



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**DIMENSIONAMENTO DE FILTROS RÁPIDOS POR GRAVIDADE DE UMA
ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA DE CICLO COMPLETO**

PAULO HENRIQUE LAMONIER NASCIMENTO

UBERLÂNDIA
DEZEMBRO 2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL

**DIMENSIONAMENTO DE FILTROS RÁPIDOS POR GRAVIDADE DE UMA
ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA DE CICLO COMPLETO**

PAULO HENRIQUE LAMONIER NASCIMENTO

ORIENTADOR:

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
DEZEMBRO 2019

RESUMO

No presente trabalho destaca-se o dimensionamento e verificação do funcionamento dos filtros rápidos por gravidade da Estação de Tratamento de Água (ETA) Bom Jardim - Uberlândia, para a vazão de ampliação de 2 m³/s. A ETA utiliza a tecnologia de tratamento de água de ciclo completo e conta sistema de filtração rápida por gravidade composto de 12 filtros duplos (24 bacias isoladas), com leito filtrante de camada dupla, constituída de antracito e areia. Como elemento de concepção, foi proposta a melhoria e atualização do sistema de coleta de água filtrada (fundo de filtro), a partir da substituição do fundo falso com bocais (sistema atual) pela utilização de blocos Pluvitec apoiados na laje de fundo. A aplicação desta tecnologia evidenciou a viabilidade da proposta de melhoria do sistema de filtração que integra a estação de tratamento de água estudada. Da análise dos resultados alcançados no dimensionamento, concluiu-se que os 12 filtros duplos da ETA Bom Jardim têm capacidade para tratamento da vazão de ampliação de 2 m³/s, sendo viável a substituição, em cada unidade filtrante, do fundo falso com bocais pelos blocos Pluvitec, para coleta da água filtrada, por constituir-se de fundo de filtro de concepção atualizada, que apresenta facilidades de operação e manutenção, além de bom desempenho hidráulico esperado nas operações de filtração e de lavagem, com base nos dados fornecidos pelo fabricante.

Palavras-chave: Estação de tratamento de água, ciclo completo, filtração rápida por gravidade, blocos Pluvitec.

Lista de Ilustrações

Figura 1 – Esquema de uma ETA de ciclo completo.....	9
Figura 2 – Blocos Pluvitec.....	11
Figura 3 – Crepinas (Blocos Pluvitec).....	12
Figura 4 – Disposição dos blocos Pluvitec na laje de fundo.....	12
Figura 5 – Vista aérea da Estação de Tratamento de Água Bom Jardim.....	15
Figura 6 – Vista do canal de água decantada.....	16
Figura 7 – Dimensões verticais dos filtros.....	18
Figura 8 – Fundo falso dos filtros.....	18
Figura 9 – Célula de filtro e canais longitudinais de coleta de água de lavagem.....	19
Figura 10 – Sala de comando dos filtros.....	19
Figura 11 – Galeria de tubulações.....	20
Figura 12 – Medidor de capacidade atual do filtros.....	20
Figura 13 – Disposição das crepinas no sentido de menor dimensão da base dos filtros.....	31
Figura 14 – Disposição das crepinas no sentido de maior dimensão da base dos filtros.....	32
Figura 15 – Expansão de meios filtrantes.....	33
Figura 16 – Corte longitudinal do filtro.....	35
Figura 17 – Gráfico de desempenho hidrodinâmico das crepinas.....	37
Figura 18 – Gráfico de desempenho hidrodinâmico em retrolavagem.....	40
Figura 19 – Filtros com blocos Pluvitec e sistema de drenagem sob laje de fundo.....	43
Figura 20 – Filtros com blocos Pluvitec e sistema de drenagem sobre a laje de fundo.....	44

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Características do leito filtrante.....	30
Tabela 2 – Valores de K para perdas de carga localizada.....	38
Tabela 3 – Valores de K (Parte 2).....	38
Tabela 4 – Valores para o coeficiente de rugosidade C.....	39

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	8
1.1 Objetivo.....	9
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	9
2.1 Filtração.....	9
2.1.1 Filtração lenta.....	10
2.1.2 Filtros rápidos por gravidade.....	10
2.1.2.1 Blocos Pluvitec.....	11
2.1.2.2 Critérios para lavagem dos filtros.....	13
2.1.2.3 Critérios para estabelecer a altura dos filtros.....	13
3. DADOS GERAIS DA ETA BOM JARDIM.....	14
3.1 Descrição dos filtros da ETA Bom Jardim.....	16
3.2 Composição do leito filtrante e número de filtros.....	16
3.3 Dimensões dos filtros e as partes constituintes do seu sistema de filtração.....	17
3.4 Lavagem dos filtros.....	21
4. PARÂMETROS BÁSICOS DE PROJETO - MODELOS DE DIMENSIONAMENTO.....	21
4.1 Elementos de concepção do sistema de filtração.....	22
4.1.1 Vazão média de operação.....	22
4.1.2 Filtração.....	23
4.2 Sistema de drenagem.....	23
4.3 Tubulação de água filtrada.....	24
4.4 Lavagem dos filtros.....	24
4.4.1 Capacidade do reservatório de água para lavagem.....	24
4.4.2 Tubulação de água para lavagem.....	24
4.5 Coleta de água de lavagem.....	25
4.5.1 Altura de água sobre a borda do canal de água de lavagem.....	25
4.5.2 Altura de água no início do canal.....	25
4.6 Altura vertical dos filtros.....	25
4.6.1 Altura mínima do topo do leito filtrante expandido à borda do canal.....	25
4.6.2 Expansão do leito filtrante.....	26
4.6.3 Altura da laje de fundo ao topo do leito filtrante em repouso.....	26
4.6.4 Altura mínima da laje de fundo à borda do canal de água de lavagem.....	26

4.7 Carga hidráulica.....	26
4.8 Perda de carga na filtração.....	27
4.8.1 Perda de carga na camada de areia na filtração.....	27
4.8.2 Perda de carga na camada de antracito na filtração.....	27
4.8.3 Perda de carga total na filtração.....	27
4.9 Perda de carga na lavagem dos filtros.....	27
4.9.1 Perda de carga na camada de areia na lavagem dos filtros.....	27
4.9.2 Perda de carga na camada de antracito na lavagem dos filtros.....	28
4.9.3 Perda de carga na tubulação de água para lavagem.....	28
4.9.4 Perda de carga nas crepinas.....	28
4.9.5 Perda de carga na borda do canal lateral de água de lavagem.....	28
5. DIMENSIONAMENTO.....	28
5.1 Vazão média de operação por filtro.....	28
5.2 Taxa de filtração.....	29
5.3 Alimentação dos filtros.....	29
5.4 Leito filtrante de dupla camada.....	29
5.5 Sistema de drenagem.....	30
5.5.1 Número de crepinas por filtro	30
5.6 Tubulação de água filtrada.....	32
5.7 Lavagem dos filtros.....	32
5.7.1 Vazão de água para lavagem.....	33
5.7.2 Capacidade do reservatório de água para lavagem.....	33
5.7.3 Tubulação de água para lavagem.....	34
5.7.4 Coleta de água de lavagem.....	34
5.8 Altura vertical dos filtros.....	34
5.9 Cálculo das perdas de carga.....	36
5.9.1 Cálculo das perdas de carga na filtração.....	36
5.9.2 Cálculo das perdas de carga durante a lavagem.....	40
6. ANÁLISE DE RESULTADOS.....	42
7. CONCLUSÃO.....	44
REFERÊNCIAS.....	46

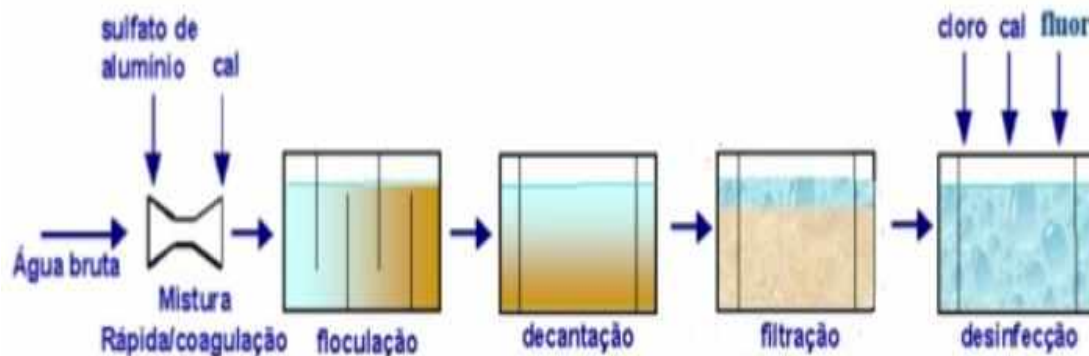
1 INTRODUÇÃO

No sistema de abastecimento de águas superficiais, de maneira geral, são partes constituintes as seguintes unidades: captação, estação de tratamento, estação elevatória, reservação, redes de distribuição e ligações domiciliares. Geralmente a água bruta captada em mananciais superficiais, passa inicialmente por sistema de gradeamento, para a remoção de suspensões mais grosseiras e de desarenadores, para remoção de areia e sedimentos. Em seguida, a água é conduzida até a estação de tratamento de água (ETA), onde é submetida ao processo de tratamento, geralmente composto das fases de clarificação e desinfecção, de modo a tornar-se própria ao consumo humano.

Segundo Vianna (1997), as estações de tratamento de água de ciclo completo (convencionais), bastante utilizadas para tratamento de águas de mananciais superficiais, são compostas por unidades de mistura rápida, floculação, decantação e filtração, compondo a fase de clarificação, seguida de desinfecção, produzindo água tratada com características físicas, químicas, biológicas e radiológicas (quando for o caso) próprias para consumo humano, conforme determina a portaria nº 2914/2011 do Ministério da Saúde, que contém o Padrão de Potabilidade.

Quanto à seleção de tecnologia de tratamento de água, mais de 70% do volume de água tratada e distribuída no Brasil é decorrente do tratamento de água por ciclo completo (IBGE, 2002 apud DI BERNARDO E SABOGAL PAZ, 2008). Di Bernardo e Sabogal Paz (2008) apontam que na tecnologia de ciclo completo, a água bruta é coagulada na unidade de mistura rápida, com sais de alumínio ou ferro, como o policloreto de alumínio e o cloreto férrico, podendo ser utilizados também polímeros, produzindo, como subprodutos, suspensões que serão separadas por sedimentação e filtração, nas unidades subseqüentes de clarificação. A aplicação do coagulante ocorre em trecho de elevada turbulência na unidade de mistura rápida, que pode ser hidráulica ou mecanizada. Após este processo, a água coagulada é conduzida aos floculadores, unidades em que, sob agitação lenta, são produzidos flocos que serão removidos em decantadores (ou flotadores) e filtros, encerrando a fase de clarificação. A água clarificada, efluente dos filtros, é conduzida ao tanque de contato, onde a desinfecção, a fluoretação e a correção de pH são processadas, produzindo-se água tratada (potável), própria para o consumo. A Figura 1 mostra o fluxograma de uma estação de tratamento de água (ETA) de ciclo completo.

Figura 1 – Esquema de uma ETA de ciclo completo.



Fonte: Ministério da Saúde, 2013.

Tradicionalmente existem dois métodos distintos de filtração: filtração lenta (sem coagulação química) e filtração rápida (com coagulação química). Neste trabalho destaca-se a filtração rápida por gravidade, que ocorre em filtros com dupla camada filtrante (antracito e areia), no sentido descendente, providos de sistema de lavagem a contracorrente com ar comprimido e água, para remoção de impurezas retidas no leito filtrante ao longo da carreira de filtração (tempo entre lavagens) [BIOPROJECT, 2019].

1.1 Objetivo

O objetivo do presente trabalho é verificar o funcionamento hidráulico dos filtros rápidos por gravidade da ETA Bom Jardim, incluindo o dimensionamento e análise de desempenho de unidades adjacentes, para a vazão de ampliação de $2 \text{ m}^3/\text{s}$, utilizando sistema de coleta de água filtrada composto de blocos PLUVITEC providos de crepinas, assentados na laje de fundo.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Filtração

O processo de filtração consiste em remover as partículas suspensas e coloidais, além de microorganismos presentes na água que escoam através de um meio filtrante composto por

materiais granulares com granulometria apropriada – normalmente utilizados areia, ou antracito e areia (DI BERNARDO, 2008). Deste modo, elimina-se a barreira criada por estas partículas responsáveis pela cor e turbidez da água, cuja presença diminui a eficácia da desinfecção na inativação de microorganismos patogênicos (COMUSA, 2018). A filtração pode ocorrer por pressão ou por gravidade, destacando-se, nesse último caso, a filtração lenta e a filtração rápida.

