UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

CENTRO TECNOLÓGICO

COLEGIADO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

BÁRBARA ANDRESSA SOARES MEDEIROS
RAYELLE GUSMÃO TESSAROLLO

Avaliação Hidrodinâmica da Unidade de Floculação Mecanizada da Instalação Piloto de Tratamento de Águas de Abastecimento do Tipo Convencional

VITÓRIA

2015

BÁRBARA ANDRESSA SOARES MEDEIROS
RAYELLE GUSMÃO TESSAROLLO

Avaliação Hidrodinâmica da Unidade de Floculação Mecanizada da Instalação Piloto de Tratamento de Águas de Abastecimento do Tipo Convencional

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientadora: Prof.ª Dr.ª Edumar Ramos Cabral Coelho

VITÓRIA,

2015

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

AVALIAÇÃO HIDRODINÂMICA DA UNIDADE DE FLOCULAÇÃO MECANIZADA DA INSTALAÇÃO PILOTO DE TRATAMENTO DE ÁGUAS DE ABASTECIMENTO DO TIPO CONVENCIONAL

BÁRBARA ANDRESSA SOARES MEDEIROS
RAYELLE GUSMÃO TESSAROLLO

Prof.ª Edumar Ramos Cabral Coelho
Orientador(a)

Prof. Daniel Rigo
Examinador(a) Interno(a)

Prof. Jair Casagrande
Examinador(a) Externo(a)

Vitória, 07 de julho de 2015

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a DEUS, por ter nos dado forças para nunca desistir durante toda esta longa caminhada e paciência para podermos atingir nossos objetivos.

Aos nossos pais, pelo amor, incentivo e apoio incondicional e imensurável. E aos nossos irmãos, pela ajuda nos momentos de dificuldade.

À professora Edumar Ramos Cabral Coelho pela oportunidade concedida e pela orientação.

À CESAN e seus colaboradores pelo apoio institucional ao projeto, especialmente ao Sr. Aloísio Ceresino, Técnico Produção de Água, pela disponibilidade em ajudar durante todo o projeto desenvolvido na Instalação Piloto e pela dedicação e atenção durante a pesquisa. E ao Engenheiro Químico, André de Oliveira Lima, que foi designado como coordenador interno do projeto.

Ao professor Dr. Elói Alves da Silva Filho, do Departamento de química da UFES pela viabilização desse projeto.

Ao Prof. Daniel Rigo e ao Doutorando Maurício Sartori por todas as dúvidas esclarecidas e experiências compartilhadas.

Ao LABSAN e seus colaboradores pelo apoio no desenvolvimento da pesquisa.

Aos amigos que nos ouviram, apoiaram, compartilharam suas vitórias e angustias, nos deram forças para prosseguir.

E por fim a todos que direta ou indiretamente contribuíram para nossa formação, o nosso muitíssimo obrigada.

RESUMO

Tendo em vista a importância da etapa de floculação no processo de tratamento de água para consumo humano e, considerando que nas estações de tratamento de água convencionais a ineficácia da floculação pode tornar o processo de potabilidade da água antieconômico, o presente trabalho realizou a avaliação hidrodinâmica de uma unidade de floculação mecanizada com câmaras em série e escoamento contínuo em escala piloto. A pesquisa foi desenvolvida na Instalação Piloto (IP) instalada junto a ETA da Companhia Espírito Santense de Saneamento (CESAN) na Serra – ES. A avaliação hidrodinâmica foi realizada através da técnica de estímulo resposta utilizando o NaCl como traçador, de forma a se obter a curva de passagem na seção de saída. Foram feitos três ensaios e as leituras aferidas no condutivímetro (condutividade *versus* tempo) foram transformadas em curvas de concentração *versus* tempo a partir da curva de calibração. Com base neste experimento foi possível também avaliar os diversos indicadores que permitem identificar os níveis de mistura e curto-circuito. A partir da curva de passagem determinou-se o tempo de residência teórico médio de 39,78 minutos. Para os indicadores de mistura, M_o e σ_θ^2, foram obtidos os seguintes valores médios, 0,34 e 8,03, respectivamente. E o indicador de curto-circuito t_{10} apresentou um valor médio de 0,22. Assim, a análise da curva de passagem adimensionalizada mostra que o regime de escoamento da unidade de floculação mecanizada em questão está entre os regimes ideais de mistura completa e pistão aproximando-se do regime de mistura completa, regime este esperado para floculadores mecanizados com mais uma câmara de mistura completa em série.

