



UNIVERSIDADE DO SUL DE SANTA CATARINA
CAIO GOMES DE SOUZA

**DIMENSIONAMENTO DE FILTRO RÁPIDO DE DUPLA CAMADA
GRAVITACIONAL E PROPOSTA DE AUTOMATIZAÇÃO DO SISTEMA DE
TRATAMENTO QUÍMICO NA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA DE UMA
CONCESSIONÁRIA DE ÁGUA**

Tubarão
2018



UNIVERSIDADE DO SUL DE SANTA CATARINA

CAIO GOMES DE SOUZA

**DIMENSIONAMENTO DE FILTRO RÁPIDO DE DUPLA CAMADA
GRAVITACIONAL E PROPOSTA DE AUTOMATIZAÇÃO DO SISTEMA DE
TRATAMENTO QUÍMICO NA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA DE UMA
CONCESSIONÁRIA DE ÁGUA**

Relatório Técnico/Científico apresentado ao Curso de Engenharia Química da Universidade do Sul de Santa Catarina como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Prof. Dr. Marcos Marcelino Mazzuco

Tubarão

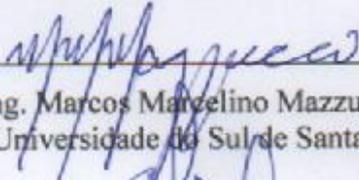
2018

CAIO GOMES DE SOUZA

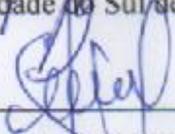
**DIMENSIONAMENTO DE FILTRO RÁPIDO DE DUPLA CAMADA
GRAVITACIONAL E PROPOSTA DE AUTOMATIZAÇÃO DO SISTEMA DE
TRATAMENTO QUÍMICO NA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA DE
UMA CONCESSIONÁRIA DE ÁGUA**

Este relatório técnico/científico foi julgado adequado à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química e aprovado em sua forma final pelo Curso de Graduação em Engenharia Química da Universidade do Sul de Santa Catarina.

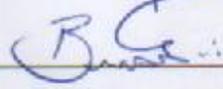
Tubarão, 27 de novembro de 2018.



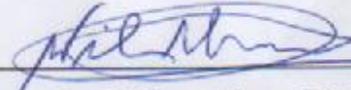
Professor Eng. Marcos Marcelino Mazzucco, Dr. (Orientador)
Universidade do Sul de Santa Catarina



Professor Eng. Alessandro de Oliveira Limas, MSc. (Avaliador)
Universidade do Sul de Santa Catarina



Professor Eng. Diogo Quirino Buss, MSc. (Avaliador)
Universidade do Sul de Santa Catarina



Professor Eng. Wilson Alano, MSc. (Avaliador)
Universidade do Sul de Santa Catarina

Dedico este trabalho ao meu pai Benjamim Medeiros de Souza Filho (in memoriam) e minha mãe Nézia Lidia Gomes de Souza, que nunca pouparam esforços para que esse sonho fosse realizado.

AGRADECIMENTOS

Aproveito este espaço para agradecer primeiramente a Deus, por ter me dado todas as condições e a força necessária para progredir na realização deste trabalho e colocando em minha volta pessoas maravilhosas que estiveram dispostas a me ajudar.

A meu pai Benjamim, a minha mãe Nézia, a minha irmã Nicolle e meu irmão Felipe, pela educação, pelo carinho e confiança, foram fundamentais para me ensinar os valores indispensáveis à formação do caráter, meu eterno amor e gratidão.

Aos meus colegas de faculdade Bruno, Mileny e minha namorada Fernanda por todo o apoio e companheirismo.

Ao professor orientador Marcos Marcelino Mazzuco, pelos conhecimentos, apoio e pela compreensão demonstrada no decorrer do trabalho.

Aos professores, que durante toda a minha trajetória acadêmica me ensinaram muito mais que teorias, me prepararam também para vida, todo o meu carinho e gratidão. Em especial aos professores Cesar Renato Alves da Rosa, Jonathan Alexander Bork, Rangel Pereira, Wilson Alano, Gilson Rocha Reynaldo, Maria Lúcia Soares Cochlar e Diogo Quirino Buss.

E por fim, ao meu amigo e supervisor de estágio Gilberto Machado Costa por conceder a realização do estágio no qual deu origem ao presente trabalho.

“Lembre-se que as pessoas podem tirar tudo de você, menos o seu conhecimento”
(Albert Einstein).

RESUMO

A etapa de filtração reduz consideravelmente por meio dos seus variados tipos de mecanismos, grande parte das partículas suspensas ou microrganismos que possam vir a ser prejudiciais a nossa saúde. Além disso, para garantir uma ótima precisão nas dosagens de produtos químicos, contamos com a última tecnologia disponível no mercado para o controle automatizado de dosagem com acesso de dados e ajustes *online*, reflexo da indústria 4.0 ao nosso favor. O presente trabalho tem como objetivo aprimorar o sistema de tratamento de água da concessionária pública de água, para isso foram dimensionadas duas unidades de filtração rápida de camada dupla gravitacional, com dimensões de 3,33 m por 2,50 m totalizando 8,33 m² por unidade, o conjunto de filtros possui capacidade de filtrar 250 m³/h de água. Para reforçar a melhoria na estação de tratamento, foi proposto a automatização do sistema de tratamento químico, fazendo com que as dosagens de produtos químicos tenham um controle mais rigoroso, com o auxílio de sensores, atuadores e controlador.

Palavras-chave: Indústria 4.0; Filtro de dupla camada; Sistema de tratamento de água.

ABSTRACT

The filtration step considerably reduces by means of its various types of mechanisms, much of the suspended particles or microorganisms that may be detrimental to our health. In addition, to ensure optimum accuracy in chemical dosages, we rely on the latest technology available in the market for automated dosing control with data access and online adjustments, a reflection of industry 4.0 in our favor. The present work aims to improve the water treatment system of the public water utility, for which two units of gravitational double layer rapid filtration were measured, with dimensions of 3.33 m by 2.50 m totaling 8, 33 m² per unit, the filter set has the capacity to filter 250 m³ / h of water. In order to reinforce the improvement in the treatment plant, it was proposed to automate the chemical treatment system, making the dosages of chemicals have a more rigorous control, with the aid of sensors, actuators and controller.

Keywords, Industry 4.0 ; Double layer filter; Water treatment system.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Etapas de Tratamento.....	17
Figura 2 – Mecanismo de transporte de massa.....	24
Figura 3 – Crepina.	35
Figura 4 – Sensor de vazão ultrassônico.	47
Figura 5 – Sensor de concentração de cloro.	48
Figura 6 – Sensor de concentração de flúor.	49
Figura 7 – Sensor de turbidez.	49
Figura 8 – Sensor de pH.	50
Figura 9 – Bomba dosadoras.	51
Figura 10 – Controlador	51
Figura 11 – Vista de superior do filtro.	54
Figura 12 – Vista lateral do filtro.	54
Figura 13 – Vista superior do filtro.	55
Figura 14 – Vista lateral do filtro.	56
Figura 154 – Fluxograma de controle do sistema de tratamento.....	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais características da água bruta.	17
Tabela 2 – Principais características dos meios filtrantes.	28
Tabela 3 – Especificação Básica Para Camadas Filtrantes.....	33
Tabela 4 – Alturas Das Camadas Filtrantes Do Projeto.	33
Tabela 5 – Altura da Coluna de Água.	35
Tabela 6 – Controladores de Vazões de água filtrada.	36
Tabela 7 – Reguladores de vazão para água de lavagem.	43
Tabela 8 – Vazões máximas de calhas de coleta de água de lavagem em L/s.	43
Tabela 9 – Custo de implantação dos filtros.....	57
Tabela 10 – Custo de implantação da automatização.....	58

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	JUSTIFICATIVA E PROBLEMA	15
1.2	OBJETIVOS	16
1.2.1	OBJETIVO GERAL	16
1.2.2	Objetivos Específicos.....	16
2	REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1	ANÁLISE OPERACIONAL DO SISTEMA DE TRATAMENTO DE ÁGUA DE EMPRESA CONCESSIONÁRIA DE TRATAMENTO E DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA	17
2.1.1	Captação.....	17
2.1.2	Gradeamento	18
2.1.3	Tratamento Químico.....	18
2.1.4	Reservatório e Distribuição	18
2.2	DEFICIÊNCIAS CONSTATADAS NO SISTEMA	19
2.2.1	Processo de Filtração	19
2.2.2	Medição de vazão	19
2.3	PROCESSO DE FILTRAÇÃO.....	19
2.3.1	História dos filtros.....	19
2.3.2	Mecanismos de filtração	21
2.3.2.1	Mecanismo de transporte de partículas	21
2.3.2.1.1	<i>Peneiramento.....</i>	22
2.3.2.1.2	<i>Sedimentação.....</i>	22
2.3.2.1.3	<i>Interceptação.....</i>	23
2.3.2.1.4	<i>Impacto inercial.....</i>	24
2.3.2.1.5	<i>Difusão.....</i>	24
2.3.2.2	Mecanismo de adsorção	25
2.3.2.2.1	<i>Forças de Van de Waals.....</i>	25
2.3.2.2.2	<i>Forças eletroquímicas</i>	26
2.3.2.2.3	<i>Ponte química.....</i>	26
2.3.3	Filtros Rápidos por gravidade	27
2.3.4	Características dos grãos filtrantes	28
2.4	SISTEMAS DE CONTROLE.....	28
2.4.1	Instrumentos de medição.....	29

2.4.2	Elementos finais de controle.....	29
2.4.3	Transdutores.....	30
2.4.4	Controladores	30
3	DESENVOLVIMENTO	31
3.1	PROJETO DE FILTRO RÁPIDO GRAVITACIONAL DE CAMADA DUPLA.....	31
3.1.1	Necessidade da empresa.....	31
3.1.2	Taxa de filtração.....	31
3.1.3	Área de filtração	31
3.1.4	Número de Filtros.....	32
3.1.5	Formas e dimensões dos filtros	32
3.1.6	Espessura das camadas filtrantes e altura de água no filtro	33
3.1.6.1	Espessura das camadas	33
3.1.6.2	Quantidade de massa das camadas	33
3.1.6.2.1	<i>Massa necessária de antracito</i>	<i>33</i>
3.1.6.2.2	<i>Massa necessária de Areia</i>	<i>34</i>
3.1.6.3	Altura da coluna de água	35
3.1.7	Fundo dos filtros.....	35
3.1.7.1	Tipo de fundo	35
3.1.7.2	Diâmetro do tubo de coleta de água filtrada.....	36
3.1.8	Sistema de lavagem	37
3.1.8.1	Velocidade mínima de lavagem	37
3.1.8.1.1	<i>Velocidade mínima de lavagem para antracito.....</i>	<i>37</i>
3.1.8.1.2	<i>Velocidade mínima de lavagem para areia</i>	<i>37</i>
3.1.8.2	Velocidade máxima de lavagem.....	38
3.1.8.2.1	<i>Velocidade máxima de lavagem para antracito</i>	<i>38</i>
3.1.8.2.2	<i>Velocidade máxima de lavagem para areia</i>	<i>39</i>
3.1.8.3	Velocidade de lavagem.....	40
3.1.8.3.1	<i>Expansão para antracito</i>	<i>40</i>
3.1.8.3.2	<i>Expansão para areia.....</i>	<i>41</i>
3.1.8.3.3	<i>Expansão total do leito</i>	<i>42</i>
3.1.8.4	Vazão de água para lavagem	42
3.1.8.5	Volume de água para lavagem	43
3.1.8.6	Tubulação de alimentação de lavagem.....	43
3.1.8.7	Calha de coleta de água de lavagem.....	43

