métodos e Tecnologia de Tratamento.** São Paulo: Edgard Blucher, 2009.

RUBIM, C. **Ação dos floculadores.** Disponível em: <<http://www.meiofiltrante.com.br/internas.asp?id=14450&link=noticias>>. Acesso em: 29 de novembro de 2018.

VIANNA, M. R. **Hidráulica aplicada às estações de tratamento de água.** 4a ed. Belo Horizonte: Imprimatur, 2002.

Anexo A

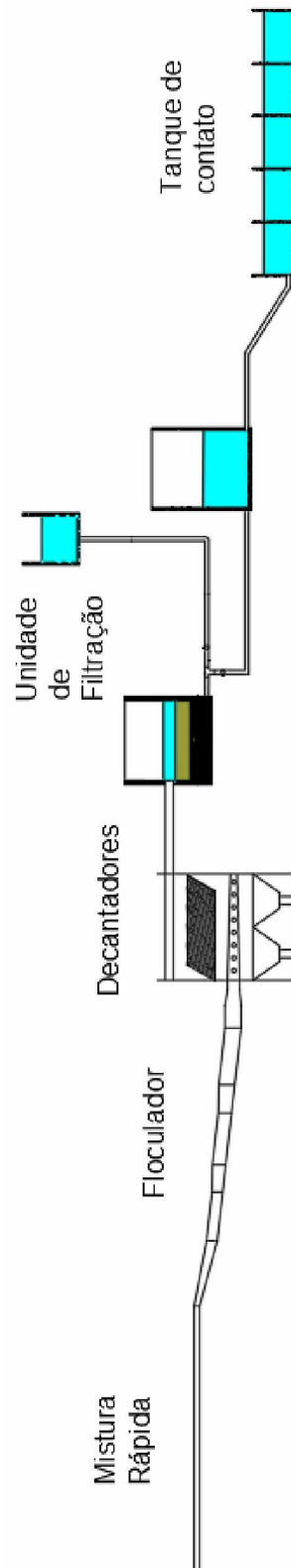
Figura 33 - Esquema da ETA em planta



Fonte: Autor (2019)

Anexo B

Figura 34 - Esquema da ETA - corte longitudinal



Fonte: Autor (2019)