Palavras Chaves: Tratamento de água, floculadores mecanizados, comportamento hidrodinâmico, indicadores de eficiência hidráulica, mistura completa.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação esquemática do tratamento convencional da água.....16
Figura 2 - Floculador hidráulico de fluxo horizontal.. 19
Figura 3 - Floculador hidráulico de fluxo vertical.. 19
Figura 4 - Floculador mecânico de eixo vertical tipo com paletas. 20
Figura 5 - Floculador mecânico de eixo horizontal tipo com paletas 20
Figura 6 - Agitador do tipo axial e esquema de uma câmara com o equipamento…21
Figura 7 - Modelos de escoamento não-ideal que podem existir em equipamentos de processo.....28
Figura 8 - Curva de distribuição do tempo de residência curva DRT. 31
Figura 9 - Informações significativas obtidas com ensaios com traçadores 32
Figura 10- Transformação da Curva $Cpulso$ na Curva $E\theta$.. 33
Figura 11- Tanques de mistura completa em série.. 37
Figura 12- Curvas de DTR para modelos de tanques em série.....37
Figura 13 - Foto da Instalação Piloto - 1: Floculadores, 2: Decantador, 3: Filtros Rápidos, 4: Coluna de CAG e 5: Tanque de Contato.....40
Figura 14 - Vista geral da IP de Carapina - UFES.....44
Figura 15 - Vista superior da Unidade de Floculação.....45
Figura 16 - Vista lateral e superior de uma câmara de floculação.....45
Figura 17 - Mistura água bruta e NaCl no “Jar-test”.. 47
Figura 18 - Curva de calibração, condutividade *versus* concentração. 49
Figura 19 - Curvas de Condutividade em função do tempo, referente aos ensaios 1, 2 e 3. 50
Figura 20 - Curvas de passagem adimensionalizada.....51
Figura 21 - Curvas de passagem acumuladas. 52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Características das águas Tipo I e Tipo II.....25
Tabela 2 - Valores de indicadores de EH para escoamentos ideais.....36
Tabela 3 - Características da unidade de floculação. 41
Tabela 4 - Características da unidade de decantação.....42
Tabela 5 - Parâmetros de funcionamento dos filtros rápidos.....42
Tabela 6 - Características dos leitos filtrantes dos filtros rápidos. 43
Tabela 7 - Parâmetros adotados nos testes realizados.....46
Tabela 8 - Dados de entrada e saída dos testes feitos com o traçador no "Jar-Test", para determinação da Curva de calibração do traçador.....49
Tabela 9 - Resultados: tempo de residência para os ensaios 1, 2 e 3.....53
Tabela 10 - Valores encontrados para os indicadores de mistura. 53
Tabela 11 - Valores encontrados para os indicadores de curto-circuito. 55
Tabela 12 - Tempo de residência médio adimensional para os ensaios 1, 2 e 3. 56

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 10
2 OBJETIVOS 12
2.1 OBJETIVO GERAL 12
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 12
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 13
3.1 TRATAMENTO DE ÁGUA PARA CONSUMO HUMANO 13
3.1.1 Evolução da Norma Brasileira de Qualidade da Água para Consumo 14
3.1.2 Tratamento de água do tipo convencional 14
3.2 FLOCULAÇÃO 16
3.2.1 Tipos de unidades de floculação 17
3.2.1.1 Unidades de floculação hidráulica 18
3.2.1.2 Unidades de floculação mecanizada 19
3.2.2 Fatores intervenientes na floculação 22
3.2.2.1 Tempo de residência ou Tempo de floculação (Tf) 22
3.2.2.2 Gradiente de velocidade (Gf) 24
3.3 COMPORTAMENTO HIDRODINÂMICO 26
3.3.1 Modelos de escoamento 26
3.3.2 Traçadores 28
3.3.3 Método do Estímulo e Resposta 29
3.3.4 Curva E ou Distribuição dos Tempos de Residência (DTR) 30
3.3.4.1 Determinação da Curva E com aplicação tipo Pulso 31
3.3.5 Indicadores de Eficiência Hidráulica 34
3.3.6 Modelo para escoamento não ideal 36
3.3.6.1 Modelo de tanques de mistura completa em série 36
3.3.7 Comportamento Hidrodinâmico em Floculadores 38
4 MATERIAIS E MÉTODOS 39
4.1 LOCAL DE TRABALHO 39
4.1.1 Instalação Piloto 39
4.1.1.1 Captação e adutora de água bruta 40
4.1.1.2 Caixa de entrada e mistura rápida 41
4.1.1.3 Floculação 41