3.1.9	Altura do fundo dos filtros	44
3.1.10	Altura da calha de coleta de água de lavagem.....	44
3.1.11	Altura total da caixa do filtro.....	45
3.1.12	Perda de carga do leito filtrante.....	45
3.1.12.1	Perda de carga para a camada de antracito	45
3.1.12.2	Perda de carga para camada de areia	46
3.1.12.3	Perda de carga para as crespinas	47
3.1.12.4	Perda total do leito filtrante	47
3.2	INSTALAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS	47
3.2.1	Sensores.....	47
3.2.1.1	Sensor de vazão	47
3.2.1.2	Sensor de concentração de Cloro.	48
3.2.1.3	Sensor de concentração de Flúor.....	49
3.2.1.4	Sensor de turbidez	49
3.2.1.5	Sensor de pH.....	50
3.2.2	Atuadores	51
3.2.2.1	Bombas dosadoras	51
3.2.3	Controlador.....	51
3.3	AUTOMATIZAÇÃO DO SISTEMA.....	52
3.3.1	Controle de concentração de cloro	52
3.3.2	Controle de concentração de Flúor.....	52
3.3.3	Controle de pH	53
3.3.4	Controle de turbidez	53
4	RESULTADOS	54
4.1	FILTRO RÁPIDO DE DUPLA CAMADA POR GRAVIDADE.....	54
4.1.1	Desenho do filtro.....	54
4.1.2	Medidas e características.....	55
4.1.2.1	Vista superior do filtro.....	55
4.1.2.2	Vista lateral do filtro.....	56
4.1.3	Custo de implantação.....	57
4.2	AUTOMATIZAÇÃO DO SISTEMA.....	58
4.2.1	Custo de implantação.....	58
4.2.2	Fluxograma de controle do sistema	58
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	60

REFERÊNCIAS	61
ANEXOS	62
ANEXO A – FLUXOGRAMA DE CONTROLE.....	63
ANEXO B– VISTA LATERAL COM MEDIDAS.....	64
ANEXO C– VISTA SUPERIOR COM MEDIDAS	65

1 INTRODUÇÃO

As Estações de tratamento de água – ETAs tem um papel muito importante na qualidade da água, pois é nela que a água sofre variados tipos de tratamento para que a mesma chegue na torneira de nossas casas cristalina e respeitando os parâmetros estabelecido por lei. A etapa de filtração por sua vez reduz consideravelmente grande parte das partículas suspensas ou microrganismos que possam vir a serem prejudiciais a nossa saúde, por meio dos seus variados tipos de mecanismos de filtração. Além disso para garantir uma ótima precisão nas dosagens de produtos químicos contamos com a última tecnologia disponível no mercado para o controle automatizado de dosagem com acesso de dados e ajustes online, reflexo da indústria 4.0. Para o dimensionamento de um filtro de dupla camada gravitacional devemos levar em consideração diversos parâmetros a serem respeitados para seu melhor funcionamento. A proposta de automatização e de controle de dosagens torna o sistema de tratamento químico quase que independente com grande eficácia e preço acessível.

1.1 JUSTIFICATIVA E PROBLEMA

A água é um bem social essencial para a vida humana. Entretanto, percebe-se que, ao longo da história, ela vem sendo uma das “vítimas” da ação do homem na busca incessante do progresso com industrializações que, em muitos casos, poluem esse bem indispensável para a vida. Entretanto, como esse fato repercutiu em todo o mundo, novas formas de preservação da água e do meio ambiente, são apresentadas diariamente.

As Estações de Tratamento de Água – ETAs, vem se aprimorando para oferecer à população um produto com potabilidade adequada para o consumo humano. Assim, a qualidade do abastecimento de água potável para a população das cidades brasileiras vem ganhando uma considerável qualidade nos últimos anos. As tecnologias, cada vez mais acessíveis, nos permite ampliar os níveis de qualidade no tratamento e distribuição públicos de água, que, além de proporcionar aos consumidores um serviço de ponta, garantem também aumento na qualidade de vida da população servida.

Para garantir uma adequada qualidade, cada vez mais os órgãos de fiscalização intensificam suas ações de modo garantir que água entregue aos consumidores realmente esteja totalmente nos parâmetros estabelecido por lei.

Nesse sentido buscar-se-á a possibilidade de **projetar e instalar um filtro rápido de entrada e automatização do sistema de monitoramento e controle de dosagens em uma empresa de abastecimento público de água em município do sul de Santa Catarina no ano de 2018.**

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Projetar e instalar filtro de entrada e propor a automatização do sistema de monitoramento e controle de dosagens em empresa de abastecimento público de água, buscando oferecer a população uma água com a maior qualidade possível, e de acordo com os parâmetros legais.

1.2.2 Objetivos Específicos

- a) Analisar problemas apresentados na estação de tratamento de efluentes.
- b) Projetar filtro de dupla camada na estação de tratamento de água
- c) Propor a instalação de sensores de turbidez, cloro, pH, Flúor, vazão.
- d) Propor a automatização do sistema de dosagem com base na vazão e parâmetro de referência.
- e) Estimar custos de implantação.

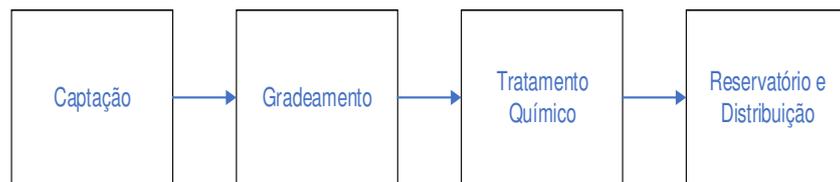
2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 ANÁLISE OPERACIONAL DO SISTEMA DE TRATAMENTO DE ÁGUA DE EMPRESA CONCESSIONÁRIA DE TRATAMENTO E DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

A água distribuída pela empresa investigada e responsável pelo saneamento básico da cidade recebe em sua estação de tratamento determinados tipos de tratamentos físico-químico para atender os parâmetros estabelecidos por lei.

Atualmente, os tratamentos realizados pela sua estação de tratamento estudada, são apresentados pelo fluxograma abaixo.

Figura 1 – Etapas de Tratamento



Fonte: do autor. 2018

2.1.1 Captação

A água cristalina é proveniente de um vertedouro natural próxima da captação, por meio de uma leve correnteza a água chega até uma barragem natural constituída de vegetal e areia típica de região litorânea.

A barreira tem como seu maior objetivo armazenar grande parte da água com finalidade de distribuir posteriormente à cidade, o excedente de água é destinado por meio de canos transbordadores a uma lagoa com nascente própria, da região do estudo.

Tabela 1 – Principais características da água bruta.

Característica	Cor (uC)	Turbidez (NTU)	pH	Ferro (ppm)
Água bruta	12	0,33	6,15	0,15

Fonte: do autor. 2018

2.1.2 Gradeamento

Na entrada da água para a estação de tratamento há uma caixa quadrada de concreto com duas grades, a primeira de abertura 20mm, e em seguida outra com abertura de 5 mm.

2.1.3 Tratamento Químico

Após a passagem pelo processo de gradeamento a água segue para uma um reservatório de concreto com 110 metros cúbicos, onde são dosados os produtos químicos por meio de dosadoras elétricas de regulagem manual, São realizadas dosagens de solução de hidróxido de cálcio para regulagem do pH, e também de solução hipoclorito de sódio e flúor para a desinfecção da água.

As dosagens de produtos químicos são realizadas próximas da válvula de retenção da sucção da bomba.

2.1.4 Reservatório e Distribuição

Uma bomba centrífuga de 50 Cv de potência com pressão manométrica de 72 metros de coluna d'água é responsável pelo transporte da água até os reservatórios de aproximadamente 500.000 litros localizados aproximadamente a 2 km do recalque.

Os reservatórios estão em desnível de aproximadamente 14 metros da cidade, cada reservatório tem altura de 14 metros e tem o nível controlado em aproximadamente 10 metros, obtendo-se uma pressão de 24 metros de coluna d'água no centro da cidade.

A vazão de água tratada é mensurada pela vazão teórica da bomba que varia entre 150 a 170 m³/h.

2.2 DEFICIÊNCIAS CONSTATADAS NO SISTEMA

2.2.1 Processo de Filtração

O sistema de tratamento não possui nenhum tipo de filtração no seu sistema, recentemente a empresa passou por uma fiscalização do órgão regulamentador ARIS - Agência Reguladora Intermunicipal de Saneamento, que a necessidade do processo de coagulação e decantação, porém a empresa foi notificada pelo órgão e recebeu um prazo de 240 dias para realizar a implantação de filtros no seu sistema.

2.2.2 Medição de vazão

O sistema não possui nenhum instrumento para a aferição da vazão de água tratada e distribuída, sendo assim, não há conhecimento da vazão que está sendo tratada e enviada para os reservatórios da cidade. Entretanto, sabe-se a vazão teórica da bomba, podendo haver diversas situações que podem variar a medida teórica fornecida pelo fabricante.

2.3 PROCESSO DE FILTRAÇÃO

2.3.1 História dos filtros

A primeira referência ao uso de filtros para o tratamento de águas ocorreu há aproximadamente 3.000 anos na Índia. Vários tipos de filtros foram utilizados em pequena escala para purificação de água. Há também alguns relatos muito antigos de clarificação de águas na China (MONTEGOMETY, 1985).

Os filtros inicialmente tinham um caráter doméstico. Entre nós foram usados por muito tempo os filtros de pedras porosas colocados em recipientes. Na França, os filtros de esponjas, panos, lã e outros materiais foram amplamente difundidos nos séculos XVIII e XIX.

Quando os primeiros filtros não domésticos foram feitos, a água filtrada não era distribuída por tubulações, mas foi vendida por galões para o consumidor. Foi assim que surgiram as primeiras empresas de água de natureza privada. A partir de 1856, na França os filtros de pressão apareceram: "Fonvielle " e "Souchon ". Os primeiros foram formados por um cone truncado de ferro fundido com uma tampa semiesférica, no qual havia 0,70 m de leito filtrante composto de 0,25 m de esponjas marinhas, 0,25 m de calcário e 0,20 m de areia de rio. (VALENCIA, 1973).

Foi na Inglaterra (Paisley, Escócia), em 1804, que originalmente pensou-se em fazer uma instalação de filtros para uma cidade inteira. Mais tarde, em 1829, em Londres (Chelsea), foi construída a primeira planta de filtros de areia lenta feita pela "The Chelsea Water Work Co. ". A medida que a demanda de água filtrada aumentava, se foi estudando mais profundamente o trabalho dos filtros e se descobriu, que não só fazem um processo de seleção, mas também transformam a matéria orgânica. Formaram-se duas escolas: os que acreditavam na filtração de cima para baixo (descendente) e aqueles que acreditavam em de baixo para cima (ascendente). Os primeiros alegaram que na filtração para baixo, a maior parte da matéria em suspensão fica mantida nas camadas superiores do leito, o que facilita a limpeza do filtro, pois seria suficiente raspar as camadas (procedimento ainda usado em filtros lentos). Os segundos diziam que filtrando o material cada vez mais fino, a gravidade estabeleceria a maioria das partículas na parte inferior do filtro, e o restante seria facilmente lavado invertendo o sentido o fluxo de trabalho. Lentamente, venceu a primeira escola (filtração descendente) e uso de filtros de areia lentos tornaram-se populares tanto na Europa como na América. (id *ibid.*).

Uma melhor compreensão do processo levou ao projeto dos filtros rápidos, que apareceram na América do Norte, no meio do século passado. Eram chamados de filtros "mecânicos" ou "americanos" em oposição aos "filtros ingleses" que foram os lentos. A grande inovação dos filtros rápidos foi a limpeza do leito filtrante, em vez de raspar a camada superior do mesmo, que foi um longo e caro sistema, a limpeza se fazia invertendo o sentido do fluxo, que no processo de filtração era de cima para baixo para cima, assim eliminam-se as impurezas que tinham sido retidas na camada. Isto facilitou a operação quase contínua de filtro e permitiu o uso de cargas superficiais consideravelmente maiores (aproximadamente 30 vezes mais) do que filtros lentos. (id *ibid.*).