2.1.1 Filtração lenta

Na filtração lenta, a água bruta a ser tratada escoar pelo meio filtrante poroso, normalmente constituído por camada suporte e areia fina, responsável por reter os materiais em suspensão mediante mecanismos de transportes, adesão e atividades biológicas. Neste tipo de tecnologia não há coagulação química, o material em suspensão promove a formação de uma camada, biologicamente ativa, com papel importante na remoção de microorganismos patogênicos (HUISMAN; WOOD, 1974).

2.1.2 Filtros rápidos por gravidade

A filtração rápida por gravidade, é a metodologia utilizada nos filtros da ETA Bom Jardim, sendo uma técnica amplamente difundida nas ETAs de ciclo completo. Segundo Di Bernardo (2008), nos filtros rápidos por gravidade destacam-se os seguintes componentes:

- Canal de alimentação;
- Entrada de água com comporta para isolamento;
- Leito filtrante de camada simples ou dupla;
- Camada suporte de pedregulho;
- Sistema de drenagem (fundo de filtro);
- Calhas coletoras de água de lavagem;
- Caixa de saída de água filtrada com vertedor;
- Canal geral de água filtrada;
- Tubulação de água filtrada;
- Tubulação de água para lavagem;
- Mesa de comando.
- Os filtros rápidos por gravidade de fluxo descendente trabalham com alta taxa de filtração. Seu funcionamento implica em dois modelos distintos de operação: com taxa de filtração constante, sendo necessário dispositivos controladores de vazão e

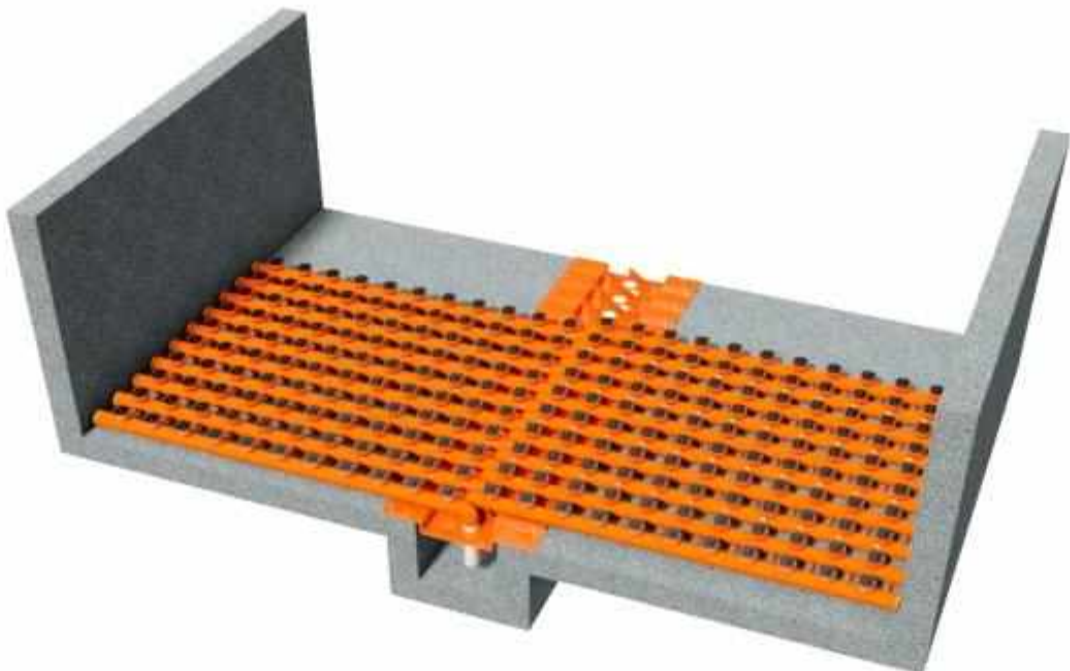
com taxa de filtração declinante variável.

Nos filtros em que a vazão é uniforme, a medida que as impurezas retidas nos interstícios granulares do leito filtrante vão se acumulando, há um acréscimo progressivo de perda de carga, implicando no aumento da resistência ao escoamento e, conseqüentemente, na necessidade do aumento da carga hidráulica objetivando manter a taxa de filtração constante. Com o aumento gradual do nível de água até que alcance um valor de referência limite, faz-se necessário a lavagem dos filtros, geralmente através do encaminhamento da água por inversão de corrente. Assim, a água introduzida que percorre os filtros no sentido ascensional deverá ter velocidade suficiente para promover a expansão do leito filtrante, removendo as partículas indesejadas.

2.1.2.1 Blocos Pluvitec

O sistema de drenagem do projeto proposto tem como parte constituinte fundamental os blocos Pluvitec da Hidro Solo (Figura 2). Este dispositivo é composto de crepinas com aberturas laterais de 0,4 mm entre seus discos formadores, podendo dispensar ou reduzir a camada suporte e sua granulometria, visto que esta abertura evita a perda de areia durante a filtração. A figura 3 mostra detalhes das crepinas e tubulações de PVC componentes dos blocos Pluvitec.

Figura 2 – Blocos Pluvitec.



Fonte: Hidro Solo, 2019.

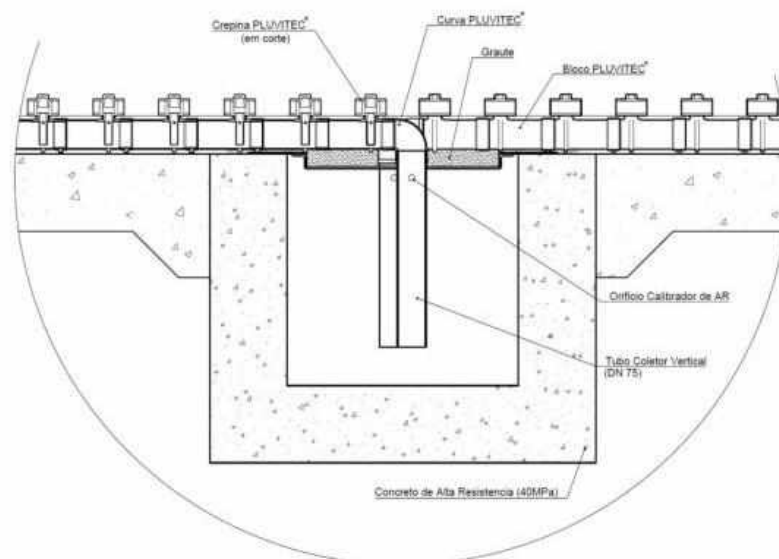
Figura 3 – Crepinas (Blocos Pluvitec).



Fonte: Hidro Solo, 2019.

Para a composição do conjunto, faz-se presente a coleta da água filtrada por um fundo de fluxo confinado para filtros em estação de tratamento, denominado blocos Pluvitec. Sua composição é formada por tubulações de PVC, em paralelo, nas quais estão fixadas as crepinas, permitindo o escoamento da água filtrada até uma canaleta disposta no centro do filtro. Por proporcionar uma menor perda de carga em relação as demais crepinas utilizadas no mercado para esta finalidade, pode haver um espaçamento maior entre elas. A Figura 4 mostra a disposição dos blocos Pluvitec em relação à canaleta central.

Figura 4 – Disposição dos blocos Pluvitec na laje de fundo.



Fonte: Hidro Solo, 2019.

Segundo o fabricante, o sistema de coleta de água filtrada constituído pelos blocos Pluvitec apresenta vantagens como: praticidade e rapidez quanto ao método construtivo do sistema, inclusive para filtros antigos que necessitam de reformas e adaptações; homogeneidade na coleta da água filtrada e na distribuição da água de lavagem, ou seja, um projeto de sistema de filtração com desempenho hidráulico congruente e uniforme; baixo custo de implantação; possibilidade de supressão ou diminuição da camada suporte e viabilidade para remoção da laje de fundo falso. O fabricante cita também a possibilidade de se projetar filtros com menores alturas internas, implicando diretamente na diminuição de custos para sua execução, permitindo dispensar construções estruturais mais robustas para resistir aos esforços causados pela água de lavagem na laje de fundo falso, evitando complicações futuras e danos permanente nos filtros.

2.1.2.2 Critérios para lavagem dos filtros

A lavagem dos filtros, consequência do encerramento da carreira de filtração, pode ocorrer quando a turbidez da água filtrada superar 1 UT, quando a carga hidráulica acima do leito filtrante em repouso atingir o limite fixado em projeto ou quando o tempo de funcionamento do filtro atingir 40 horas.

Segundo a ABNT NBR 12216:1992, a vazão da água para lavagem a contracorrente deve proporcionar expansão de 20% a 30% do leito filtrante. Para isso preconiza que a velocidade ascensional da água de lavagem deve ser de, no mínimo, 60 cm/min. Caso a água para lavagem seja proveniente de reservatório elevado, sua capacidade mínima deve ser suficiente para a lavagem de 2 filtros, considerando o tempo de lavagem de 10 minutos por filtro.

Conforme orientações da ABNT NBR 12216, para filtros com dimensão em planta menor ou igual a 3,0 m, a água de lavagem pode ser coletada diretamente através de canal lateral perpendicular a esta dimensão.

2.1.2.3 Critérios para estabelecer a altura dos filtros

Os fatores que influenciam na altura dos filtros são:

- Altura e posicionamento do sistema de coleta de água de lavagem;
- Carga hidráulica disponível sobre o leito filtrante em repouso;
- Espessura das camadas do leito filtrante;
- Espessura do sistema de drenagem dos filtros.

Quanto ao posicionamento da borda da canal (calha) de coleta de água de lavagem, segundo a ABNT NBR 12216, item 5.12.15.1, "A borda do canal deve situar-se acima da camada filtrante expandida, à altura livre não inferior a 15% da dimensão do filtro perpendicular ao canal." (ABNT NBR 12216, 1992, p.12)

A carga hidráulica disponível sobre o topo do leito filtrante em repouso, segundo Azevedo Netto (1987), situa-se na faixa de 1,80 m a 2,40 m. O autor também cita que para uma taxa de filtração de $250 \text{ m}^3/\text{m}^2 \times \text{dia}$, a altura de água sobre o topo do leito filtrante em repouso deverá ser de, no mínimo, 1,45 m.

Para a composição do leito filtrante de dupla camada, na ausência de ensaios em filtro-piloto, deve-se adotar critérios fixados pela ABNT NBR 12216 (1992, p. 10)

5.12.2.2 A camada filtrante dupla deve ser constituída de camadas sobrepostas de areia e antracito, com espessuras e características granulométricas determinadas por ensaios em filtro-piloto; quando os ensaios não são realizados, pode ser utilizada a especificação básica seguinte:

a) Areia:

- Espessura mínima de camada, 25 cm;
- Tamanho efetivo, de 0,40 mm a 0,45 mm;
- Coeficiente de uniformidade, de 1,4 a 1,6;

b) Antracito:

- Espessura mínima da camada, 45 cm;
- Tamanho efetivo, de 0,8 mm a 1,0 mm;
- Coeficiente de uniformidade, inferior ou igual a 1,4.

Conhecidas as respectivas espessuras referentes aos materiais utilizados para a composição do leito filtrante, somada aos demais fatores já mencionados, é possível determinar a sua altura interna útil, assim como a sua altura total.

3 DADOS GERAIS DA ETA BOM JARDIM

Dados e parâmetros citados a seguir foram obtidos por ocasião de visitas técnicas efetuadas pelo autor do presente trabalho, no ano de 2019, ocasiões em que pôde-se conferir dimensões e detalhes de unidades componentes da ETA, utilizando-se de instrumentos de medida (trena) e procedendo-se a leituras de equipamentos de controle, como o medidor de vazão instalado no medidor Parshall. Desta maneira, foi possível verificar que a estação de tratamento de água Bom Jardim utiliza a tecnologia de tratamento de ciclo completo, e contém as seguintes unidades básicas:

- Um medidor Parshall para a mistura rápida hidráulica e leituras de vazões;
- Doze floculadores em concreto armado, inicialmente mecanizados, funcionando atualmente como hidráulicos, pela desativação dos motores elétricos de

acionamento pela concessionária.