4.1.1.4 Decantação 41
4.1.1.5 Filtração rápida 42
4.1.1.6 Tanque de contato 43
4.2 DESCRIÇÃO DA UNIDADE DE FLOCULAÇÃO 44
4.3 EQUIPAMENTO UTILIZADO NA MEDIDA DO TRAÇADOR 46
4.4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL 46
4.4.1 Gradiente de velocidade adotado e uso dos agitadores 46
4.4.2 Definição do Traçador 46
4.4.3 Preparo e injeção da solução de traçador 47
4.4.4 Ensaios Hidrodinâmicos 48
4.5 AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO HIDRODINÂMICO 48
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES 49
5.1 DEFINIÇÃO DA MASSA DO TRAÇADOR 49
5.2 AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO HIDRODINÂMICO 50
5.2.1 Análise da Curva de Passagem 50
5.2.2 Comparação do tempo de residência teórico com o real 53
5.3 DETERMINAÇÃO DOS INDICADORES DE EFICIÊNCIA HIDRÁULICA 53
5.3.1 Indicadores de Mistura 53
5.3.2 Indicadores de Curto-Circuito 55
5.3.3 Indicador de Zona Morta 56
6 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES 58
7 REFERÊNCIAS 60

1 INTRODUÇÃO

A água é indispensável à manutenção da vida terrestre e encontra-se presente na constituição de todos os seres vivos, inclusive no homem, que carece de água de qualidade adequada e em quantidade suficiente para atender suas necessidades, para proteção de sua saúde e para propiciar o desenvolvimento econômico. Com o aumento das aglomerações humanas e com elevação do consumo da água, grandes obras destinadas à captação, transporte e armazenamento deste líquido passaram a ser executadas, assim como o desenvolvimento de técnicas de tratamento. (BRASIL, 2006)

Entretanto, a maioria da água disponível no meio ambiente não está em condições adequadas para consumo humano imediato, logo, a água deverá passar por tratamentos até que não ofereça risco à saúde e seja classificada como potável. O tratamento da água adequa a água de diferentes mananciais aos padrões de qualidade definidos pela legislação vigente, envolvendo o emprego de diferentes operações e processos unitários (PROSAB, 2009).

Na maioria dos tratamentos da água utilizados hoje, no Brasil, emprega-se o processo identificado como convencional ou tradicional (IBGE, 2008). O tratamento de água convencional consiste no uso das operações de coagulação, floculação, sedimentação e filtração para a clarificação da água, seguida de correção de pH, desinfecção e fluoretação.

No entanto, existem fatores que podem interferir no desempenho das unidades de tratamento de água, como os procedimentos inadequados de operação e de projeto. Dentre os procedimentos inadequados de projeto estão à hipótese falsa sobre as características do escoamento no interior das unidades e a omissão dos efeitos da configuração das unidades na eficiência do processo de tratamento (TEIXEIRA, 1993).

Diante disso, Di Bernardo e Dantas (2005) recomendam a realização de ensaios de traçador com uso da técnica de estímulo e resposta, que consiste na adição de traçador na entrada da unidade, medindo-se sua concentração na saída, para verificação do funcionamento hidráulico das unidades existentes e avaliação do efeito de curtos-circuitos e zonas mortas.

Nas estações de tratamento de água convencionais, a ineficácia da floculação aumentará a afluência de partículas às unidades filtrantes, favorecendo a perspectiva de deterioração da água filtrada e reduzindo o intervalo entre lavagens, podendo tornar o processo de potabilidade da água antieconômico (LIBÂNIO, 2005).

Dessa forma, o presente trabalho propõe uma avaliação hidrodinâmica na unidade de floculação mecanizada da Instalação Piloto de Tratamento de Águas de Abastecimento do Tipo Convencional de Carapina.

A Instalação Piloto (IP) está instalada junto a ETA da Companhia Espírito Santense de Saneamento (CESAN) na Serra – ES e utiliza a mesma água bruta afluente do sistema público, captada no Rio Santa Maria da Vitória. Desde sua construção a IP vem sendo objeto de diversos estudos relacionados à qualidade de água, eficiência de tratamento, entre outros, pesquisas essas que geraram contribuições inclusive para publicações do PROSAB (Programa de Pesquisa em Saneamento Básico).

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a hidrodinâmica da unidade de floculação mecanizada com câmaras em série e escoamento contínuo da Instalação Piloto de Tratamento de Águas de Abastecimento do Tipo Convencional de Carapina, Serra - ES.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Definir a massa do traçador necessária para aplicação da técnica de estímulo resposta na avaliação hidrodinâmica da unidade de floculação mecanizada;
- Comparar o tempo de residência teórico com o real na unidade de floculação mecanizada;
- Determinar os indicadores de eficiência hidráulica a partir da obtenção da curva de passagem;

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 TRATAMENTO DE ÁGUA PARA CONSUMO HUMANO

Do ponto de vista tecnológico, qualquer água disponível na natureza pode ser transformada em água potável. Entretanto, do ponto de vista econômico, a presença de certo tipos de poluentes podem inviabilizar o uso de um determinado corpo d'água como fonte de abastecimento devido ao elevado custo para remoção destes (VIANNA, 1997).