O primeiro filtro "mecânico" ou rápido foi construído nos Estados Unidos, na " Cidade de Somerville em 1855, L Smith Hyatt (1835-1885), quem havia obtido patente no ano anterior para um sistema de "coagulação-filtração". Hyatt não fez uso de sulfato de alumínio, mas coagulante férrico, o qual era injetado no fluxo de entrada do filtro, para formar uma camada de material coagulado na superfície do mesmo. (id *ibid.*).

2.3.2 Mecanismos de filtração

A água, que entra em um filtro, contém uma variedade muito grande de partículas em suspensão. Seu tamanho pode variar de flocos relativamente grandes de 1 mm de diâmetro até colóides, bactérias e vírus com tamanhos inferiores a 10 μm . Dentro desta faixa, pode-se encontrar partículas eletropositivas, eletronegativas e neutras, ou micro flóculos absorvidos com polímeros. Todo este conjunto está em maior ou menor proporção retido no leito filtrante, preferencialmente aderido à superfície de seus grãos formando um filme em torno deles, cuja a resistência ao esforço de cisalhamento produzida pela força de arraste do fluxo é uma função da magnitude das forças que mantêm as partículas grudadas em cada elemento do meio granular. Se essas forças forem fracas, o floco será arrastado pelo fluxo e penetrará mais fundo, até que eventualmente apareça no efluente. Se eles são fortes, o floco será retido impedindo a passagem de água, temporariamente. (VALENCIA, 1973).

A partir daqui, o mecanismo que transporta a matéria em suspensão dentro da camada filtrante e adere-o com maior ou menor eficiência, tem que ser diferente, dependendo do tamanho das partículas, suas densidades e as características eletroquímicas que possuem. (id ibid.).

Existem dois mecanismos de filtração, o de transporte de partículas para dentro dos poros e a aderência de partículas entre os poros.

Para o transporte de partículas os mecanismos são:

- (a) Peneiramento
- (b) Sedimentação
- (c) Interceptação
- (d) Impacto inercial
- (e) Difusão

Para o mecanismo de aderência temos:

- (a) Forças de Van Der Waals
- (b) Forças eletroquímicas
- (c) Ponte química

2.3.2.1 Mecanismo de transporte de partículas

2.3.2.1.1 *Peneiramento*

Como o próprio nome do mecanismo diz, é semelhante ao funcionamento de uma peneira, onde as partículas maiores que a abertura dos poros ficam retidas na superfície da camada filtrante.

Segundo Valencia (1973) as partículas podem ser presas nos interstícios do leito, cujo o tamanho varia geralmente entre 0,1 e 0,2 mm para os grãos de 0,5 mm, e entre 0,3 e 0,6 mm para os grãos de 1,2 mm, porém um floco grande pode ter 0,5 a 2,0 mm de diâmetro. O peneiramento atua apenas nas camadas mais superficiais do leito e com partículas relativamente fortes capazes de resistir aos esforços de cisalhamento produzidos pelo fluxo, cuja velocidade aumenta nas constrições.

2.3.2.1.2 *Sedimentação*

Alguns autores dizem que os grãos do leito dos filtros possuem uma área superficial relativamente grande e pode haver a sedimentação de partículas na superfície do leito filtrante.

Hazen estima que para areia seca de 0,35 mm de diâmetro, 1 m³ pode ter uma área superficial de 8.000 m². (VALENCIA, 1973).

Segundo Valencia é estimado que somente 5,56% desta área está disponível para sedimentação de partículas, ou seja, 444 m² a cada 1 m³ de areia seca.

No entanto, este mecanismo não explica o por que o filtro remove o floco com peso específico muito próximo ao da água, ou partículas de tamanho coloidal, tais como bactérias ou vírus cuja taxa de sedimentação é da ordem de milímetros por dia. (id *ibid.*).

A sedimentação só pode ocorrer, portanto, com material suspenso relativamente grande e denso cuja velocidade de assentamento é alta, e em áreas do leito onde a carga hidráulica é baixa. (id *ibid.*).

Para as partículas com densidade superior à da água - flocos de sais de ferro e de alumínio apresentam usualmente densidade de 1,01 a 1,05 - descortina-se a perspectiva da sedimentação como mecanismo de transporte responsável pela eficiência do processo de filtração. Este mecanismo revela-se nos inúmeros canalículos formados pelos interstícios do meio filtrante que se comportam como microunidades de sedimentação. (LIBANO, 2010).

O escoamento da água no interior do meio filtrante sucede-se em regime laminar, governado pelas forças viscosas e assegurando o paralelismo entre as linhas de corrente. As

partículas de maior tamanho e densidade podem desviar-se da trajetória das linhas de corrente e depositarem-se na superfície dos grãos, vinculando a eficiência deste mecanismo à relação entre a velocidade de sedimentação da partícula, função da lei de Stokes. (LIBANO, 2010).

2.3.2.1.3 *Interceptação*

Segundo Valencia (1973) dois autores Camp e Stein trabalharam em modelo de filtro construído por uma caixa de plástico transparente, onde colocaram dentro grânulos cilíndricos de 1 mm de diâmetros e chegaram à conclusão que a remoção de flocos dentro do leito e devido primeiramente pelo contato das partículas de floco com a superfície dos grãos e de outros flocos já aderidos.

Valencia descreve o funcionamento destes mecanismos em alguns dos passos a seguir.

- (a) Inicialmente o floco começa a ficar na face superior do grão e, a medida que aumenta a quantidade de matéria aderida vai sendo recoberta como uma película, inclusiva para a face inferior.
- (b) Esta película vai crescendo com o tempo, assim que a velocidade do fluxo intersticial aumenta, enquanto o tamanho da constricção diminui, de modo que um número menor de partículas possa aderir aos grãos superiores e tenha que penetrar às camadas mais baixas.
- (c) A medida que a filtragem continua, aparecem segmentos que se penduram nos grãos, os quais eventualmente se rompem e são retidos mais abaixo por outros grãos menos recobertos
- (d) Este processo de arraste da película vai se tornando cada vez maior a medida que sua espessura cresce, assim que o assoreamento do meio filtrante progride na profundidade.
- (e) Há uma diferença marcante na capacidade de aderir às partículas do floco. As partículas fracas são arrastadas e substituídas por outras mais fortes. Entretanto "quase todas as soluções preparadas, conclui Stein, teve suas características Peculiar. Pequenas diferenças no pH final, muitas vezes afetou a capacidade de adesão e resistência do filme floco ao esforço de cisalhamento".

Esta última observação não é compatível com o conceito de interceptação direta. Se as partículas forem mantidas pelo simples estreitamento das linhas de fluxo, a filtração será independente das características químicas da suspensão. (VALENCIA, 1973).

2.3.2.1.4 Impacto inercial

Quando a velocidade do fluxo é baixa, a partícula viaja como se supôs anteriormente com as linhas de fluxo. Por outro lado, quando a velocidade é alta e a partícula é grande, deve-se levar em conta os efeitos da inércia, a qual faz com que aquela partícula possa seguir uma trajetória distinta das linhas de fluxo, se adquirir quantidade de movimento suficiente para isso. (id *ibid.*).

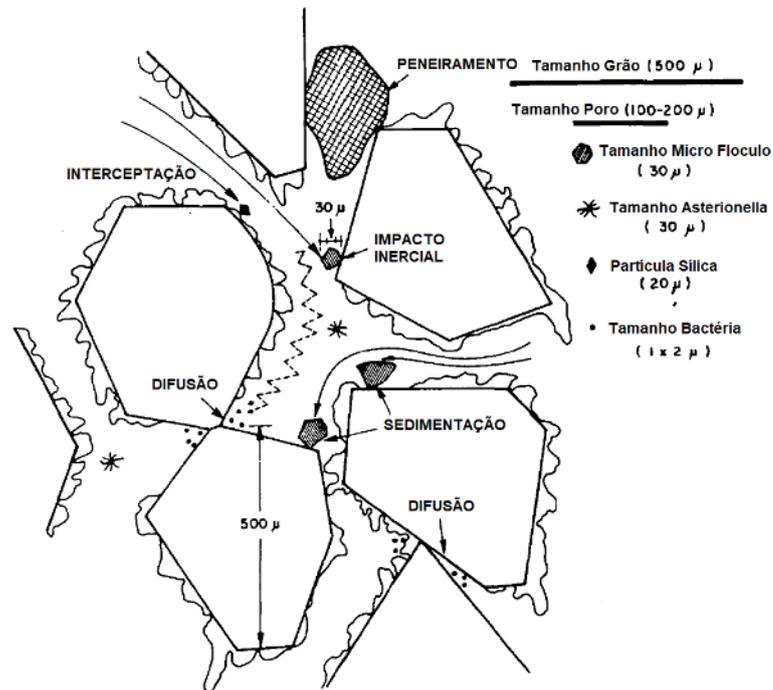
Segundo Valencia ao se chocar com o grão do leito de filtração a partícula toma uma trajetória diferente do fluxo em que ela se encontra. O fluxo escoava desviando do grão e devido a seu peso a partícula acaba perdendo a quantidade de movimento necessária para acompanhar o fluxo e fica aderida nos grãos do leito.

2.3.2.1.5 Difusão

Existe uma tendência das partículas pequenas a difundir-se desde áreas de maior concentração, até áreas de menor concentração, devemos levar em conta que a maioria das partículas que chegam no filtro, são maiores de 10 micras. (id *ibid.*).

Segundo Valencia este mecanismo tem como força motriz a concentração, então as partículas presentes no leito atraem as partículas do fluxo (figura 2).

Figura 2 – Mecanismo de transporte de massa



Fonte: Valencia, 1973.

2.3.2.2 Mecanismo de adsorção

2.3.2.2.1 Forças de Van de Waals

V. Macke e S. Macke sugerem que as forças de Van der Waals são primariamente responsáveis pela aderência das partículas aos grãos do filtro. Eles dizem: "Dentro da variação do raio desde a superfície de cada grão sobre a qual as forças de aderência são operativas, há um volume em torno de cada grão, que pode ser designado como espaço de adesão e as partículas suspensas que entram neste espaço seriam removidas do fluxo, à medida que são atraídos para aderir à superfície dos grãos". "A ação é análoga a um sedimentador, de profundidade δR e comprimento L , em que a força de gravitação é substituída pelas forças de Van der Waals". (VALENCIA, 1973).

Estas forças constituem-se em forças de atração, podendo existir entre partículas de mesma carga, neutras ou de cargas opostas, sendo, porém, seu campo de ação limitado a distâncias muito curtas. A grandeza das forças de van der Waals e, por conseguinte, a adesão das partículas ao meio filtrante são também governadas pela dimensão e densidade das

partículas afluentes à unidade filtrante, tendendo a aumentar com a redução da distância entre as mesmas e os grãos. No entanto, tais forças exercem relativa importância no processo de adsorção entre partículas. (LIBANO, 2010).

2.3.2.2.2 *Forças eletroquímicas*

Considerando este mecanismo como o responsável pela adesão do material suspenso para o meio filtrante, três casos podem ser considerados de acordo com Kaufman. (VALENCIA, 1973).

- (a) Os grãos médios do filtro são negativos e coágulos de flocos são positivos. Neste caso há uma força atrativa entre o meio e das partículas, que faz a única aproximação destes aos grãos do leito, pode produzir atração e adesão. (id *ibid.*).
- (b) Os grãos do meio filtrante são negativos enquanto que coágulos ou partículas são neutros. Neste caso, a barreira energética desapareceu e todo o contato pode ser esperado para terminar em aderência. (id *ibid.*).
- (c) Os grãos do meio filtrante são negativos e os coágulos também são negativos. Neste caso há uma repulsão entre si, mas as forças hidrodinâmicas podem ocasionalmente superar a barreira da energia e aproximar bastante coágulos aos grãos, de modo que as forças atrativas de Van Der Waals possam atuar. A probabilidade de adesão das partículas neste caso é menor do que nas anteriores. Esta hipótese é bastante consistente com os resultados práticos, e ajuda a explicar por que a dosagem mais alta ou menor de coagulantes influencia tão estreitamente o comportamento dos filtros. (id *ibid.*).