- Quatro floculadores circulares, hidráulicos tipo Alabama modificado, construídos em chapa de aço;
- Dois decantadores de alta taxa em concreto armado, com módulos de sedimentação em PVC;
- Um decantador de alta taxa em chapas de aço, com módulos de sedimentação constituídos de placas planas paralelas, em alumínio;
- Doze Filtros Rápidos por gravidade duplos, com leito filtrante de antracito e areia;
- Um Tanque de Contato para desinfecção, fluoretação e correção final de pH;
- Casa de Química em quatro pavimentos, com instalações para armazenamento, preparo e dosagem de produtos químicos, laboratório e salas de controle operacional e para serviços administrativos, incluindo o sistema de automação da fase de clarificação.

De acordo com o Plano Municipal de Saneamento Básico de Uberlândia-PMSB, de setembro de 2012, a ETA Bom Jardim tem uma capacidade máxima efetiva de produção de 1,65 m³/s, com capacidade média de 1,05 m³/s. A Figura 5 mostra uma vista aérea da Estação de Tratamento de Água Bom Jardim.

Figura 5 – Vista aérea da Estação de Tratamento de Água Bom Jardim.



Fonte: Prefeitura de Uberlândia, 2019.

3.1 Descrição dos filtros da ETA Bom Jardim

Os filtros da ETA Bom Jardim são classificados como filtros rápidos por gravidade e funcionam com taxa de filtração declinante variável. A alimentação de cada unidade filtrante é feita por comporta individual de acesso, de seção quadrada, localizada na parede de entrada, com geratriz superior situada em cota abaixo dos níveis de água no canal de água decantada e no filtro, mantendo-se assim, em cada instante, o mesmo nível de água nos filtros em operação. A figura 6 mostra o canal de água decantada, de alimentação das comportas de acesso aos filtros.

Figura 6 – Vista do canal de água decantada.



Fonte: Adaptado do DMAE, 2019.

3.2 Composição do leito filtrante e número de filtros

Ainda com base nas informações elucidadas pelos operadores da ETA Bom Jardim durante visitas in loco no ano de 2019, verificou-se que os 12 filtros duplos da ETA Bom Jardim apresentam leito filtrante constituído de areia e antracito, apoiado em camada suporte de seixos rolados, sob a qual existe um sistema de drenos, composto de placa metálica com orifícios de 0,6 cm de diâmetro, em um total de 200 orifícios/m².

Com base em dados fornecidos pela PETRANOVA (2019), empresa produtora de materiais filtrantes no Brasil, foi possível verificar que o antracito tem massa específica menor que a da areia. Conforme características granulométricas do antracito e da areia especificados na NBR 12216:1992, pode-se utilizar a camada de antracito, composta por grãos de maior granulometria, sobre a camada de areia fina, promovendo, primeiramente, a remoção do

material grosseiro em suspensão, o que aumenta a eficiência na remoção da turbidez, a velocidade de filtração e as carreiras de filtração.

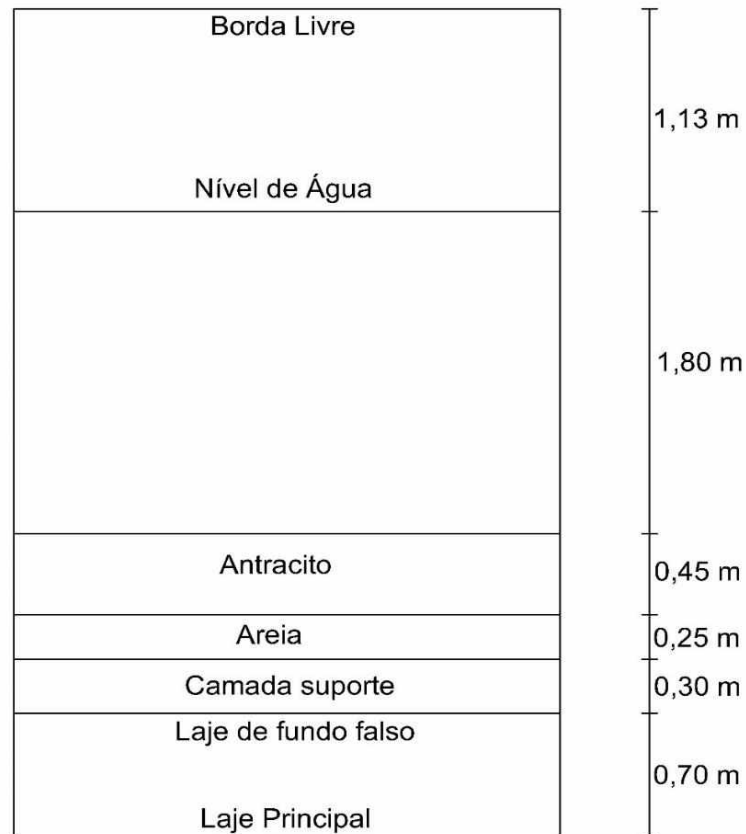
A camada filtrante de areia é sobreposta em um leito suporte, composto em camadas estratificadas de seixos rolados que, além de reduzir a perda de material filtrante, distribui uniformemente a água de lavagem no processo de lavagem dos filtros.

Os seixos que são colocados nas camadas inferiores absorvem as energias dos jatos de água que emergem do fundo do filtro. A diminuição gradativa do diâmetro desses seixos, no sentido ascensional, além de uniformizar o escoamento sob o leito filtrante durante a lavagem, evita a perda de areia durante o processo da filtração.

Atualmente, não se tem dados sobre a real espessura de cada camada do leito filtrante dos filtros, pois não são feitas manutenções periódicas destes leitos. Contudo, segundo entrevista com técnicos do DMAE, efetuadas durante visita técnica à ETA Bom Jardim, em 2019/1, especificações de projetos destes filtros indicam leito filtrante duplo constituído de camada de antracito de 0,45 m de espessura e tamanho efetivo entre 0,8 mm a 1,0 mm, apoiada sobre camada de areia de 0,25 m de espessura, com tamanho efetivo de 0,45 mm. O leito filtrante apoia-se sobre camada de seixo rolado 0,30 m de espessura (camada suporte), porém não foi informada a granulometria desta camada. A granulometria do leito filtrante atende às preconizações da ABNT NBR 12216:1992, que especifica espessuras mínimas de 0,45 m e 0,25 m para a antracito e areia, respectivamente, e tamanhos efetivos de 0,8 mm a 1,0 mm para o antracito, e de 0,40 mm a 0,45 mm para a areia.

3.3 Dimensões dos filtros e as partes constituintes do seu sistema de filtração

A Figura 7, obtida a partir de dados colhidos junto ao DMAE, durante visita técnica à ETA, apresenta as seguintes dimensões verticais dos filtros.

Figura 7 – Dimensões verticais dos filtros.

Fonte: Autor, 2019.

Os filtros possuem dimensões horizontais de 2,85 m x 8,55 m, são estruturados em concreto armado e apresentam sistema de fundo falso constituído de chapa metálica perfurada, mostrado na Figura 8, com 0,7 m de altura, responsável pela coleta de água filtrada. Nos orifícios da chapa metálica perfurada são fixados bocais, providos de aberturas laterais, para coleta de água filtrada e distribuição de água para lavagem a contracorrente.

Figura 8 – Fundo falso dos filtros.

Fonte: Adaptado do DMAE, 2019.

Cada filtro conta com 2 canais laterais longitudinais, de 0,7 m de largura cada e mesma altura dos filtros, utilizada para coletar a água de lavagem. A Figura 9 mostra uma célula de filtro completamente vazia e os canais laterais de coleta de água de lavagem.

A operação dos filtros é automatizada e a operação de cada um deles pode ser controlada na sala de comando dos filtros, mostrada na Figura 9 que também permite interferência manual.

Figura 9 – Célula de filtro e canais longitudinais de coleta de água de lavagem.



Fonte: Adaptado do DMAE, 2019.

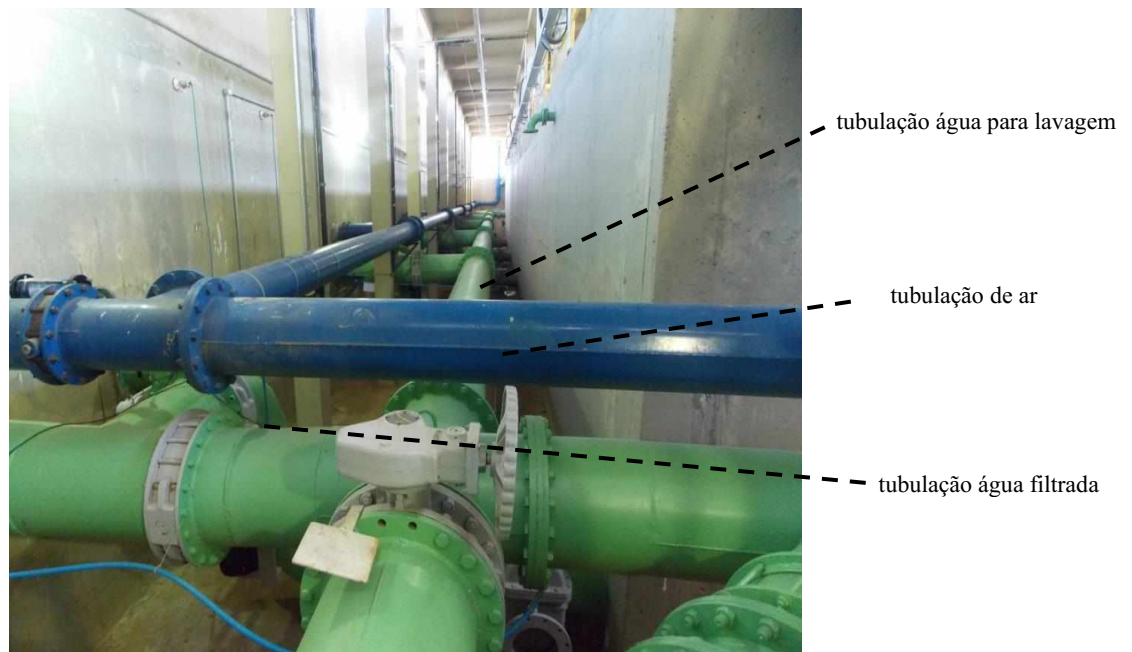
Figura 10 – Sala de comando dos filtros.



Fonte: Adaptado do DMAE, 2019.

A galeria de tubulações dos filtros, mostrada na Figura 11, abriga tubulações de coloração verde, que conduzem a água filtrada e a água para lavagem, e azul, que transporta o ar comprimido, aplicado antes da introdução da água para lavagem dos filtros. Há, também, um aparelho que mede, em porcentagem, a capacidade do filtro utilizada no momento. Esta medição é feita a partir do topo do leito filtrante. Este equipamento é mostrado na Figura 12.

Figura 11 – Galeria de tubulações.



Fonte: Adaptado do DMAE, 2019.

Figura 12 – Medidor de capacidade atual dos filtros.



Fonte: Adaptado do DMAE, 2019.

3.4 Lavagem dos filtros

Um dos parâmetros que determinam o tempo de operação de um filtro (carreira de filtração) é a turbidez da água filtrada, controlada quatro vezes ao dia. As amostras são recolhidas na tubulação que aduz a água filtrada ao canal de água filtrada, de alimentação do tanque de contato. Para este parâmetro admite-se um valor de turbidez menor ou igual a 1 UT.

Quando o filtro completa 40 horas de funcionamento é feita sua limpeza, mesmo que a turbidez não atinja valores superiores a 1 UT.

Inicialmente, é acionado o compressor de ar (soprador) por, aproximadamente, três minutos. Este procedimento é responsável pela pré-expansão do leito filtrante, promovendo-se o desprendimento das impurezas retidas no leito filtrante. Posteriormente é injetada água de retrolavagem.

Segundo informações obtidas de operadores da ETA durante visitas, nesta operação a água para lavagem é aplicada em sentido oposto ao do fluxo na filtração, com velocidade ascensional de aproximadamente 0,574 m/min. Desta forma o leito filtrante se expande, provocando atrito dos grãos e liberando as impurezas retidas, que são arrastadas para os canais laterais de coleta de água de lavagem. As bombas de retrolavagem são desativadas quando se nota, visualmente, a clarificação da água de lavagem no filtro.