2.3.2.2.3 *Ponte química*

As partículas com seus segmentos poliméricos aderidos, ao cruzar as constrições do meio filtrante, se ligam com os segmentos soltos adsorvidos pelos grãos ou por partículas já aderidas ao leito filtrante e permanecem nesta forma retidas. (id *ibid.*).

Uma vez que a partícula esteja aderida ao meio filtrante elas podem realizar pontes químicas entre elas, ou seja, as partículas já aderidas nos grãos podem atrair outras partículas dos fluxos, aderindo umas nas outras.

2.3.3 Filtros Rápidos por gravidade

O processo de filtração tem seu papel fundamental no tratamento de água, o processo baseia-se no escoamento de um líquido através de sólidos porosos, onde ficarão retidas partículas maiores que a abertura dos poros dos sólidos, essas partículas retidas podem ser sólidos suspensos em água e até mesmo bactérias prejudiciais à saúde.

A areia de sílica é um dos sólidos mais conhecidos para a utilização como sólido filtrante em filtros, antigamente os filtros eram compostos somente de areia, chamados então de filtro de camada simples.

Com o avanço tecnológico surgiram os filtros de camada dupla, onde há uma camada de areia de sílica e posteriormente uma camada de carvão antracito, trata-se de um carvão mineral totalmente limpo e insolúvel em água.

Os filtros de dupla camadas, por sua vez possuem uma taxa de filtração muito maior do que os filtros de camada simples, alguns fabricantes afirmam que essa taxa pode chegar a ser o dobro dos filtros simples, com isso, os filtros de dupla camadas tendem a possuir uma área reduzida e apresentar uma eficiência muito maior na remoção dos parâmetros de cor aparente, turbidez e odor.

Além das camadas com sólidos filtrantes, os filtros podem ou não necessitar de uma camada de retenção, chamada de camada suporte, pois alguns fundos falsos dispensam o uso desta camada.

A camada suporte consiste em 5 camadas de pedregulhos, também conhecidos como cascalhos, são 5 camadas de tamanhos distintos não ultrapassando 25 cm de espessura total, porém, podem variar conforme o fabricante do fundo falso específica, tem como seu maior objetivo garantir que partículas de areia e carvão não escapem do filtro para o fundo falso.

No mercado atual existem diversos tipos de fundos falsos, os mais famosos são: Lopolde, Wagner Blocks, Wheeler e de Crepina.

Pelo fundo falso é retirada a água filtrada para distribuição e posteriormente é injetado água para realizar a retro lavagem do meio filtrante, escoam-se água já filtrada de baixo para cima em uma velocidade controlada com intuito de expandir as camadas para a retirada dos materiais retidos nos poros.

2.3.4 Características dos grãos filtrantes

Tabela 2 – Principais características dos meios filtrantes.

Característica	Areia de sílica	Antracito	Carvão Ativado	Granada
Densidade (kg/m ³)	2.650	1.450 a 1.730	1.300 a 1500	3.600 a 4.200
Porosidade (%)	0,42 a 47	56 a 60	50	45 a 55
Esfericidade	0,7 a 0,8	0,46 a 0,6	0,75	0,60

Fonte: Cleasby e Logsdon (1999).

2.4 SISTEMAS DE CONTROLE

Mazzucco, afirma:

A busca de sistemas para automatização e controle de tarefas é progressiva e abrange todos os segmentos da vida moderna, de tarefas domésticas até grandes produções industriais. Registros históricos indicam que os egípcios criaram o primeiro sistema de controle, um regulador de nível para um relógio d'água. A revolução industrial somente tomou impulso com o desenvolvimento de mecanismos de controle automático, desde que o controle manual não é viável em processos massivos de produção. Para as máquinas a vapor os reguladores de nível, temperatura e pressão são dispositivos indispensáveis. No período de 1600 a 1800 os sistemas de controle ganharam importância. A partir de 1800 estudos matemáticos impulsionaram a arte de controlar processos. Nos séculos 19 e 20, seguindo necessidades dos meios de comunicação, navegação de aviões, navios, foguetes e a pressão das guerras novos problemas apresentaram-se e assim novas estratégias de controle foram desenvolvidas. O controle digital surgiu e redirecionou as atenções. Hoje, certamente, a demanda de muitos produtos não seria atendida se processos manuais fossem utilizados. Mesmo que uma grande quantidade de pessoas pudesse produzir o mesmo volume de bens que um processo automático, a qualidade e as características do produto obtido não seriam mantidas durante o tempo. Assim, o objetivo de automatizar um processo é aumentar sua capacidade ou eficiência ou diminuir sua periculosidade. A automatização deve ser distinguida do controle do processo, cujo objetivo é assegurar uma quantidade (temperatura, pressão, composição, etc.) em um determinado valor (set point ou referência) ou intervalo pela manipulação de alguma variável. (MAZZUCCO, 2009, p.5).

Para sistemas de controle a aplicação em campo depende de elementos elétricos, eletrônicos, mecânicos ou pneumáticos que permitam que o processo e o sistema de controle possam interagir de forma compor uma estrutura

entrada/saída. Atualmente, muitos destes dispositivos são baseados em equipamentos eletrônicos, sendo divididos em duas categorias, os digitais e os analógicos. Na indústria química a maioria dos elementos de medição e os elementos finais de controle são instrumentos analógicos. Destacam-se as seguintes classes de equipamentos em um sistema de controle: Instrumentos de medição (sensores), elementos finais de controle, transdutores, controladores, indicadores e registradores. (MAZZUCCO, 2009, p.8).

Existem sistemas de controle extremamente complexo como os controles de processos onde há transformações químicas e físicas, o controlador realiza o controle de múltiplas variáveis como, temperatura, concentração, pressão, densidade e entre outras. O controlador toma diversas decisões para manter o processo o mais constante possível.

Temos também os sistemas de controle simples, um exemplo de sistema de controle é a boia na caixa d'água que nós temos em nossas casas, a sua função é garantir que a caixa não extravase controlando o nível máximo de água.

2.4.1 Instrumentos de medição

Os sensores são os elementos responsáveis por permitir a quantificação da variável que se deseja medir. (MAZZUCCO, 2009).

Para a automatização de sistemas de tratamento de água existe uma variedade de sensores, porém, os mais conhecidos são os sensores de pH, turbidez, cloro livre, fluoretos e vazão volumétrica.

2.4.2 Elementos finais de controle

Os elementos finais de controle agrupam todas as variáveis que podem ser manipuladas. (id ibid.).

Para podermos controlar a concentração de cloro temos o ajuste direto, para diminuir a concentração de cloro é interrompida a dosagem da solução contendo cloro.

2.4.3 Transdutores

Alguns sensores podem emitir sinais em formato diferente ao que o controlador suporta, por exemplo, o sensor de pressão imite sinal em pressão de 3-15 psig, e um determinado controlador recebe e emite somente sinais em corrente de 4-20mA, existindo uma incompatibilidade entre os sinais, neste caso é utilizado um transdutor, ele converte o sinal em pressão para corrente e retransmite para o controlador e vice versa.

2.4.4 Controladores

Os controladores são os equipamentos responsáveis por tomar as decisões com base na programação lógica implementada para controlar a variável desejada. Na indústria são mais conhecidos com CLP (Computador Lógico Programável), possuindo entradas e saídas de sinais, é por onde é possível a comunicação com sensores e atuadores.

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 PROJETO DE FILTRO RÁPIDO GRAVITACIONAL DE CAMADA DUPLA

3.1.1 Necessidade da empresa

A concessionária de água indica que os filtros deverão possuir capacidade de operar com vazão de água de 250 m³/h, pois segundo a concessionária o investimento para a implantação do filtro deverá ser único em um prazo de 10 anos.

3.1.2 Taxa de filtração

Segundo a norma NBR 12216/92, a taxa de filtração para filtro de camada dupla para a filtragem de águas de boa qualidade é de 360 m³/m². dia, fixando para o seguinte projeto a taxa de 300 m³/m². dia seguindo a sugestão do autor José M. de Azevedo Netto (1987).

3.1.3 Área de filtração

Para calcular a área necessária de filtração foi utilizada a seguinte equação:

$$A_F = \frac{V_A \cdot H_{OP}}{T_A}$$

Onde:

A_F = Área de filtração.

V_A = Vazão volumétrica de água por dia.

T_A = Taxa de aplicação para o filtro.

H_{OP} = Horas de operação

$$A_F = \frac{250 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 20 \text{ h}}{300 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{dia}}$$

$$A_F = 16,67 \text{ m}^2$$

3.1.4 Número de Filtros

Para calcular o número de filtros foi utilizada a equação empírica de Kawamura:

$$N_F = 0,0195 \cdot \sqrt{V_A}$$

Onde:

N_F = Número de filtros.

V_A = Vazão volumétrica de água por dia.

$$N_F = 0,0195 \cdot \sqrt{250 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 20 \text{ h}}$$

$$N_F = 1,36$$

Adotando então dois filtros para o sistema, cada um possuindo área de filtração igual a 8,33 m², totalizando 16,66 m².

3.1.5 Formas e dimensões dos filtros

Utilizando a relação de José M. de Azevedo Netto para obter a dimensão de cada filtro.

$$\frac{B}{L} = \frac{n + 1}{2n}$$

Onde:

B/L = Relação da largura pelo comprimento do filtro

n = Número de filtros

$$\frac{B}{L} = \frac{2 + 1}{2 \cdot 2}$$

$$\frac{B}{L} = 0,75$$

Para 2,5 metros de comprimento temos uma base de 3,33 metros, totalizando os 8,33 metros quadrados para cada filtro.

3.1.6 Espessura das camadas filtrantes e altura de água no filtro

3.1.6.1 Espessura das camadas

Quando não há ensaios em filtro-Piloto a NBR 12216/92 indica que utiliza-se as seguintes especificações para as camadas filtrantes:

Tabela 3 – Especificação Básica Para Camadas Filtrantes.

Material	Altura Mínima(cm)	Tamanho Efetivo (mm)	Coefficiente de Uniformidade
Areia	25	0,40 - 0,45	1,4 - 1,6
Antracito	45	0,8 - 1,00	≥1,4

Fonte: ABNT NBR 12216 (1992, p. 10).

Para este projeto foram atribuídas as seguintes alturas de camadas respeitando a NBR 12216/92.

Tabela 4 – Alturas Das Camadas Filtrantes Do Projeto.

Material	Altura (cm)	Tamanho Efetivo (mm)	Coefficiente de Uniformidade
Areia	50	0,40 - 0,45	1,4 - 1,6
Antracito	70	0,8 - 1,00	≥1,4

Fonte: do autor. 2018

3.1.6.2 Quantidade de massa das camadas

3.1.6.2.1 Massa necessária de antracito

Com a fórmula abaixo foi calculada quantidade de carvão antracito em quilograma.

$$M_s = A_F \cdot \rho_s \cdot H_C \cdot (1 - \epsilon)$$

Onde:

M_s = Massa de sólido.

A_F = Área do filtro.

H_C = Altura da Camada.

ρ_s = Densidade do sólido

ϵ = Porosidade da antracito.

$$M_s = 8,33 \text{ m}^2 \cdot 1.650 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,70 \text{ m} \cdot (1 - 0,56)$$

$$M_s = 4.234 \text{ kg de carvão antracito}$$

3.1.6.2.2 *Massa necessária de Areia*

Com a fórmula a abaixo foi calculada a quantidade de Areia de sílica em quilograma.

$$M_s = A_F \cdot \rho_s \cdot H_C \cdot (1 - \epsilon)$$

Onde:

M_s = Massa de sólido.

A_F = Área do filtro.