4 PARÂMETROS BÁSICOS DE PROJETO - MODELOS DE DIMENSIONAMENTO

O dimensionamento dos filtros segue recomendações de roteiro de cálculo sugerido por Machado e Di Bernardo (1997) e de parâmetros e critérios de projeto recomendados pela ABNT NBR12216 e pelas Referências consultadas.

Equações básicas

$$A = \pi \times \frac{D^2}{4} \quad (1)$$

em que:

A: área da seção de escoamento (m²);

D: diâmetro da seção de escoamento (m).

$$V = Q \times T \quad (2)$$

em que:

V: volume útil (m³);

Q: vazão (m³/s);

T: Tempo (s).

$$Q = v \times A \quad (3)$$

em que:

v: velocidade (m/s);

A: seção transversal em que ocorre o escoamento (m²).

$$h_{\text{localizada}} = k \times \frac{v^2}{2 \times g} \quad (4)$$

em que:

$h_{\text{localizada}}$: perda de carga localizada (m);

k: coeficiente de perda de carga característico (adimensional);

v: velocidade (m/s);

g: aceleração da gravidade (m/s²).

$$h_{\text{distribuída}} = 10,641 \times \frac{Q^{1,85}}{C^{1,85} D^{4,87}} \times L \text{ (Hazen - Williams)} \quad (5)$$

em que:

$h_{\text{distribuída}}$: Perda de carga distribuída (m);

C: coeficiente que depende da natureza do material empregado na fabricação dos tubos e das condições de suas paredes internas (m³/s);

Q: vazão (m³/s);

D: diâmetro (m);

L: comprimento da tubulação (m).

4.1 Elementos de concepção do sistema de filtração

O presente trabalho tem como referência para a determinação dos elementos de concepção do sistema de filtração área em planta dos filtros já conhecida de 2,85 m x 8,55 m, vazão de outorga máxima de 2 m³/s e taxa de filtração a definir respeitando o valor máximo permitido pela NBR 12216:1992 para filtros com leito filtrante de dupla camada.

4.1.1 Vazão média de operação

Parâmetro de projeto: vazão tratada (Q).

Vazão de dimensionamento/verificação do funcionamento de 1 filtro:

$$Q_{1F} = \frac{Q}{N} \quad (6)$$

em que:

Q_{1F} : vazão média de operação por filtro (m^3/s);

Q : vazão tratada (m^3/s);

N : número de filtros.

4.1.2 Filtração

Parâmetros de projeto: vazão (Q); área horizontal do filtro (A_{1F}).

Equação básica de dimensionamento

$$T_F = \frac{Q_{1F}}{A_{1F}} \quad (7)$$

em que:

T_F : taxa de filtração ($m^3/m^2 \cdot dia$);

Q_{1F} : vazão média de operação por filtro (m^3/dia);

A_{1F} : área horizontal do filtro (m^2).

Conforme a NBR 12216:1992, a taxa de filtração (T_F) limita-se a $180 m^3/m^2 \cdot dia$, para filtros com camada única de areia e a $360 m^3/m^2 \cdot dia$, para filtro de camada dupla filtrante (antracito e areia).

4.2 Sistema de drenagem

$$Q_{crepina} = \frac{Q_{filtro}}{n^\circ \text{ crepinas}} \quad (8)$$

Em que:

$Q_{crepina}$: vazão por cada crepina (m^3/h);

Q_{filtro} : vazão em cada filtro (m^3/h).

$$N_{espaços} = \frac{L_{filtro} - D_{crepinas/parede}}{D_{crepina/crepina}} \quad (9)$$

Em que:

L_{filtro} : Comprimento das dimensões do filtro em planta, nas direções x e y ;

$N_{espaços}$: número de espaços;

$D_{crepinas/parede}$: distância entre as crepinas das extremidades e as paredes (m);

$D_{crepinas/crepinas}$: distância entre as crepinas (m).

$$N_{crepinas/fileiras} = N_{espaços} + 1 \quad (10)$$

Em que:

$D_{crepinas/fileiras}$: número de crepinas por fileira;

$N_{espaços}$: número de espaços.

4.3 Tubulação de água filtrada

Equação básica de dimensionamento

$$\frac{Q}{N} = v \times \frac{\pi \times DF^2}{4} \quad (11)$$

Em que:

Q: vazão média tratada (m³/s);

N: número de filtros;

v: velocidade da água filtrada na tubulação (m/s);

DF: diâmetro da tubulação de água filtrada (m).

4.4 Lavagem dos filtros

4.4.1 Capacidade do reservatório de água para lavagem

Equações básicas de dimensionamento

$$Q_{LAV} = v_{ASC} \times A_{IF} \quad (12)$$

Em que:

Q_{LAV}: vazão da água de lavagem dos filtros (m³/s);

v_{ASC}: velocidade ascensional da água de lavagem (m/s);

A_{IF}: área horizontal do filtro (m²).

$$Vol = 60 \times Q_{LAV} \times T \quad (13)$$

em que:

Vol: volume do reservatório (m³);

Q_{LAV}: vazão da água de lavagem dos filtros (m³/s);

T: tempo mínimo de lavagem dos filtros (minutos).

Convenções da ABNT NBR 12216:1992, determina que o reservatório deva ter capacidade mínima para lavagem de dois filtros, salvo sistemas que empregue efluente de outras unidades.

4.4.2 Tubulação de Água para lavagem

Equação básica de dimensionamento

$$Q_{LAV} = v_{LAV} \times \frac{\pi \times D^2 l_{lav}}{4} \quad (14)$$

Em que:

Q_{LAV} : vazão da água de lavagem dos filtros (m^3/s);

v_{LAV} : velocidade da água de lavagem dos filtros na tubulação (m/s);

D_{lav} : Diâmetro da tubulação da água de lavagem (m).

4.5 Coleta de água de lavagem

4.5.1 Altura de água sobre a borda do canal de água de lavagem

Parâmetros de projeto: largura útil do canal (L_{canal}), comprimento do canal (C_{canal}).

Equação básica de dimensionamento

$$\frac{Q_{lav}}{2} = 1,838 \times C_{canal} \times HC^{3/2} \quad (15)$$

em que:

Q_{LAV} : vazão da água de lavagem dos filtros (m^3/s);

C_{canal} : comprimento do canal de coleta (m);

HC: altura de água sobre a borda do canal (m).

4.5.2 Altura de água no início do canal

$$\frac{Q_{lav}}{2} = 1,838 \times L_{canal} \times HI^{3/2} \quad (16)$$

em que:

Q_{LAV} : vazão da água de lavagem dos filtros (m^3/s);

L_{canal} : largura dos canais longitudinais laterais de coleta (m);

HI: altura de água do início do canal (m).

4.6 Altura vertical do filtro

4.6.1 Altura mínima do topo do leito filtrante expandido à borda do canal

$$A_{\min} = 0,15 \times D_{\text{lado menor}} \quad (17)$$

em que:

A_{\min} : altura mínima do topo do leito filtrante expandido à borda do canal (m);

$D_{(\text{lado menor})}$: dimensão do filtro perpendicular ao canal (m).

4.6.2 Expansão do leito filtrante

$$A_{\text{expansão}} = I_{\text{expansão}} \times e_{\text{leito filtrante}} \quad (18)$$

em que:

$A_{\text{expansão}}$: altura de expansão do leito filtrante (m);

$I_{\text{expansão}}$: índice de expansão;

$e_{\text{(leito filtrante)}}$: espessura do leito filtrante (m).

4.6.3 Altura da laje de fundo ao topo do leito filtrante em repouso

$$A_{\text{topo do leito filtrante}} = A_{\text{blocos Pluvitec}} + e_{\text{areia}} + e_{\text{antracito}} \quad (19)$$

em que:

$A_{\text{topo do leito filtrante}}$: altura da laje de fundo ao topo do leito filtrante (m);

$A_{\text{blocos Pluvitec}}$: altura vertical dos blocos pluvitec (m);

e_{areia} : espessura da camada de areia (m);

$e_{\text{antracito}}$: espessura da camada de areia (m).

4.6.4 Altura mínima da laje de fundo à borda do canal de água de lavagem:

$$A_{\text{borda do canal de água de lavagem}} = A_{\text{topo do leito filtrante}} + e_{\text{areia}} + e_{\text{antracito}} \quad (20)$$

Onde:

$A_{\text{borda do canal de água de lavagem}}$: altura mínima da laje de fundo à borda do canal de água de lavagem;

$A_{\text{topo do leito filtrante}}$: altura da laje de fundo ao topo do leito filtrante (m);

e_{areia} : espessura da camada de areia (m);

$e_{\text{antracito}}$: espessura da camada de areia (m).

4.7 Carga hidráulica

$$h_{\text{disponível}} = A_{\text{expansão}} + A_{\text{mín}} \quad (21)$$

em que:

$h_{\text{disponível}}$: carga hidráulica disponível acima do topo do leito em repouso (m);

$A_{\text{expansão}}$: altura de expansão do leito filtrante (m);

A_{\min} : altura mínima do topo do leito filtrante expandido à borda do canal (m).

4.8 Perda de carga na filtração

4.8.1 Perda de carga na camada de areia na filtração

$$h_{\text{areia}} = 0,005 \times T_F \times e_{\text{areia}} \quad (22)$$

Onde:

h_{areia} : perda de carga na camada de areia (m);

e_{areia} : espessura da camada de areia (m);

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

4.8.2 Perda de carga na camada de antracito na filtração

$$h_{\text{antracito}} = 0,0009 \times T_F \times e_{\text{antracito}} \quad (23)$$

Em que:

$h_{\text{antracito}}$: perda de carga na camada de antracito (m);

$e_{\text{antracito}}$: espessura da camada de areia (m);

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

4.8.3 Perda de carga total na filtração

$$h_{\text{total de filtração}} = h_{\text{crepina}} + h_{\text{areia}} + h_{\text{antracito}} + h_{\text{localizada}} + h_{\text{distribuída}} \quad (24)$$

Em que:

h_{crepina} : perdas de carga nas crepinas (m);

h_{areia} : perda de carga na camada de areia (m);

$h_{\text{antracito}}$: perda de carga na camada de antracito (m);

$h_{\text{localizada}}$: perda de carga localizada (m);

$h_{\text{distribuída}}$: Perda de carga distribuída (m).

4.9 Perda de carga na lavagem dos filtros

4.9.1 Perda de carga na camada de areia na lavagem dos filtros

$$h_{\text{areia}} = 0,96 \times e_{\text{areia}} \quad (25)$$

Onde:

h_{areia} : perda de carga na camada de areia (m);

e_{areia} : espessura da camada de areia (m).

4.9.2 Perda de carga na camada de antracito na lavagem dos filtros

$$h_{\text{antracito}} = 0,25 \times e_{\text{antracito}} \quad (26)$$

Em que:

$h_{\text{antracito}}$: perda de carga na camada de antracito (m);

$e_{\text{antracito}}$: espessura da camada de areia (m).

4.9.3 Perda de carga na tubulação de água para lavagem

Equação básica para dimensionamento: fórmula de Hazen-Williams (equação 5).

4.9.4 Perda de carga nas crepinas

Serão utilizados os gráficos fornecidos pelo fabricante.

4.9.5 Perda de carga na borda do canal lateral de água de lavagem

Será utilizada a equação 15.

5 DIMENSIONAMENTO

5.1 Vazão média de operação por filtro

Para base de cálculo, como já mencionado, estabeleceu-se que a vazão de alimentação dos filtros será da ordem de 2 m³/s, considerando funcionamento de 24 horas/dia, temos:

$$Q = 2 \times 86400 \rightarrow Q = 172800 \text{ m}^3/\text{dia}$$

A ETA objeto de estudo, apresenta um total de 24 filtros, aplicando a Equação 6:

$$Q_{1F} = \frac{172800}{24} \rightarrow Q_{1F} = 7200 \text{ m}^3/\text{dia}$$

Logo, a capacidade máxima de filtração da ETA será de 172800 m³/dia e cada filtro será capaz de filtrar 7200 m³/dia.

Por se tratar de uma ETA já existente, as dimensões em planta de cada filtro, já conhecidas, serão usadas como parâmetro para determinar sua taxa de filtração. A área do filtro, em planta, corresponde à 2,85m x 8,55m.