H_C = Altura da Camada.

ρ_s = Densidade do sólido

ϵ = Porosidade da areia.

$$M_s = 8,33 \text{ m}^2 \cdot 2.650 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,50 \text{ m} \cdot (1 - 0,45)$$

$$M_s = 6.071 \text{ kg de areia}$$

3.1.6.3 Altura da coluna de água

Tabela 5 – Altura da Coluna de Água.

Taxa de Filtração (m ³ /m ² .d)	Altura de Água (m)
150	1,20
250	1,45
350	2,05

Fonte: José M, de Azevedo Netto. 1987.

Interpolando a tabela acima obteve-se a altura de 1,75 m para a taxa atribuída para ao projeto de 300 m³/m².dia.

3.1.7 Fundo dos filtros

3.1.7.1 Tipo de fundo

O fundo falso dos filtros escolhido foi o de chapa de fibra de vidro com crepina, este tipo de fundo falso não necessita de uma camada suporte. O fabricante recomenda a instalação de 34 crepina por m².

$$N_C = A_F . 34$$

Onde:

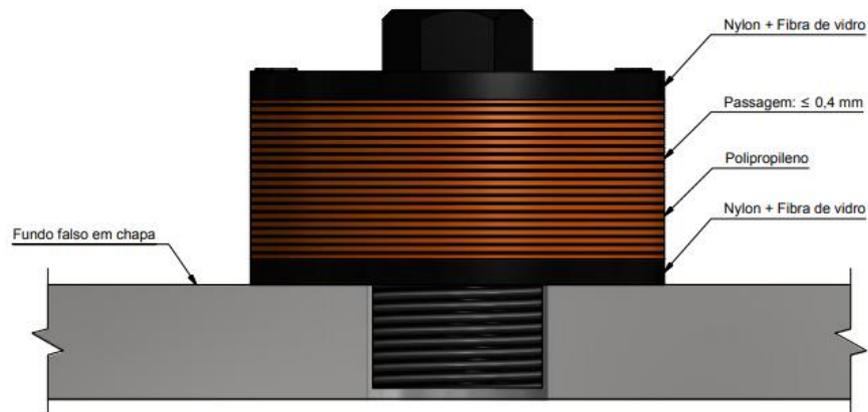
N_C = Número de crepina por filtro.

A_F = Área do filtro

$$N_C = 8,33 . 34$$

$$N_C \cong 284$$

Figura 3 – Crepina.



Fonte: Hidro Solo. 2018.

3.1.7.2 Diâmetro do tubo de coleta de água filtrada

Segundo Azevedo Netto o tubo que retira água filtrada do fundo do filtro serve de controle de vazão, conforme disposto na seguinte tabela:

Tabela 6 – Controladores de Vazões de água filtrada.

Diâmetro (mm)	Vazão (L/s)	Diâmetro (mm)	Vazão (L/s)
100	10,3	350	126,0
125	15,8	400	158,0
150	23,6	450	215,0
200	39,5	500	260,0
250	63,0	600	370,0
300	95,0	750	570,0

Fonte: Netto. 1987.

Cada filtro receberá a vazão máxima de 34,72 L/s, seguindo a tabela 6 será adotado o tubo de 200 mm.

3.1.8 Sistema de lavagem

3.1.8.1 Velocidade mínima de lavagem

A velocidade mínima para a lavagem deve ser a velocidade de fluidização, é a velocidade na qual o leito começa a sofrer expansão, esta expansão é responsável por remover as partículas retidas nos poros dos grãos. Descrita pela equação de Ergun.

3.1.8.1.1 Velocidade mínima de lavagem para antracito

$$\frac{150 \cdot \mu \cdot V_{Lmin}}{D_{Pm}^2} \cdot \frac{(1 - \epsilon)}{\epsilon^3} + \frac{1,75 \cdot \rho_a \cdot V_{Lmin}^2}{\epsilon^3 \cdot D_{Pm}} = (\rho_s - \rho_a) \cdot g$$

Onde:

μ = Viscosidade da água.

D_{Pm} = Diâmetro médio do antracito.

V_{Lmin} = Velocidade mínima de lavagem.

ϵ = Porosidade da antracito.

ρ_s = Densidade da antracito.

ρ_a = Densidade da água.

g = gravidade.

$$\begin{aligned} & \frac{150 \cdot 10^{-3} \text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s}) \cdot V_{Lmin}}{0,00090^2 \text{ m}} \cdot \frac{(1 - 0,56)}{0,56^3} + \frac{1,75 \cdot 1000 \text{kg}/\text{m}^3 \cdot V_{Lmin}^2}{0,56^3 \cdot 0,00090 \text{ m}} \\ & = \left(\frac{1650 \text{kg}}{\text{m}^3} - \frac{1000 \text{kg}}{\text{m}^3} \right) \cdot 9,81 \text{m}/\text{s}^2 \\ & V_{Lmin} = 0,0108 \text{ m}/\text{s} = 65 \text{ cm}/\text{min} \end{aligned}$$

3.1.8.1.2 Velocidade mínima de lavagem para areia

$$\frac{150 \cdot \mu \cdot V_{Lmin}}{D_{Pm}^2} \cdot \frac{(1 - \epsilon)}{\epsilon^3} + \frac{1,75 \cdot \rho_a \cdot V_{Lmin}^2}{\epsilon^3 \cdot D_{Pm}} = (\rho_s - \rho_a) \cdot g$$

Onde:

μ = Viscosidade da água.

D_{Pm} = Diâmetro médio da areia.

V_{Lmin} = Velocidade mínima de lavagem.

ϵ = Porosidade da areia.

ρ_s = Densidade da areia.

ρ_a = Densidade da água.

g = gravidade.

$$\frac{150 \cdot 10^{-3} kg/(m \cdot s) \cdot V_f \cdot (1 - 0,45)}{0,00045^2 m} \cdot \frac{1}{0,45^3} + \frac{1,75 \cdot 1000 kg/m^3 \cdot V_f^2}{0,45^3 \cdot 0,00045 m}$$

$$= \left(\frac{2650 kg}{m^3} - \frac{1000 kg}{m^3} \right) \cdot 9,81 m/s^2$$

$$V_{Lmin} = 0,0035 m/s = 21 cm/min$$

3.1.8.2 Velocidade máxima de lavagem

A velocidade máxima para a lavagem deve ser a velocidade inferior a velocidade de arraste de partículas. É a velocidade na qual as partículas do leito serão arrastadas pelo fluxo, descrita pela equação de Navier Stokes.

3.1.8.2.1 Velocidade máxima de lavagem para antracito

$$V_{Lmáx} = \frac{D_{Pm}^2 \cdot (\rho_s - \rho_a) \cdot g}{18 \cdot \mu}$$

Onde:

μ = Viscosidade da água.

D_{Pm} = Diâmetro médio do antracito.

$V_{Lmáx}$ = Velocidade máxima de lavagem.

ρ_s = Densidade da antracito.

ρ_a = Densidade da água.

g = gravidade.

$$V_{Lm\acute{a}x} = \frac{0,00090^2 m \cdot (1650 \text{ kg/m}^3 - 1000 \text{ kg/m}^3) \cdot 9,81 \text{ m/s}^2}{18 \cdot 10^{-3} \text{ kg/(m.s)}}$$

$$V_{Lm\acute{a}x} = 0,2869 \text{ m/s} = 1721 \text{ cm/s}$$

3.1.8.2.2 Velocidade máxima de lavagem para areia

$$V_{Lm\acute{a}x} = \frac{D_{Pm}^2 \cdot (\rho_s - \rho_a) \cdot g}{18 \cdot \mu}$$

Onde:

μ = Viscosidade da água.

D_{Pm} = Diâmetro médio da areia.

$V_{Lm\acute{a}x}$ = Velocidade máxima de lavagem.

ρ_s = Densidade da areia.

ρ_a = Densidade da água.

g = gravidade.

$$V_{fm\acute{a}x} = \frac{0,00045^2 m \cdot (2650 \text{ kg/m}^3 - 1000 \text{ kg/m}^3) \cdot 9,81 \text{ m/s}^2}{18 \cdot 10^{-3} \text{ kg/(m.s)}}$$

$$V_{fm\acute{a}x} = 0,182 \text{ m/s} = 1092 \text{ cm/s}$$

3.1.8.3 Velocidade de lavagem

A NBR 12216/92 estabelece a expansão do leito filtrante entre 20% a 30% e a velocidade de escoamento não deverá ser inferior a 60 cm/min. Segundo Azevedo devemos usar 80 cm/min (0,013 m/s) para obtermos uma lavagem satisfatória com 30% de expansão

3.1.8.3.1 Expansão para antracito

Para calcular a expansão do antracito é necessário calcular qual será a porosidade do antracito na velocidade de lavagem escolhida e posteriormente calcular sua expansão.

$$\frac{150 \cdot \mu \cdot V_L \cdot (1 - \epsilon)}{D_{Pm}^2 \cdot \epsilon^3} + \frac{1,75 \cdot \rho_a \cdot V_L^2}{\epsilon^3 \cdot D_{Pm}} = (\rho_s - \rho_a) \cdot g$$

Onde:

μ = Viscosidade da água.

D_{Pm} = Diâmetro médio do antracito.

V_L = Velocidade de lavagem.

ϵ = Porosidade da antracito.

ρ_s = Densidade da antracito.

ρ_a = Densidade da água.

g = gravidade.

$$\begin{aligned} & \frac{150 \cdot 10^{-3} \text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s}) \cdot 0,0133 \text{m/s} \cdot (1 - \epsilon)}{0,00090^2 \text{ m} \cdot \epsilon^3} + \frac{1,75 \cdot 1000 \text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \frac{0,0133^2 \text{m/s}}{\epsilon^3 \cdot 0,00090 \text{ m}} \\ & = \left(\frac{1650 \text{kg}}{\text{m}^3} - \frac{1000 \text{kg}}{\text{m}^3} \right) \cdot 9,81 \text{m/s}^2 \\ & \epsilon = 0,5948 \end{aligned}$$

$$L_1(1 - \epsilon_1) = L_2(1 - \epsilon_2)$$

Onde:

L_1 = Altura do leito antes da expansão.

L_2 = Altura do leito após expansão.

ϵ_1 = Porosidade antes da expansão.

ϵ_2 = Porosidade após expansão.

$$0,70 \text{ m} (1 - 0,56) = L_2(1 - 0,5948)$$

$$L_2 = 0,7601 \text{ m}$$

3.1.8.3.2 Expansão para areia

Para calcular a expansão da areia é necessário calcular qual será a porosidade da areia na velocidade escolhida lavagem e posteriormente calcular sua expansão.

$$\frac{150 \cdot \mu \cdot V_L}{D_{Pm}^2} \cdot \frac{(1 - \epsilon)}{\epsilon^3} + \frac{1,75 \cdot \rho_a \cdot V_L^2}{\epsilon^3 \cdot D_{Pm}} = (\rho_s - \rho_a) \cdot g$$

Onde:

μ = Viscosidade da água.

D_{Pm} = Diâmetro médio da areia.

V_L = Velocidade de lavagem.

ϵ = Porosidade da areia.

ρ_s = Densidade da areia.

ρ_a = Densidade da água.

g = gravidade.

$$\frac{150 \cdot 10^{-3} \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s}) \cdot 0,0133 \text{ m/s}}{0,00045^2 \text{ m}} \cdot \frac{(1 - \epsilon)}{\epsilon^3} + \frac{1,75 \cdot 1000 \text{ kg}}{\text{m}^3} \cdot \frac{0,0133^2 \text{ m/s}}{\epsilon^3 \cdot 0,00045 \text{ m}}$$

$$= \left(\frac{1650 \text{ kg}}{\text{m}^3} - \frac{1000 \text{ kg}}{\text{m}^3} \right) \cdot 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$\epsilon = 0,6397$$

$$L_1(1 - \epsilon_1) = L_2(1 - \epsilon_2)$$

Onde:

L_1 = Altura do leito antes da expansão.