5.2 Taxa de filtração

O cálculo da taxa de filtração ocorre através da divisão entre a vazão de água bruta que alimenta cada filtro por suas respectivas dimensões em planta. Por se tratar de uma ETA existente, com sistema de filtração já implantados e dimensões das bases dos filtros conhecidas de 2,85 m x 8,55 m, é possível determinar a sua taxa de filtração correspondente. Calculando a taxa de filtração através da Equação 7:

$$T_F = \frac{7200}{2,85 \times 8,55} = 295,45 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{dia}$$

Portanto, verifica-se que a taxa de filtração está dentro dos parâmetros estabelecidos pela ABNT NBR 12216:1992, para filtros de dupla camada.

5.3 Alimentação dos filtros

A água decantada é conduzida aos filtros através de um canal com amplas dimensões de 2,70 m x 1,10 m, e as comportas serão do tipo afogadas com seção quadrada de 0,50 m x 0,50 m, conferindo perda de carga desprezível no processo.

5.4 Leito filtrante de dupla camada

Obedecendo aos critérios estabelecidos pela ABNT NBR 12216 e visando a otimização quanto ao funcionamento do sistema, optou-se pelos seguintes características granulométricas e espessuras, explicitadas na Tabela 1:

Tabela 1 - Características do leito filtrante.

Material	TAMANHO EFETIVO (mm)	COEFICIENTE DE UNIFORMIDADE (mm)	ESPESSURA DA CAMADA (m)
ANTRACITO	0,9	1,4	0,45
AREIA	0,4	1,5	0,25

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 12116:1992.

5.5 Sistema de drenagem

Para a composição do conjunto, faz-se presente a coleta da água filtrada por um fundo de fluxo confinado para filtros em estação de tratamento – denominado blocos Pluvitec. Sua composição é formada por tubulações de PVC, em paralelo, nas quais são inseridas as crepinas, permitindo o escoamento da água filtrada até uma canaleta disposta no centro do filtro. Por proporcionar uma menor perda de carga em relação as demais crepinas utilizadas no mercado para esta finalidade, o espaçamento entre as crepinas, de centro a centro, ao longo dos braços que compõem sistema bloco pluvitec, é de 17 cm.

5.5.1 Número de crepinas por filtro

O número de crepinas por filtro pode ser calculado através de dados já conhecidos neste presente trabalho, como as dimensões em planta dos filtros e também tomando como base os valores fornecidos pela Hidro Solo (2019) quanto as características dos blocos Pluvitec, como distância entre crepinas e seu respectivo diâmetro.

Assim, com distância entre crepinas fixada em 17 cm, e filtros com medidas em planta de 2,85 m x 8,55 m, calcula-se o número de espaços entre as crepinas no sentido longitudinal das fileiras, que corresponde a dimensão dos filtros no sentido das canaletas laterais dos blocos Pluvitec (Equação 9):

$$N_{\text{espaços}} = \frac{2,85 - (2 \times 0,15)}{0,17} \rightarrow N_{\text{espaços}} = 15$$

Desta forma, através da Equação 10, encontra-se o número de crepinas por fileira no sentido abordado:

$$N_{\text{crepinas/fileiras}} = 15 + 1 \rightarrow N_{\text{crepinas/fileiras}} = 16$$

O número de espaços entre as crepinas, de uma fileira para outra, ou seja, na direção perpendicular ao sentido das canaletas laterais dos blocos Pluvitec, é calculada também utilizando a Equação 9, porém utilizando a maior dimensão da base dos filtros:

$$N_{\text{espaços}} = \frac{8,55 - (2 \times 0,11)}{0,17} \rightarrow N_{\text{espaços}} = 49$$

Logo, utilizando a Equação 10, o número de crepinas no sentido de maior dimensão será:

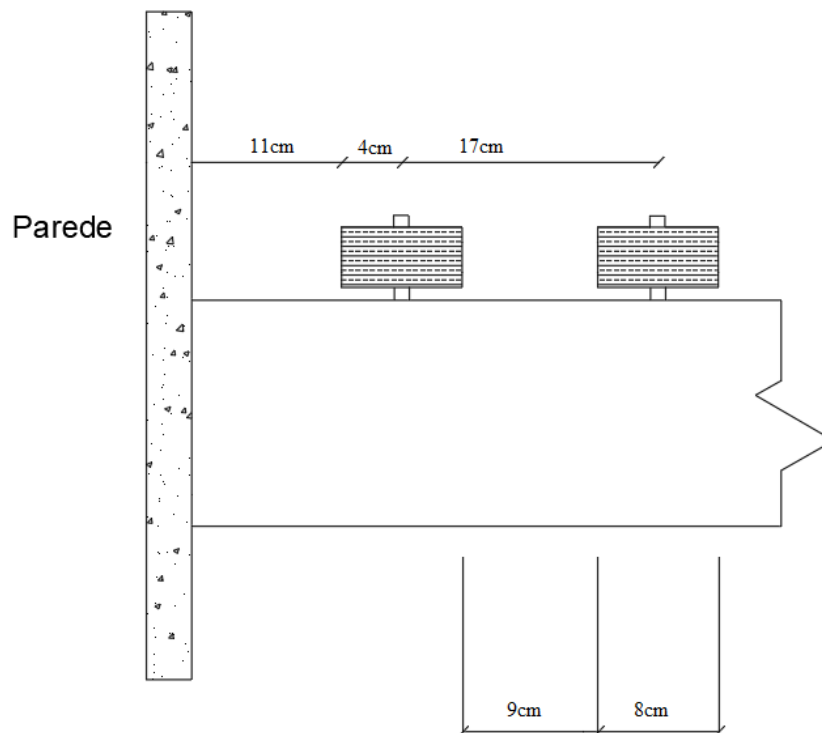
$$N_{\text{crepinas/fileiras}} = 49 + 1 \rightarrow N_{\text{crepinas/fileiras}} = 50$$

Portanto, o número de crepinas total por filtro será:

$$\text{Número de crepinas por filtro} = 16 \times 50 = 800 \text{ crepinas}$$

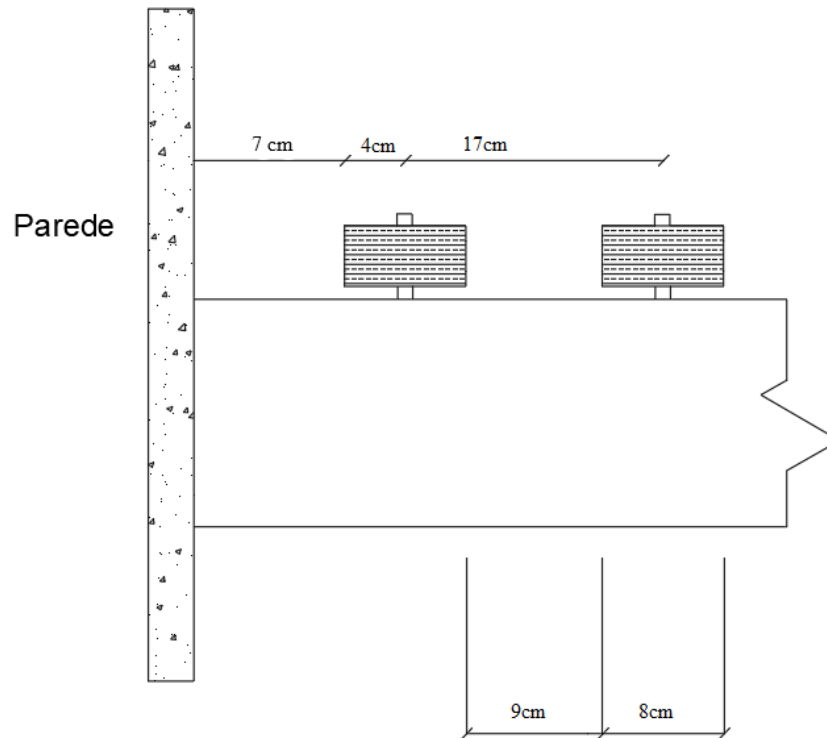
As figuras 13 e 14 mostram a disposição das crepinas localizadas no fundo de cada filtro, e foram obtidas a partir dos espaçamentos definidos e número de crepinas calculadas em cada direção da base dos filtros.

Figura 13 – Disposição das crepinas no sentido de menor dimensão da base dos filtros.



Fonte: Autor, 2019.

Figura 14 – Distância entre as crepinas no sentido de maior dimensão da base dos filtros.



Fonte: Autor, 2019.

5.6 Tubulação de água filtrada

Recomenda-se que a velocidade da água na tubulação de água filtrada seja fixada entre 0,8 m/s e 1,7 m/s (VIANNA, 2002). Assim, para determinar o diâmetro do conduto, adotou-se uma velocidade da água na tubulação de água filtrada de 1,25 m/s. Desta maneira, aplicando a Equação 11:

$$\frac{2}{24} = \frac{1,25 \times \pi \times DF^2}{4} \rightarrow DF = 0,291 \text{ m} \rightarrow \text{DN350 (Adotado)}$$

O diâmetro adotado para a tubulação de água filtrada fixado em 350 mm, tem como justificativa a facilidade na concepção do projeto quando igualado o diâmetro das tubulações de água filtrada e tubulações de água de lavagem dos filtros, esta última calculada mais adiante.

Recalculando a velocidade de projeto, tem-se:

$$\frac{2}{24} = \frac{v \times \pi \times 0,35^2}{4} \rightarrow v = 0,87 \text{ m/s}$$

5.7 Lavagem dos filtros

Para a lavagem dos filtros da ETA, por inversão de corrente, o método de lavagem via

reservatório elevado foi reativado. Neste contexto, visto que as dimensões do reservatório já foram estabelecidas, determina-se, conforme a ABNT NBR 12216:1992, a capacidade mínima de lavagem de, pelo menos, dois filtros, salvo para sistema que recorra a efluente de outras unidades.

5.7.1 Vazão de água para lavagem

A fim de obter uma expansão do leito filtrante que obedeça os limites impostos pela ABNT NBR 12216:1992, adotou-se uma velocidade ascensional de 75 cm/min.

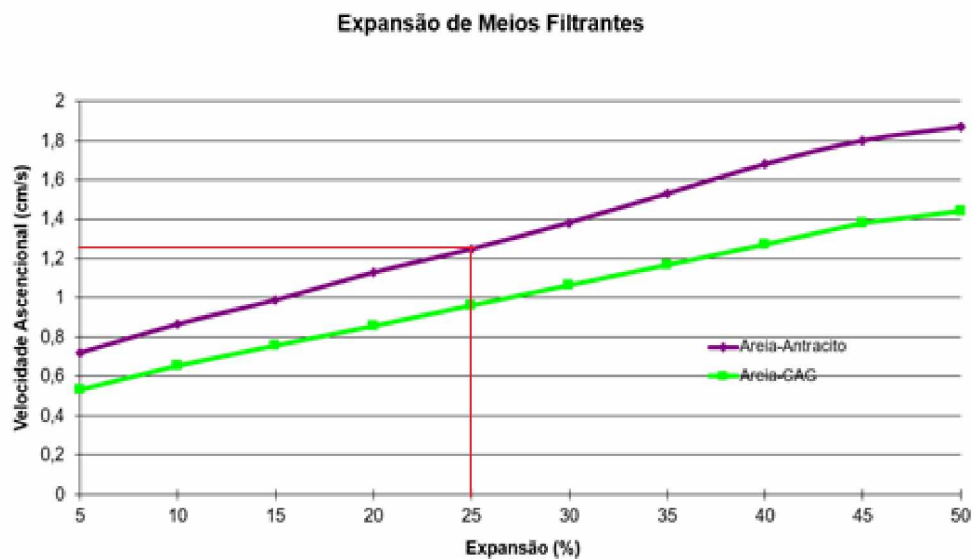
$$v_{asc} = 75 \frac{\text{cm}}{\text{min}} \times \frac{1 \text{ min}}{60\text{s}} \rightarrow v_{asc} = 1,25 \text{ cm/s} = 0,0125 \text{ m/s}$$

Assim, calcula-se a vazão da água de lavagem dos filtros, aplicando a Equação 12:

$$Q_{LAV} = 0,0125 \times (2,85 \times 8,55) \rightarrow Q_{LAV} = 0,305 \text{ m}^3/\text{s}$$

A Figura 15, mostra a expansão do leito filtrante em função da velocidade ascensional.

Figura 15 – Expansão de meios filtrantes.



Fonte: Adaptado de Ferreira Filho, 2017.

Desta forma, verificou-se uma expansão do leito filtrante de 25%, que atende os valores limites – entre 20% e 30% – definido pela ABNT NBR 12216:1992.

5.7.2 Capacidade do reservatório de água para lavagem

O volume de água necessário no reservatório para lavagem de um único filtro, foi

encontrada através da Equação 13:

$$\text{Vol} = 60 \times 0,305 \times 10 \rightarrow \text{Vol} = 183 \text{ m}^3$$

Atendendo as orientações da ABNT NBR 12216:1992, o reservatório deve ter capacidade mínima para lavagem de dois filtros, totalizando um volume de 366 m³ de reservação para atender o sistema proposto.

5.7.3 Tubulação de água para lavagem

Para valores recomendados quanto a velocidade da água de lavagem, geralmente fixados entre 2 m/s e 4 m/s, adotou-se uma velocidade de 3 m/s utilizada para o cálculo do diâmetro do conduto. Desta maneira, através da Equação 14, têm-se que:

$$0,305 = \frac{3 \times \pi \times D_{\text{lav}}^2}{4} \rightarrow D_{\text{lav}} = 0,36 \text{ m}$$

Logo, o diâmetro de projeto adotado será de 350 mm. Recalculando a velocidade de lavagem para este diâmetro:

$$v_{\text{lav}} = \frac{3 \times \pi \times 0,35^2}{4} \rightarrow v_{\text{lav}} = 3,17 \text{ m/s}$$

5.7.4 Coleta de água de lavagem

Conforme recomendações mencionadas na ABNT NBR 12216, definiu-se que a água de lavagem dos filtros será coletada por 2 canais longitudinais laterais de comprimento no sentido de maior dimensão do filtro, ou seja, com 8,55 m de extensão. Desta forma, aplicando a fórmula de Francis para vertedouros (Equação 15), calcula-se a altura de água sobre a borda do canal:

$$\frac{0,305}{2} = 1,838 \times 8,55 \times HC^{3/2} \rightarrow HC = 0,045 \text{ m}$$

Para o cálculo da altura de água no início do canal, foi considerada a largura útil das canaletas laterais já existentes na ETA Bom Jardim, de 0,70 m. Assim, aplicando a Equação 16:

$$\frac{0,305}{2} = 1,838 \times 0,7 \times HI^{3/2} \rightarrow HI = 0,24 \text{ m}$$

5.8 Altura vertical dos filtros

Para a determinação da altura vertical dos filtros, primeiro determina-se a altura mínima

($A_{\text{mín}}$) do topo do leito filtrante expandido à borda do canal, aplicando a Equação 17:

$$A_{\text{mín}} = 0,15 \times 2,85 = 0,43\text{m}$$

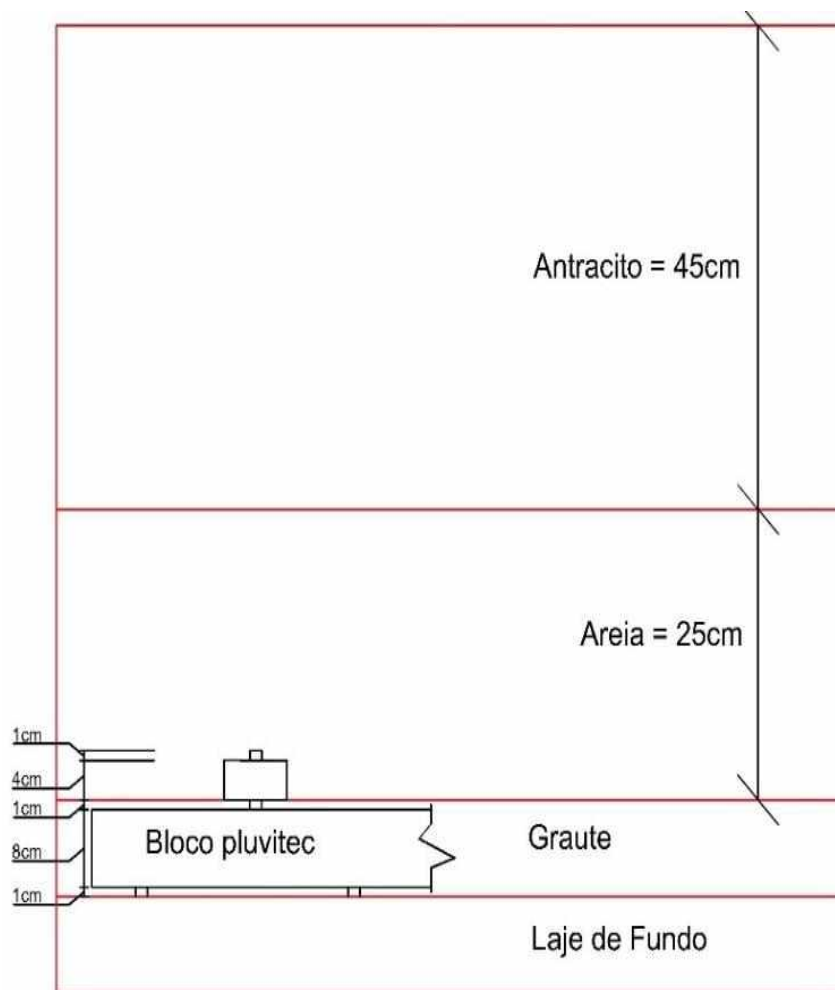
Considerando a expansão de 25%, através da Equação 18:

$$A_{\text{expansão}} = 0,25 \times 0,70 = 0,18\text{ m}$$

Logo, a altura mínima entre a borda do canal de coleta da água de lavagem e o topo do leito filtrante em repouso = $0,43 + 0,18 = 0,61\text{ m}$

A seguir, a Figura 16 detalha o corte em perfil do filtro:

Figura 16 – Corte longitudinal do filtro.



Fonte: Autor, 2019.

Portanto, tomando como referência as dimensões ilustradas na Figura 16, através da Equação 19:

$$A_{\text{topo do leito filtrante}} = (0,01 + 0,08 + 0,01) + 0,25 + 0,45 = 0,8\text{ m}$$

Assim, utilizando a Equação 20, determina-se a altura mínima da laje de fundo à borda do canal de água de lavagem:

$$A_{\text{borda do canal de água de lavagem}} = 0,80 + 0,43 + 0,18 = 1,41 \text{ m}$$

Logo, conforme a Equação 21, a carga hidráulica disponível para a filtração acima do topo do leito filtrante em repouso:

$$h_{\text{disponível}} = 0,18 + 0,43 = 0,61 \text{ m}$$

A carga hidráulica sobre o topo do leito filtrante em repouso é associada à perda de carga inicial verificada com o filtro recém lavado adicionada a perda de carga resultante no processo de retenção de impurezas – perda de carga crescente ao longo da carreira de filtração.

Tomando como referência as determinações sugeridas por Azevedo Netto (1987), já mencionadas anteriormente, será adotada a altura de água sobre o topo do leito filtrante em repouso de 1,80 m. A borda de descarga no canal de água de lavagem deverá situar-se a 0,30 m acima do nível de água máximo de filtração.

Desta forma, através da somatória de todas as alturas encontradas, totaliza uma altura interna de filtro igual a 2,80 m.

5.9 Cálculo das perdas de Carga

Para o cálculo das perdas de cargas no sistema proposto, consideram-se a soma das perdas de carga distribuídas e, também, as perdas de cargas localizadas. Neste molde, deverão ser consideradas tanto a perda de carga que ocorrem durante o processo de filtração, quanto as que resultam do processo de lavagem. Na filtração, a lâmina de água deve contemplar uma altura acima do leito filtrante para compensar essas perdas de carga, enquanto na lavagem dos filtros, deve ser considerada uma altura nas tubulações que advém do reservatório elevado. Para o cálculo da perda de carga no leito filtrante expandido, será tomado como base os trabalhos de Richter e Azevedo Netto (1987).

5.9.1 Cálculo das perdas de carga na filtração

Para vazão de projeto por filtro igual à 7200 m³/dia, temos:

$$Q_{\text{filtro}} = 7200 \times \frac{\text{m}^3}{\text{dia}} \times \frac{1 \text{ dia}}{24\text{h}} \rightarrow Q_{\text{filtro}} = 300 \text{ m}^3/\text{h}$$

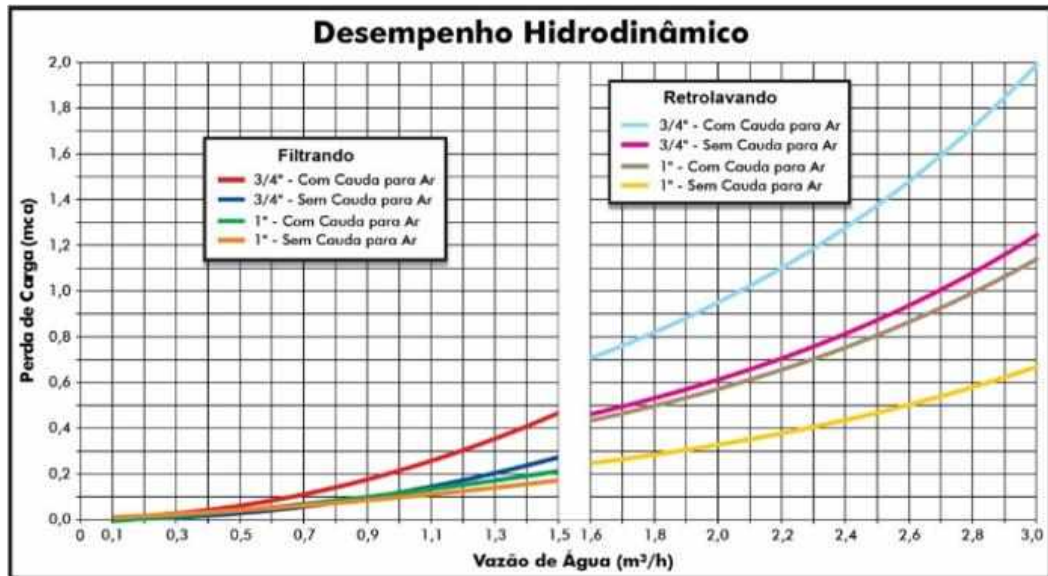
Logo, através da Equação 8, calcula-se a vazão de água filtrada em cada crepina:

$$Q_{\text{crepina}} = \frac{300}{800} \rightarrow Q_{\text{crepina}} = 0,375 \text{ m}^3/\text{h}$$

Tomando como referência o catálogo da Hidro Solo (Figura 17) de desempenho hidrodinâmico, é possível encontrar a perda de carga nas crepinas durante o processo de

filtração.

Figura 17 – Gráfico de desempenho hidrodinâmico das crepinas.



Fonte: Hidro Solo, 2019.

Considerando a tubulação vertical de ligação da crepina com 3/4" sem cauda para ar e a vazão de água de 0,375 m³/h, determinou-se a perda de carga por crepina igual a 0,035 m.

Já o cálculo da perda de carga na camada de areia é dado pela Equação 22:

$$h_{\text{areia}} = 0,005 \times 295,45 \times 0,25 \rightarrow h_{\text{areia}} = 0,37 \text{ m}$$

Enquanto a perda de carga na camada de antracito é encontrada através da Equação 23:

$$h_{\text{antracito}} = 0,0009 \times 295,45 \times 0,45 \rightarrow h_{\text{antracito}} = 0,12 \text{ m}$$

Para o cálculo da perda de carga nas tubulações durante o processo de filtração, deve-se considerar as perdas de cargas localizadas somadas as perdas de carga distribuída. As perdas de carga localizada advêm de fatores como a mudança de direção do fluido, alteração do diâmetro da tubulação e singularidades. Neste presente trabalho, será utilizado o método do Ks para o cálculo das perdas de carga localizada.

A tubulação de água filtrada no sistema do filtro considerada é de 350 mm, e será utilizada como base de cálculo. Conforme a Equação 1, temos:

$$A = \pi \times \frac{0,35^2}{4} \rightarrow A = 0,096 \text{ m}^2$$

A vazão por filtro já é conhecida, estabelecida em 7200 m³/dia, ou seja, 0,083 m³/s. Desta forma, utilizando a Equação 3, encontra-se a velocidade da água no conduto:

$$v = \frac{0,083}{0,096} \rightarrow v = 0,87 \text{ m/s}$$

Através do memorial de cálculo da Tecnosan, foi obtido o comprimento da tubulação

de água filtrada da ETA Bom Jardim correspondente à 7 metros, e também foi possível verificar as singularidades que compõem o trecho percorrido pela água filtrada e pela água de lavagem. Os valores de k foram encontrados através das Tabelas 2 e 3.