L_2 = Altura do leito após expansão.

ϵ_1 = Porosidade antes da expansão.

ϵ_2 = Porosidade após expansão.

$$0,50 \text{ m} (1 - 0,45) = L_2(1 - 0,6397)$$

$$L_2 = 0,7632 \text{ m}$$

3.1.8.3.3 Expansão total do leito

$$H_{F\%} = \frac{H_{Fexp} - H_F}{H_F}$$

Onde:

$H_{F\%}$ = Percentual de expansão do leito.

H_{Fexp} = Altura total do leito após expansão.

H_F = Altura do leito total sem expansão.

$$H_{F\%} = \frac{1,5233 \text{ m} - 1,20 \text{ m}}{1,20 \text{ m}}$$

$$H_{F\%} = 26,94 \%$$

3.1.8.4 Vazão de água para lavagem

Para determinar a vazão de água necessária para obter a velocidade de escoamento de 80 cm/min, utiliza-se a seguinte equação.

$$Q_L = A_F \cdot v_L$$

Onde:

Q_L = Vazão de água.

A_F = Área do filtro.

v_a = Velocidade de lavagem.

$$Q_L = 8,33 \text{ m}^2 \cdot 0,80 \text{ m/s}$$

$$Q_L = 6,67 \text{ m}^3/\text{s}$$

3.1.8.5 Volume de água para lavagem

A NBR 12216/92 estabelece para filtro de fluxo descendente o tempo mínimo de 10 minutos para a lavagem, além disso a norma determina um reservatório com capacidade mínima de água para realizar lavagem em dois filtros.

$$V_L = T_L \cdot Q_L \cdot N_F$$

Onde:

V_L = Vazão de água.

T_L = Área do filtro.

Q_L = Velocidade de lavagem.

N_F = Número de filtros.

$$V_L = 10 \text{ min} \cdot 6,67 \text{ m}^3/\text{min} \cdot 2$$

$$V_L = 133,4 \text{ m}^3$$

3.1.8.6 Tubulação de alimentação de lavagem

Tabela 7 – Reguladores de vazão para água de lavagem.

Diâmetro (mm)	Vazão (L/s)	Diâmetro (mm)	Vazão (L/s)
150	50	400	391
200	88	450	491
250	151	500	606
300	221	600	882
350	296	750	1348

Fonte: Netto. 1987.

Respeitando a tabela do autor Azevedo Netto, determinamos o diâmetro da tubulação de lavagem de 250 mm para a vazão de 111,17 L/s.

3.1.8.7 Calha de coleta de água de lavagem

Para determinar as dimensões da calha de coleta de água de lavagem levamos em consideração a vazão calculada para lavagem de 111,17 L/s e utilizando a tabela a baixo.

Tabela 8 – Vazões máximas de calhas de coleta de água de lavagem em L/s.

Altura (m)	Largura (m)					
	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,50
0,15	15	19	23	26	30	38
0,20	23	29	35	40	46	58
0,25	33	41	49	57	65	82
0,30	43	53	64	75	85	107
0,35	54	67	81	95	108	135
0,40	66	82	98	115	132	165
0,45	79	98	118	137	157	197
0,50	92	115	138	160	184	230
0,55	106	132	159	185	210	265
0,60	121	151	182	212	242	303

Fonte: José M, de Azevedo Netto. 1987.

Adotou-se uma calha de 0,45 m de altura e 0,35 m de largura, totalizando 137 L/s, comportando uma vazão, aproximadamente, 23% maior que a necessária.

3.1.9 Altura do fundo dos filtros

Levando em consideração a tubulação de maior diâmetro que será o de entrada de água para a lavagem com 250 mm, adota-se a altura do fundo de 350 milímetros.

3.1.10 Altura da calha de coleta de água de lavagem

Para estabelecer a altura da calha de coleta deve-se levar em consideração a expansão do leito filtrante no momento da lavagem para que os grãos não sejam retirados do filtro pela calha.

Após expansão o leito passa a ter 0,3233 m a mais, ou seja, com um incremento de 0,15 m, a altura da calha em relação ao leito não expandido é de 0,48 m.

3.1.11 Altura total da caixa do filtro

Para estabelecer o tamanho total da caixa que abrigará o filtro devemos somar a altura do fundo falso, altura do leito filtrante, altura de coluna de água e uma altura adicional de 15 cm.

$$H_T = H_F + H_L + H_A$$

Onde:

H_L = Altura total do filtro.

H_L = Altura do fundo falso.

H_L = Altura do leito filtrante.

H_F = Altura da coluna de água.

$$H_T = 0,35 \text{ m} + 1,20 \text{ m} + 1,75 \text{ m} + 0,15 \text{ m}$$

$$H_T = 3,45 \text{ m}$$

3.1.12 Perda de carga do leito filtrante

3.1.12.1 Perda de carga para a camada de antracito

$$\frac{\Delta}{L} = \frac{150 \cdot \mu \cdot V_s (1 - \epsilon)}{D_{Pm}^2 \cdot \epsilon^3} + \frac{1,75 \cdot (1 - \epsilon) \cdot \rho_a \cdot V_s^2}{\epsilon^3 \cdot D_{Pm}}$$

Onde:

μ = Viscosidade da água.

D_{Pm} = Diâmetro médio do antracito.

V_s = Velocidade superficial

ϵ = Porosidade da antracito.

ρ_a = Densidade da água.

L = Altura da camada.

$$\frac{\Delta P}{0,70m} = \frac{150 \cdot 10^{-3} \text{ kg/(m.s)} \cdot 0,0042 \text{ m/s} (1 - 0,56)}{0,00090^2 m} \frac{1}{0,56^3} + \frac{1,75 \cdot (1 - 0,56) \cdot 1000 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,0042^2 \text{ m/s}}{0,56^3 \cdot 0,00090 m}$$

$$\Delta P = 14.24,24 \text{ Pascal} = 0,1453 \text{ metros de coluna de água}$$

3.1.12.2 Perda de carga para camada de areia

$$\frac{\Delta}{L} = \frac{150 \cdot \mu \cdot V_s (1 - \epsilon)}{D_{Pm}^2 \epsilon^3} + \frac{1,75 \cdot (1 - \epsilon) \cdot \rho_a \cdot V_s^2}{\epsilon^3 \cdot D_{Pm}}$$

Onde:

μ = Viscosidade da água.

D_{Pm} = Diâmetro médio da areia.

V_s = Velocidade superficial

ϵ = Porosidade da antracito.

ρ_a = Densidade da água.

L = Altura da camada.

$$\frac{\Delta P}{0,50m} = \frac{150 \cdot 10^{-3} \text{ kg/(m.s)} \cdot 0,0042 \text{ m/s} (1 - 0,45)}{0,00045^2 m} \frac{1}{0,45^3} + \frac{1,75 \cdot (1 - 0,45) \cdot 1000 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,0042^2 \text{ m/s}}{0,45^3 \cdot 0,00045 m}$$

$$\Delta P = 19.191,67 \text{ Pascal} = 0,979 \text{ metros de coluna de água}$$

3.1.12.3 Perda de carga para as crespinas

Segundo o fabricante a perda de carga pelo fundo pode chegar a 0,25 m de coluna de água.

3.1.12.4 Perda total do leito filtrante

Somando a perda de carga das camadas de antracito e areia tem-se a perda de carga total do leito, acrescentando a perda de carga das crespinas obtém-se a perda de carga total do filtro, aproximadamente 1,375 m de coluna de água.

3.2 INSTALAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS

3.2.1 Sensores

3.2.1.1 Sensor de vazão

Esse sensor será responsável por quantificar o volume de água escoando na tubulação em um determinado tempo e informar para o controlador.

Figura 4 – Sensor de vazão ultrassônico.



Fonte: Amazon, 2018.

3.2.1.2 Sensor de concentração de Cloro.

Esse sensor será responsável por quantificar a concentração de cloro livre presente na água tratada e informar para o controlador.

Figura 5 – Sensor de concentração de cloro.



Fonte: Process Instruments, 2018.

3.2.1.3 Sensor de concentração de Flúor.

Esse sensor será responsável por quantificar a concentração de flúor presente na água tratada e informar ao controlador.

Figura 6 – Sensor de concentração de flúor.



Fonte: Process Instruments, 2018.

3.2.1.4 Sensor de turbidez

Esse sensor será responsável por quantificar a turbidez da água filtrada e informar para o controlador.

Figura 7 – Sensor de turbidez.



Fonte: Process Instruments, 2018.

3.2.1.5 Sensor de pH

Esse sensor será responsável por quantificar o pH natural da água e o pH da água tratada e informar para o controlador.

Figura 8 – Sensor de pH.



Fonte: Process Instruments, 2018.

3.2.2 Atuadores

3.2.2.1 Bombas dosadoras

As bombas dosadoras receberão sinais do controlador para regular a quantidade de produto que será dosado na água tratada.

Figura 9 – Bomba dosadoras.



Fonte: Emec Pumps, 2018.

3.2.3 Controlador

O controlador escolhido possui capacidade de controlar 4 tipos de variáveis, sendo elas a concentração de cloro, concentração de flúor, turbidez e pH. Além disso o controlador transmite e pode ser configurado *online* em tempo real.

Figura 10 – Controlador



Fonte: Process Instruments, 2018.

3.3 AUTOMATIZAÇÃO DO SISTEMA

3.3.1 Controle de concentração de cloro

Para o cloro, a concentração ideal de saída da estação de tratamento é de aproximadamente 1,50 mg/L, porém, a concentração pode variar entre 0,20 a 2,10 mg/L estabelecidos por lei.

Será especificado para o controlador a concentração de 1,50 mg/L. Quando o sensor de cloro quantificar e informar para o controlador que a concentração está maior que o estabelecido, o controlador mandará um sinal para a bomba dosadora e ela se encarregará de diminuir a dosagem da solução de hipoclorito de sódio, se a concentração estiver abaixo do estabelecido a dosadora se encarregará de aumentar a dosagem.

3.3.2 Controle de concentração de Flúor

Para o flúor, a concentração ideal de saída da estação de tratamento é de aproximadamente 0,80 mg/L, porém, a concentração pode variar entre 0,70 a 1,20 mg/L estabelecidos por lei.

Será especificado para o controlador a concentração de 0,80 mg/L. Quando o sensor de cloro quantificar e informar para o controlador que a concentração está maior que o estabelecido, o controlador mandará um sinal para a bomba dosadora e ela se encarregará de diminuir a dosagem da solução de ácido fluossilícico, se a concentração estiver abaixo do estabelecido a dosadora se encarregará de aumentar a dosagem.

3.3.3 Controle de pH

Para o pH, o ideal de saída da estação de tratamento é de aproximadamente 7,25, porém, pode variar entre 6,5 a 8,5 estabelecidos por lei.

Será especificado para o controlador o pH de 7,25. Quando o sensor de pH informar que o valor é maior que o estabelecido o controlador mandará um sinal para a bomba dosadora e ela se encarregará de diminuir a dosagem da solução de hidróxido de cálcio, se o valor estiver abaixo do estabelecido a dosadora se encarregará de aumentar a dosagem.

3.3.4 Controle de turbidez

Para a turbidez, o ideal de saída da estação de tratamento é de até 0,50 NTU, quanto mais baixo melhor, porém, pode variar entre 0 e 0,50 NTU estabelecidos por lei.

Será especificado para o controlador a turbidez de 0,50. Quando o valor for maior que o estabelecido o controlador emitirá alarme ao operador da estação para que os filtros sejam lavados.