Tabela 2 – Valores de K para perdas de carga localizada

	k	v						
		2,40	2,60	2,80	3,00	3,20	3,40	3,60
Carga Cinet. V ² /2g	1,0	0,30	0,35	0,40	0,46	0,52	0,58	0,65
Entrada na tubulação	0,50	0,15	0,18	0,20	0,23	0,27	0,30	0,33
Curva 90°	0,40	0,12	0,14	0,16	0,18	0,21	0,24	0,26
Curva 45°	0,20	0,06	0,07	0,08	0,09	0,11	0,12	0,13
Válv. gav. aberta	0,20	0,06	0,07	0,08	0,09	0,11	0,12	0,13
Control. vazão	2,50	0,75	0,87	1,00	1,15	1,32	1,48	1,65
Válv. Borboleta aberta	0,25	0,08	0,09	0,10	0,12	0,13	0,15	0,17
Tê, pass. direta	0,60	0,18	0,21	0,24	0,28	0,32	0,35	0,40
Tê, saída lateral	1,20	0,30	0,46	0,52	0,60	0,69	0,77	0,86
Veloc.	1,00	0,30	0,35	0,40	0,46	0,52	0,58	0,65

Fonte: Vianna, 1997.

Tabela 3 – Valores de K (Parte 2).

Tipo da peça	K
Ampliação gradual	0,30
Bocais	2,75
Comporta, aberta	1,00
Controlador de vazão	2,50
Cotovelo de 90°	0,90
Cotovelo de 45°	0,40
Crivo	0,75
Curva de 90°	0,40
Curva de 45°	0,20
Curva de 22,5°	0,10
Entrada normal de canalização	0,50
Entrada de Borda	1,00
Existência de pequena derivação	0,03
Junção	0,04
Medidor Venturi	2,50
Redução gradual	0,15
Registro de ângulo, aberto	5,00
Registro de gaveta, aberto	0,20
Registro de globo, aberto	10,00
Saída de canalização	1,00
Tê, passagem direita	0,60
Tê, saída de lado	1,30
Tê, saída bilateral	1,80
Válvula de pé	1,75
Válvula de retenção	2,50

Fonte: Carvalho, 2008.

Valores de k para as singularidades que compõe o sistema:

- Entrada de canalização: $k = 1$
- Tê de saída lateral: $k = 1,3$
- Curva de 90° (2x): $k = 2 \times 0,4 = 0,8$
- Válvula borboleta aberta: $k = 0,3$
- Saída de canalização: $k = 1$

Assim, para o montante dos valores de k igual a 4,4 e utilizando a Equação 4:

$$H_{\text{localizada}} = \frac{4,4 \times 0,87^2}{2 \times 9,81} = 0,17 \text{ m}$$

Para o cálculo das perdas de carga distribuída (Equação 5), utilizou-se o método de Hazen – Williams, o mais empregado no transporte de água e esgoto nas diversas canalizações com diâmetro maior do que 50 mm. Para o cálculo da perda de carga distribuída, considerou o coeficiente de rugosidade C (Tabela 4) igual à 90, por ser compatível com os tubos metálicos utilizados na ETA Bom Jardim.

Tabela 4 – Valores para o coeficiente de rugosidade C.

Material	C
Aço corrugado	60
Aço com juntas lock-bar, em serviço	90
Aço rebitado, tubos novos	110
Aço soldado, tubos novos	130
Aço soldado com revestimento especial	130
Concreto, bom acabamento	130
Ferro fundido, novos	130
Ferro fundido, usados	90
Madeiras em aduelas	120
Aço com juntas lock-bar, tubos novos	130
Aço galvanizado	125
Aço rebitado, em uso	85
Aço soldado, em uso	90
Cobre	130
Concreto, acabamento comum	120
Ferro fundido, após 15-20 anos de uso	100
Ferro fundido revestido de cimento	130
Tubos extrudados, PVC	150

Fonte: Guia da Engenharia, 2019.

$$H_{\text{distribuída}} = 10,641 \times \frac{0,083^{1,85}}{90^{1,85} 0,35^{4,87}} \times 7 = 0,03 \text{ m}$$

Logo, utilizando a Equação 24, foi encontrada a perda de carga total em todo o processo de filtração.

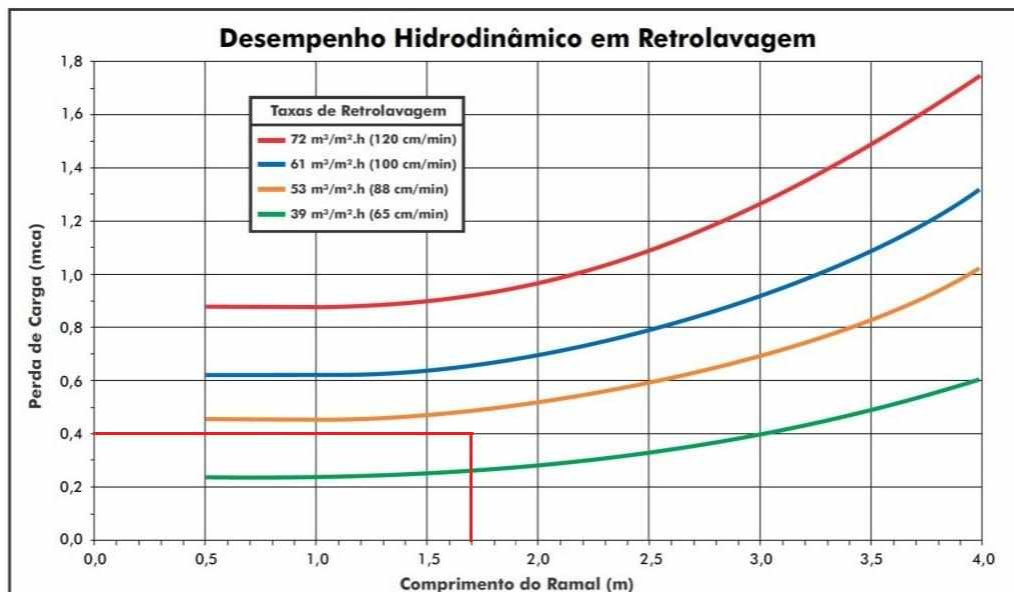
$$h_{\text{total de filtração}} = 0,035 + 0,37 + 0,12 + 0,17 + 0,064 = 0,73 \text{ m}$$

A altura mínima de água na filtração deve ser igual ou superior a somatória de perdas de carga na filtração, quando o filtro é recolocado em operação após a lavagem dos filtros, ou seja, a altura mínima de água nos filtros devem ser de 0,73 m.

5.9.2 Cálculo das perdas de carga durante a lavagem

Para o cálculo das perdas de carga nos blocos Pluvitec, foi utilizado o catálogo da Hidro Solo da curva de desempenho hidrodinâmico em retro lavagem (Figura 18). Considerando a velocidade ascensional entre a faixa de 65 cm/min e 88 cm/min (valores aproximados ao utilizado no presente trabalho), e comprimento total do ramal de 1,7 m – composto pelo braço dos blocos Pluvitec com 1,4 m acrescido do tubo de chegada à canaleta central com extensão de 0,3 m –, tem-se uma perda de carga de 0,4 m.

Figura 18 – Gráfico de desempenho hidrodinâmico em retrolavagem.



Fonte: Adaptado da Hidro Solo, 2019.

A perda de cálculo na camada de areia expandida foi calculada através da Equação 25:

$$H_{\text{areia}} = 0,96 \times 0,25 = 0,24 \text{ m}$$

Já para a perda de carga para a camada de antracito expandida foi utilizada a Equação 26:

$$H_{\text{antracito}} = 0,25 \times 0,45 = 0,11 \text{ m}$$

Para o cálculo da perda na tubulação foram consideradas, também, parâmetros e dados obtidos do memorial de cálculo da Tecnosan.

Os valores de k para as singularidades que compõe o sistema de lavagem que corresponde o caminhamento do reservatório para água de lavagem até os filtros são:

- Entrada de tubulação: $k = 0,50$
- Curvas de 90° (3x): $k = 1,20$
- Controlador de vazão: $k = 2,50$
- Tê passagem direta (6x): $k = 3,60$
- Tê saída lateral: $k = 1,3$
- Registro de gaveta aberto: $k = 0,20$
- Saída de canalização: $k = 1$

Assim, para somatória dos valores de k igual a 10,3 e velocidade de água para lavagem igual a 3,17 m/s, utilizando a Equação 4:

$$H_{\text{localizada}} = \frac{10,9 \times 3,17^2}{2 \times 9,81} = 5,28 \text{ m}$$

Para o cálculo das perdas de carga distribuída (Equação 5), considerou-se o mesmo comprimento de tubulação para água de lavagem expressa no memorial de cálculo da Tecnosan, já que consiste na mesma concepção de projeto. No cálculo da perda de carga distribuída na tubulação para água de lavagem dos filtros, também foi estimado o valor do coeficiente de rugosidade C igual à 90, uma vez que as tubulação de água filtrada e a tubulação para água de lavagem são compostas pelo mesmo material.

$$H_{\text{distribuída}} = 10,65 \times \frac{0,305^{1,85}}{90^{1,85} 0,35^{4,87}} \times 105 = 0,05 \text{ m}$$

Na operação de lavagem dos filtros, o reservatório elevado deve ter altura suficiente para que a água supere as perdas de carga localizada e distribuída por toda extensão da canalização, fundo do filtro, leito filtrante expandido e, ainda, atingir altura necessária para verter sobre as cristas das calhas coletoras da água de lavagem. Através das somatórias das perdas de carga na lavagem dos filtros, é possível verificar se a altura do reservatório consegue atender o sistema proposto. Neste caso, a altura da laje de fundo do reservatório à crista dos vertedores de recolhimento da água de lavagem deve ser igual ou superior a 6,45 m.

6. ANÁLISE DE RESULTADOS

Compondo o sistema de filtração da concepção de projeto proposto foram dimensionados 24 filtros rápidos por gravidade com nível de água constante e taxa de filtração variável. Os filtros são constituídos por uma camada dupla filtrante, de antracito e areia, que facilitam e otimizam as operações de filtração e lavagem.

Neste presente trabalho, para os filtros da ETA Bom Jardim, foram consideradas uma vazão de alimentação dos filtros da ordem de 2 m³/s, com área já definida de 2,85 m x 8,55 m. Por se tratar de um sistema de filtração já existente, a taxa de filtração encontrada foi de 295,45 $\frac{\text{m}^3}{\text{m}^2.\text{dia}}$, a qual atende as preconizações da ABNT NBR 12216:1992, que restringe a taxa de filtração a 360 $\frac{\text{m}^3}{\text{m}^2.\text{dia}}$ para filtros com camada dupla filtrante.

Quanto ao processo de filtração – em relação as informações obtidas durante visitas in loco na ETA Bom Jardim no ano de 2019 – foi possível verificar, também, a redução do diâmetro da tubulação de água filtrada, isto porquê, foram considerados números de filtros diferentes. Na concepção de projeto da ETA Bom Jardim, foram considerados um sistema de filtração composto por 12 unidades de filtros (24 semi – filtros), enquanto no presente trabalho optou-se por dimensionar o sistema de filtração para 24 filtros. Esta diferença de concepção de projeto para o dimensionamento, implica diretamente na quantidade de água filtrada por filtro, o que justifica a redução do diâmetro da canalização de água filtrada.

Através de dados obtidos in loco durante visita a ETA Bom Jardim no ano de 2019, verificou-se uma altura do reservatório de água para lavagem igual a 10,73 m, assim, pode-se observar a viabilidade da implantação dos blocos pluvitec, visto que a carga hidráulica necessária para vencer as perdas de carga no processo de lavagem dos filtros é menor do que a projetada na ETA Bom Jardim. Este resultado mostra que, para o sistema de filtração já existente, não seria necessária qualquer modificação quanto a altura do reservatório da água de lavagem, evitando gastos e modificações no sistema que dificulta a implementação da concepção de projeto proposta. O diâmetro da tubulação de saída de água do reservatório calculada neste presente trabalho foi de 350 mm, inferior a existente na ETA Bom Jardim, tubulação de água de lavagem com diâmetro de 500 mm.