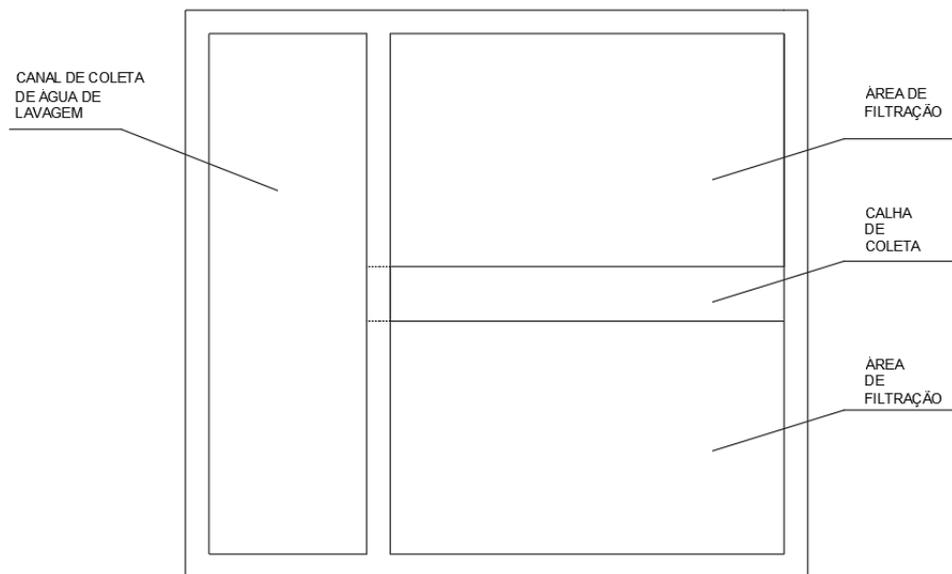
4 RESULTADOS

4.1 FILTRO RÁPIDO DE DUPLA CAMADA POR GRAVIDADE

4.1.1 Desenho do filtro

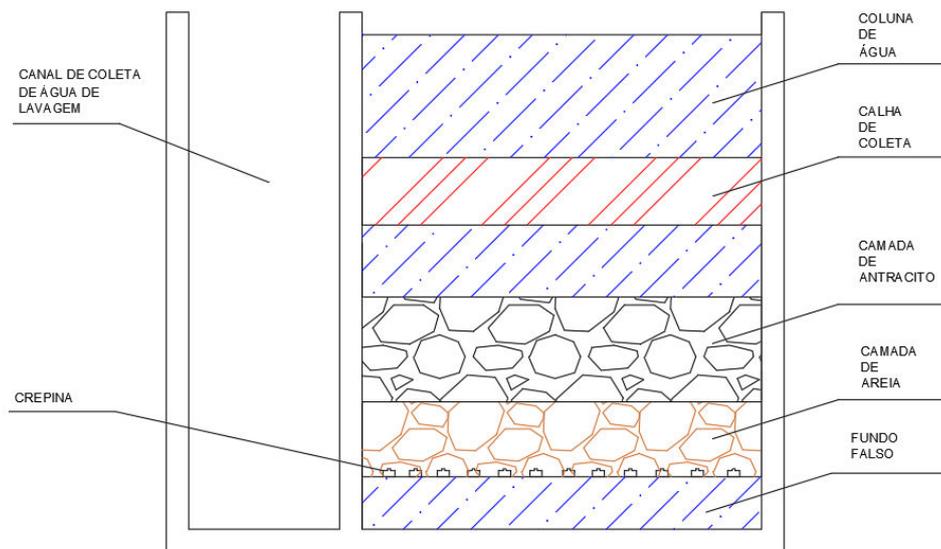
A seguir mostraremos os desenhos das vistas superior e lateral do filtro, com suas respectivas legendas.

Figura 11 – Vista de superior do filtro.



Fonte: do autor. 2018

Figura 12 – Vista lateral do filtro.



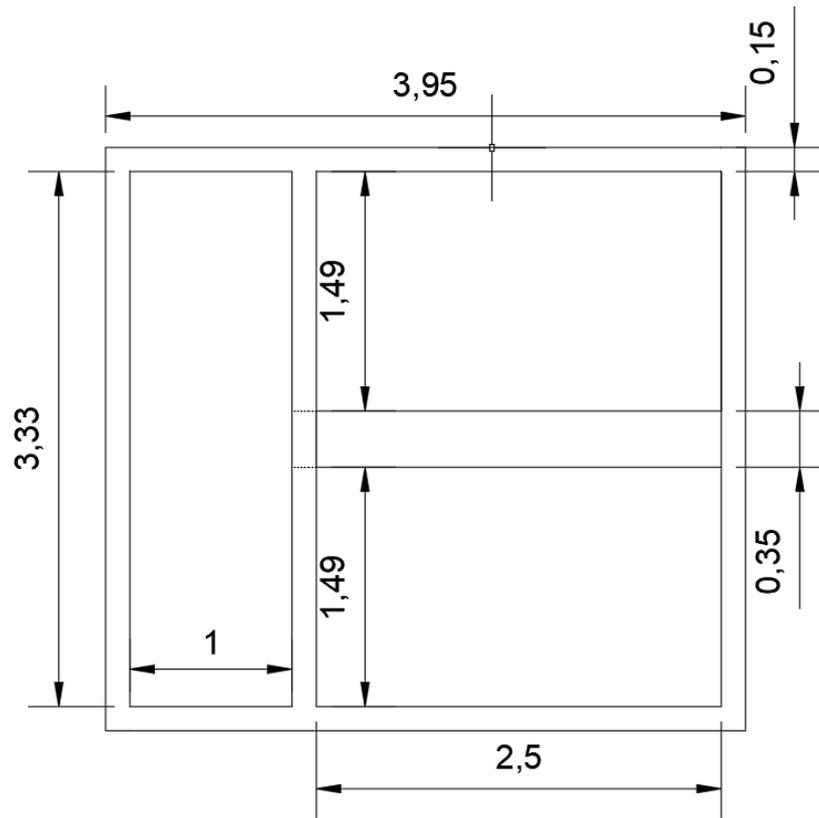
Fonte: do autor. 2018

4.1.2 Medidas e características

4.1.2.1 Vista superior do filtro

A figura 12 mostra o desenho superior do filtro com suas respectivas dimensões e medidas seguindo a legenda da figura 10.

Figura 13 – Vista superior do filtro.

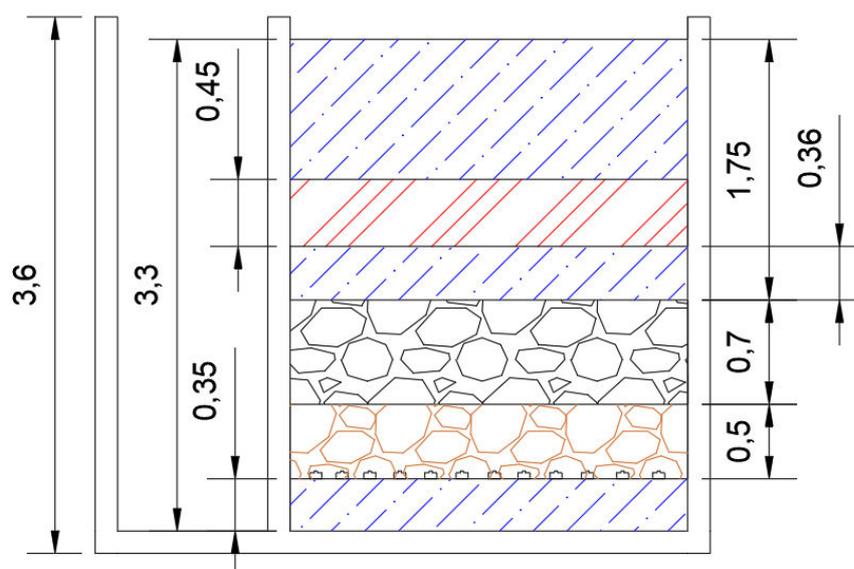


Fonte: do autor. 2018

4.1.2.2 Vista lateral do filtro

A figura 13 mostra o desenho lateral do filtro com suas respectivas dimensões e medidas seguindo a legenda da figura 11.

Figura 14 – Vista lateral do filtro.



Fonte: do autor. 2018

4.1.3 Custo de implantação

A tabela 9 mostra o custo total do dimensionamento e implantação do filtro de dupla camada com operação gravitacional, considerando que a mão de obra será disponibilizada por funcionários da própria concessionária.

Tabela 9 – Custo de implantação dos filtros.

Item	Quantidade	Valor Unitário	Valor Total
Carvão antracito (kg)	8468	2,00	16.936,00
Areia (kg)	12142	1,40	16.998,80
Fundo falso de crepina (m ²)	16,67	2000,00	33.340,00
Caixa de abrigo em concreto	2	5.688,80	11.377,60
Acessórios	8	1.000,00	8.000,00
TOTAL	-	-	86.652,40

Fonte: do autor. 2018

4.2 AUTOMATIZAÇÃO DO SISTEMA

4.2.1 Custo de implantação

A tabela 10 mostra o custo total para a proposta de automatização do sistema de tratamento químico.

Tabela 10 – Custo de implantação da automatização.

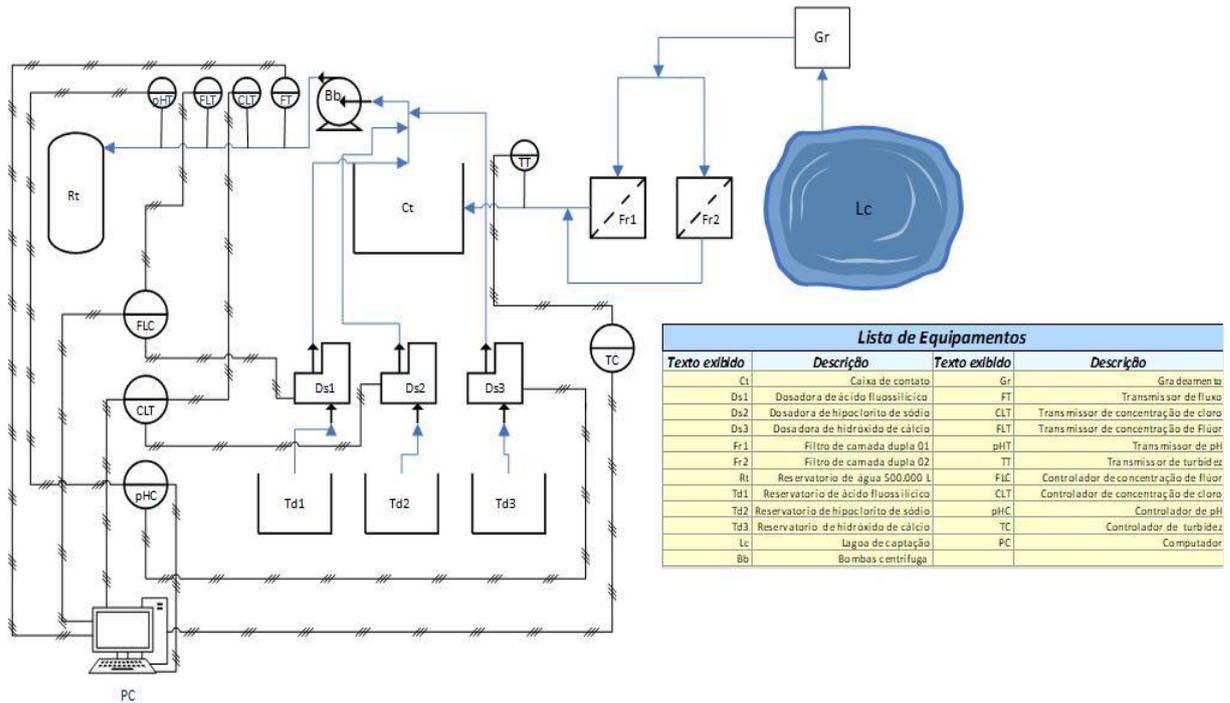
Item	Quantidade	Valor Unitário	Valor Total
Bomba Dosadora	4	2.999,90	11.999,60
Sensor de Cloro	1	3.750,00	3.750,00
Sensor de Flúor	1	4.250,00	4.250,00
Sensor de Turbidez	1	2.600,00	2.600,00
Sensor de pH	1	2.600,00	2.600,00
Sensor de Vazão	1	3.450,00	3.450,00
Controlador	1	7.890,00	7.890,00
Mão de Obra	1	6.800,00	6.800,00
TOTAL	-	-	43.339,60

Fonte: do autor. 2018

4.2.2 Fluxograma de controle do sistema

A figura 14 mostra o fluxograma de controle do sistema de tratamento.

Figura 154 – Fluxograma de controle do sistema de tratamento.



Fonte: do autor, 2018

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O desenvolvimento do presente estudo permite que aproximadamente 10.000 pessoas poderão ser beneficiadas com a melhoria da qualidade da água a ser distribuída após a implantação de duas unidades filtrante dimensionadas e a automatização do sistema de tratamento químico proposto, além da considerável redução de custo com produtos químicos dosados excessivamente e outros custos com operações de descarga de rede proveniente do amarelamento da água dentro da tubulação.

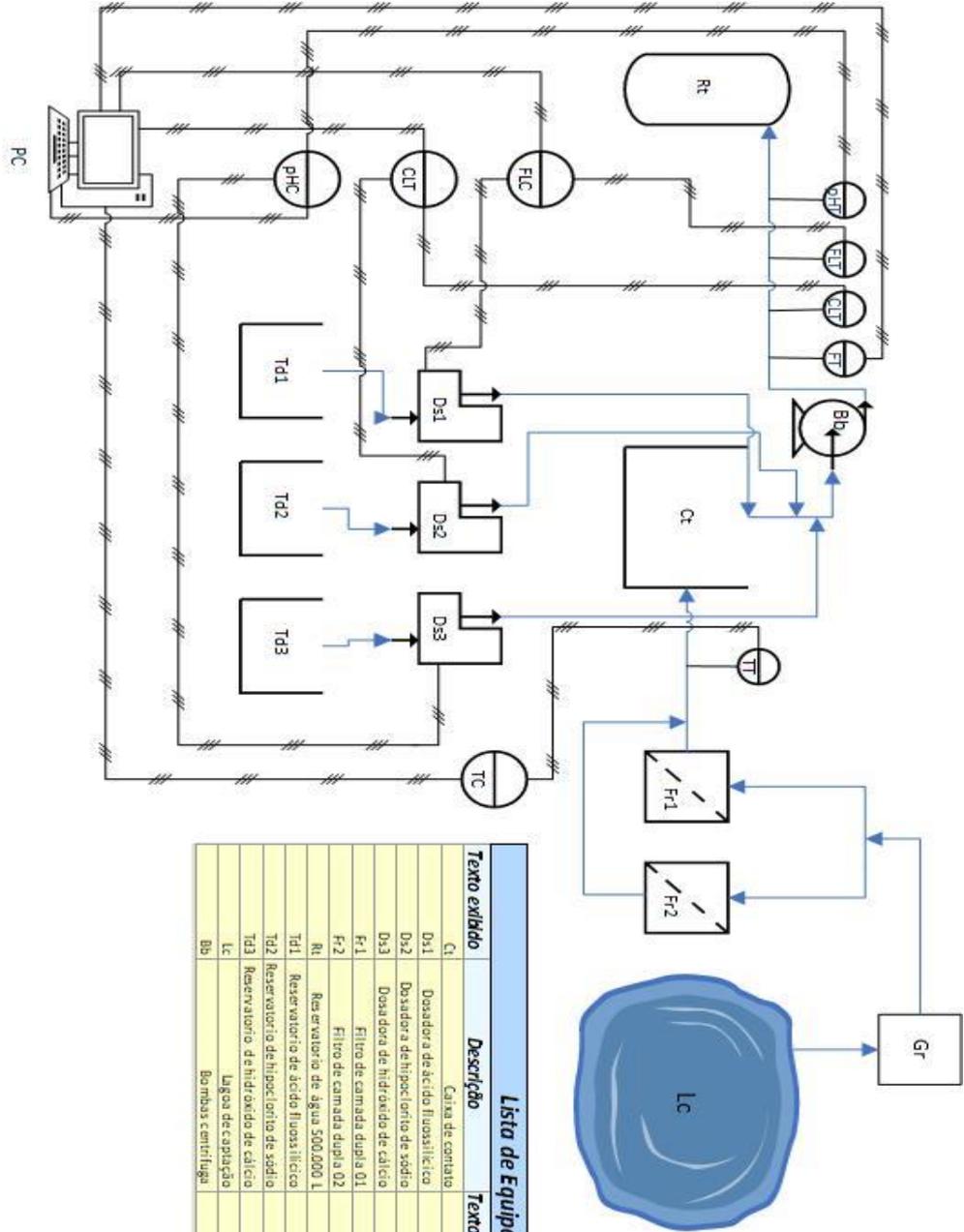
Recomenda-se a realização de estudos em uma escala piloto do seguinte projeto para a determinação da eficiência de remoção dos parâmetros turbidez, cor e teor de ferro, presentes na da água bruta.

REFERÊNCIAS

- ABNT - Projeto de Estação de Tratamento de Água para Abastecimento Público, NBR 12216, Rio de Janeiro: ABNT, 1989.
- AZEVEDO NETTO, J. M. Técnica de Abastecimento e Tratamento de ÁGUA 3 ed, vol II, 1987.
- DI BERNARDO L. - Métodos e Técnicas de Tratamento de Água, vol II, ABES, Brasilerência, 1993.
- GHSI, Diego Brunelli. Trabalho de conclusão de curso, Proposta de um modelo de projeto de filtro rápido bifluxo para tratamento de água de abastecimento. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/176156/TCC%202016-2%20Diego%20Ghisi.pdf?sequence=1>> Acesso em: 17 de outubro de 2018.
- Dimensionar Sistema de Filtração Para Uma ETA. Disponível em: <https://docs.ufpr.br/~rtkishi.dhs/TH028/TH028_10_7_Tratamento_Filtracao_exemplo.pdf./> Acesso em: 10 de outubro de 2018.
- HIDRO SOLO, Fabricante de fundo falso de Crepina. Disponível em: <<https://hidrosolo.com.br>> Acesso em: 01 de novembro de 2018.
- LIBÂNIO, M. Fundamentos de Qualidade e Tratamento de Água. 2 ed. Campinas: Editora ÁTOMO, 2008.
- MAZZUCO, M. M. Apostila Introdução ao Controle de Processos Químicos - Aspectos Teóricos e Exemplos com GNU Octave. 2009.
- PROCESS INSTRUMENTS, Fabricante de equipamentos de automatização. Disponível em: <<http://www.processinstruments.com.br/>> Acesso em: 01 de novembro de 2018.
- VALENCIA, J. A. Teoria, diseño y control de los procesos de clarificación del agua. Lima: CEPIS, 1973.
- WEN-CHING YANG. Handbook of Fluidization And Fluid-Particle Systems, 2003.

ANEXOS

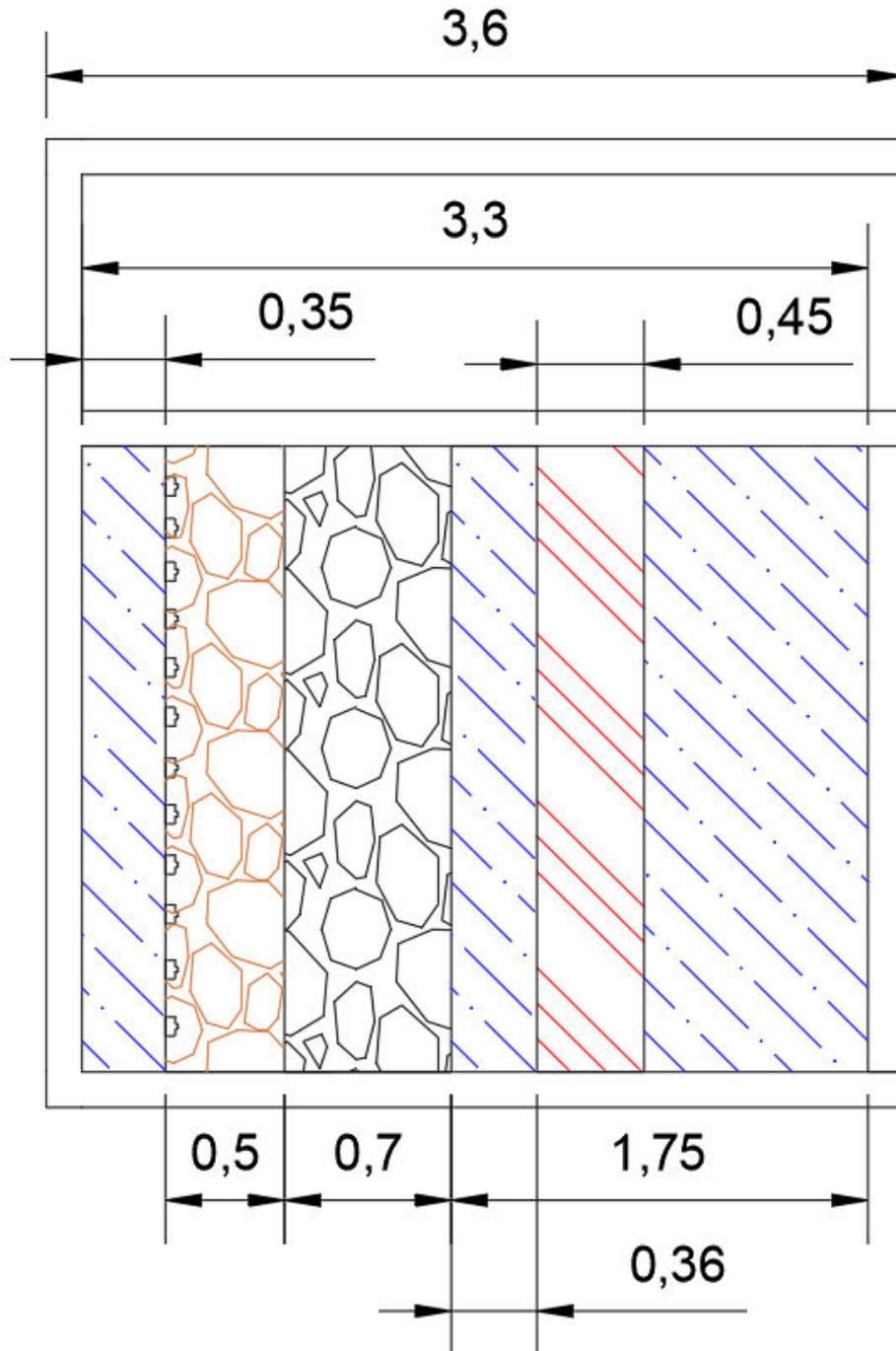
ANEXO A – Fluxograma de controle



Lista de Equipamentos

Texto exibido	Descrição	Texto exibido	Descrição
Ct	Caixa de concreto	Gr	Gr de drenagem
D=1	Dosadora de ácido fluossilícico	FL	Transmissor de fluxo
D=2	Dosadora de hipoclorito de sódio	CLT	Transmissor de concentração de cloro
D=3	Dosadora de hidróxido de cálcio	RLT	Transmissor de concentração de flúor
Fr-1	Filtro de camada dupla 01	pHT	Transmissor de pH
Fr-2	Filtro de camada dupla 02	TT	Transmissor de turbidez
Rt	Reservatório de água 500.000 L	FLC	Controlador de concentração de flúor
Td1	Reservatório de ácido fluossilícico	CLT	Controlador de concentração de cloro
Td2	Reservatório de hipoclorito de sódio	pHC	Controlador de pH
Td3	Reservatório de hidróxido de cálcio	TC	Controlador de turbidez
Lc	Lagoa de captação	PC	Computador
Bb	Bombas e centrífuga		

ANEXO B- Vista lateral com medidas



ANEXO C- Vista superior com medidas