Para efeitos comparativos, a seguir será abordada a consequência proveniente da retirada da laje de fundo falso dos filtros da ETA Bom Jardim e o impacto da implantação da tecnologia de blocos Pluvitec em relação a altura interna dos filtros.

Para o caso 1, verifica-se os filtros sem a laje de fundo falso, com aplicação da

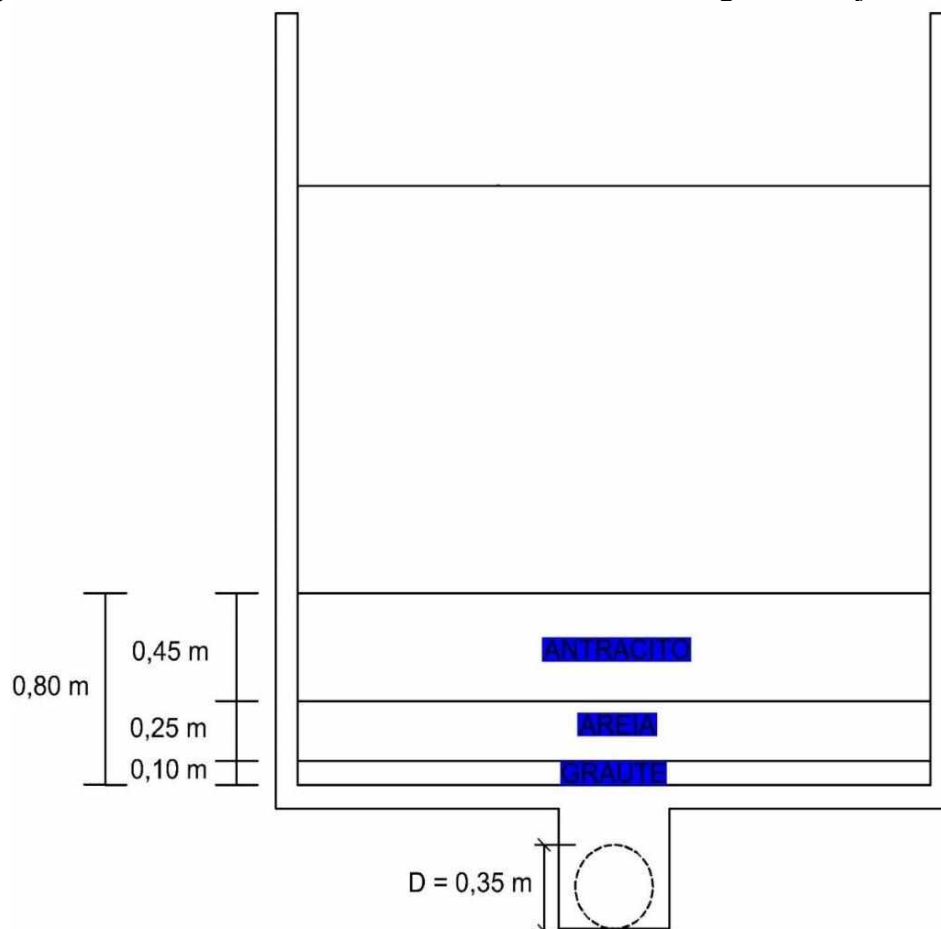
tecnologia de blocos pluvitec e canaleta central para coleta da água de lavagem sob a laje de fundo. Este sistema, devido a utilização de bocais com ranhuras laterais de 0,4 mm entre os discos formadores das crepinas, dispensa a necessidade de implantação da camada suporte.

Na alternativa de concepção de projeto apresentada neste caso, evidencia-se, também, o aumento de área útil do filtro, implicando numa diferença de altura de 90 cm da laje de fundo até o topo da camada filtrante. Para projetos que ainda não foram elaborados e/ou executados, estes resultados proporciona filtros com menores alturas, menores custos quanto a quantidade de materiais utilizados no método construtivo, promovendo redução do valor total para implementação destes filtros.

O canal de água filtrada mostrada nesta proposta, deve ser considerado para as situações em que o projeto, de preferência, ainda não tenham sido executados. Isto porquê, demandaria a modificação da laje de fundo, alteração da altura da tubulação de água filtrada e água de lavagem, inviabilizando o processo.

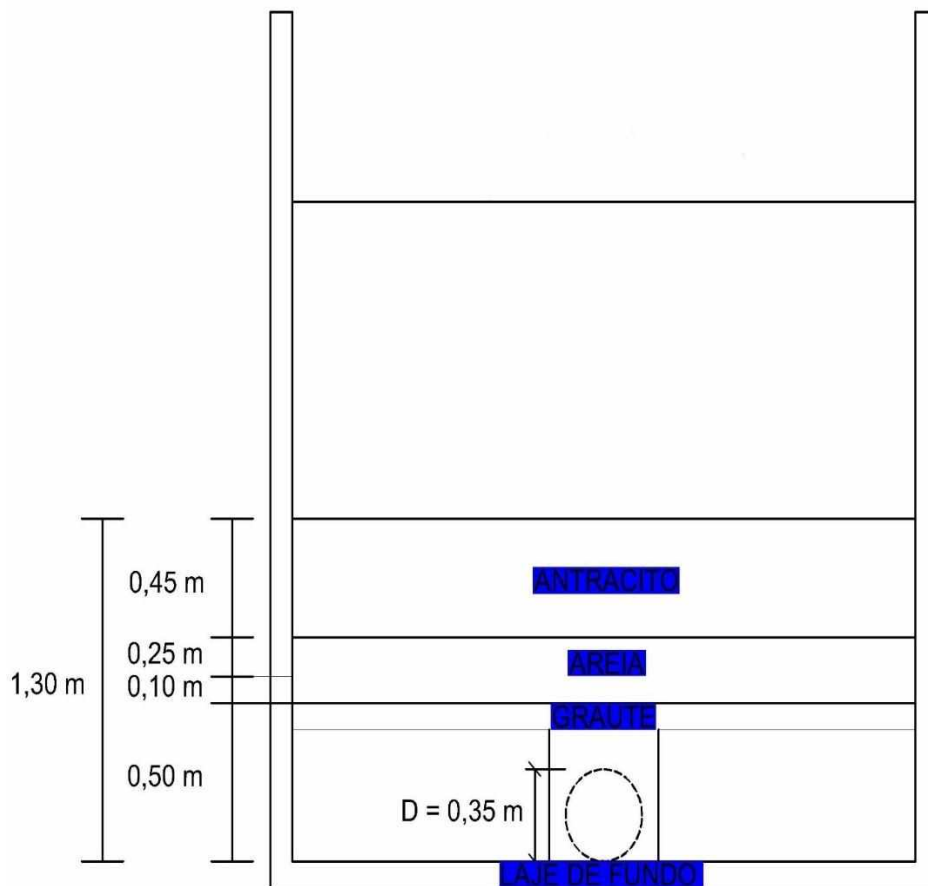
Na Figura 19 é ilustrado o perfil do filtro do sistema proposto.

Figura 19 – Filtros com blocos Pluvitec e sistema de drenagem sob laje de fundo.



Enquanto para o caso 2 (Figura 20), foram consideradas, também, a utilização da tecnologia de blocos Pluvitec, ou seja, o mesmo sistema elucidado no caso 1. A diferença é evidenciada na posição do canaleta central para captação da água filtrada, dispensando a remodelagem da laje de fundo do filtro da ETA observada neste presente trabalho. Desta forma, nota-se que a diferença da laje de fundo para o topo da camada de leito filtrante é de apenas 40 cm. Considerando que o filtro existente tem dimensões em planta de 2,85 m x 8,55 m, é possível verificar um ganho de volume útil de 9,747 m³.

Figura 20 – Filtros com blocos Pluvitec e sistema de drenagem sobre a laje de fundo.



Fonte: Autor, 2019.

7. CONCLUSÃO

O sistema de filtração presente na tecnologia de tratamento de água de Ciclo Completo – amplamente empregada na potabilização de águas de mananciais superficiais no Brasil – apresenta grande eficiência no processo de clarificação e supressão dos colóides e matérias em suspensão presentes na água. Este processo denota congruência com o padrão microbiológico

atendendo as preconizações da portaria nº2914/2011 do Ministério da Saúde.

Os resultados obtidos, através do dimensionamento e análises das concepções de projetos elucidadas neste trabalho mostra a viabilidade da utilização dos blocos Pluvitec como proposta de melhoria do sistema de filtração da ETA Bom Jardim. Através dos cálculos foi possível verificar a eficiência do método de filtração, ampliando o desempenho hidráulico do sistema já existente. O significativo aumento da altura interna do filtro possibilita ótimo custo-benefício criando maior capacidade para o reservação de água a ser filtrada, ou reduzindo a altura interna útil dos filtros para implementação de novos projetos de sistema de filtração. Esta tecnologia mostrou-se eficaz por evitar a possibilidade de ruptura de crepinas ou danos a laje de fundo falso, no processo de lavagem dos filtros que podem causar – devido a pressões elevadas ocasionadas por falha de operação. A eficiência do incremento deste método construtivo para filtros rápidos por gravidade, mostra-se presente, ademais, por também apresentar baixa perda de carga na produção de água filtrada.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-12216: Projeto de estação de tratamento de água para abastecimento público**. Rio de Janeiro, 1992.
- AZEVEDO NETTO, J.M. **Técnica de Abastecimento e Tratamento de Água**, v.2, 3a Edição, CETESB, São Paulo, 1987.
- BIOPROJECT. **Filtração rápida**. Disponível em: <http://www.bioproject.com.br/>. Acesso em 26 de novembro de 2019.
- CARVALHO, D. F.; SILVA, L. D. **Escoamento em condutos forçados**, 2008. Disponível em: <http://www.ufrj.br/institutos/it/deng/leonardo/downloads/APOSTILA/Apostila%20IT%20503%20Cap%207.pdf>. Acesso em: 30 de nov. de 2019.
- COMUSA. **Projeto remanescente de ampliação das unidades de produção de água tratada da ETA Novo Hamburgo**, 2018. Disponível em: http://www.comusa.rs.gov.br/_common/dados/institucionallicitacoes/2018/1_TOMO_I_V1_Memorial_Descriptivo_Hidromecanico.pdf. Acesso em: 30 de nov. de 2019.
- DI BERNARDO, L. / SABOGAL PAZ, L. P. **Seleção de tecnologias de tratamento de água**. v.1. São Carlos: Ldibe, 2008.
- FERREIRA FILHO, S. S. **Tratamento de água: concepção, projeto e operações de tratamento**. Rio de Janeiro: Elsevier Editora Ltda., 2017.
- GUIA DA ENGENHARIA. **Perda de carga**, 2019. Disponível em: <http://https://www.guiadaengenharia.com/perda-carga/>. Acesso em: 27 nov. 2019.
- HUISMAN, L.; WOOD, W. E. **Slow sand filtration**. Geneva, Belgium: World Health Organization, 1974.
- 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 2019.
- MINISTÉRIO DA SAÚDE. **Portaria nº 2914 de 12 de dezembro de 2011**.
- HIDRO SOLO. **Blocos Pluvitec**. Disponível em: <http://https://hidrosolo.com.br/pt/produto/tratamento-de-agua/bloco-pluvitec-fundo-de-fluxo-confinado-para-filtro-de-areia>. Acesso em: 10 nov. 2019.
- PREFEITURA DE UBERLÂNDIA. **Departamento municipal de água e esgoto**, 2019. Disponível em: <http://https://www.uberlandia.mg.gov.br/prefeitura/orgaos-municipais/dmae/?pagina=Conteudo&id=745>. Acesso em: 25 nov. 2019.
- PETRANOVA. **Materiais filtrantes**, 2019. Disponível em: <http://www.petranova.com.br/site/index.php/materiais-filtrantes>. Acesso em: 25 nov. 2019.

Machado R. e Di Bernardo L. (1997) – **Dimensionamento de Filtros Rápidos por Gravidade com Taxa Declinante Variável**. 19º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, set., Foz do Iguaçu-PR, Brasil.

PREFEITURA DE UBERLÂNDIA. **Plano municipal de saneamento básico**, 2019. Disponível em: <http://https://www.uberlandia.mg.gov.br/2019/09/13/prefeitura-abre-consulta-publica-a-versao-consolidada-do-pmsb/>. Acesso em: 25 nov. 2019.

VIANNA, M. R. **Hidráulica aplicada às estações de tratamento de água**. 3a ed. Belo Horizonte: Imprimatur, 1997.