Define-se Tratamento de Água, um conjunto de procedimentos físicos e químicos que são aplicados na água para que esta fique em condições adequadas para o consumo, ou seja, para que a água se torne potável. O processo de tratamento retira da água microcontaminantes orgânicos, microrganismos patogênicos, sólidos suspensos e coloidais, matéria orgânica e outras substâncias prejudiciais à saúde (LIBÂNIO, 2005).

Para que a água seja considerada potável, não basta que seja isenta de substâncias ou microrganismos patogênicos, também é necessário que não traga consigo substâncias capazes de adicionar cor, turbidez ou gosto desagradável, ainda que essas substâncias sejam inofensivas ao organismo humano (VIANNA, 1997). Segundo a Portaria n° 2914/2011 (BRASIL, 2011), do Ministério da Saúde, água potável é a aquela que atenda ao padrão de potabilidade e que não ofereça riscos à saúde.

Quanto à decisão de tecnologia a ser empregada para o tratamento, Cheremisinoff (2002) afirma que existem vários tipos de tecnologias adequadas ao tratamento da água, mas as combinações ideais de equipamentos e processos unitários dependem de diversos fatores, como a quantidade e qualidade da água afluente, as propriedades dos poluentes e os resíduos gerados, e o custo do tratamento.

Ao longo dos anos as exigências de qualidade da água evoluíram e prosseguem, em processo contínuo, acompanhando os avanços do conhecimento técnico e científico.

3.1.1 Evolução da Norma Brasileira de Qualidade da Água para Consumo

No Brasil a regulamentação quanto ao tratamento da água se inicia em 1977, por meio do Decreto Federal n°79.367, que estabeleceu como competência do Ministério da Saúde regulamentar matérias referentes à qualidade da água para consumo humano no país e, nesse mesmo ano, foi editada a primeira legislação sobre potabilidade da água válida em todo o território nacional - a Portaria n° 56/BSB.

Ao longo dos anos a legislação foi sendo atualizada e aprimorada, sempre norteada pelas diretrizes da Organização Mundial de Saúde, OMS. Inclusive o Prosab (2009) destaca que as diretrizes da OMS tem sido a principal referência e tem exercido grande influencia na periódica atualização da legislação brasileira.

As revisões periódicas na norma brasileira de qualidade da água para consumo humano têm como propósito a atualização e incorporação de novos conhecimentos, especialmente àqueles relacionados a avanços científicos no tratamento, controle e vigilância da qualidade da água e na avaliação de risco à saúde (RIBEIRO, 2012).

Atualmente a legislação vigente é a Portaria n° 2914/2011 (BRASIL, 2011) do Ministério da Saúde, na qual se define os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade.

3.1.2 Tratamento de água do tipo convencional

No tratamento da água convencional ou tratamento de ciclo completo, a água bruta passa por diversos processos, sendo os principais coagulação, floculação, decantação ou flotação, filtração, desinfecção, fluoretação, ajuste de pH e outros processos se necessário.

A água bruta recebe primeiro o produto químico (coagulante), que tem como objetivo a desestabilização das partículas coloidais e suspensas existentes na massa líquida. As partículas coloidais, substâncias húmicas e microrganismos, apresentam-se com carga negativa na água, impedindo a aproximação das mesmas. Assim, faz-se necessário alterar a força iônica do meio pela adição de sais de alumínio ou de ferro. Esses íons positivos são adicionados à água para reduzir a sua carga superficial a

tal ponto que os colóides não tenham capacidade de se repelirem (DI BERNARDO; DANTAS, 2005).

Assim sendo, a coagulação deve ser efetuada em uma unidade de mistura rápida, local de transmissão de grande energia à massa líquida, e no menor tempo possível, em vista da rapidez com que as reações de desestabilização se processam (VIANNA, 2002).

Em seguida, a água coagulada chega aos floculadores, onde as partículas desestabilizadas vão se agregar, formando flocos, para que sejam removidos por sedimentação nos decantadores ou por flotação nos flotadores. Os decantadores visam à remoção dos flocos formados na etapa anterior pela ação da gravidade (ABNT, 1992). Os flocos maiores e mais pesados vão se depositar no fundo da unidade sendo descartados na forma de lodo.

Somente o sobrenadante dos decantadores passa pelo processo de filtração, que removerá as partículas suspensas e coloidais que não tenham sido retidas na sedimentação. A filtração consiste na passagem da água por um meio filtrante granular, onde por meio do mecanismo de transporte e de aderência, as partículas presentes podem ficar retidas.

Após a filtração, a água recebe a adição de agente desinfetante para garantir a destruição ou inativação de organismos patogênicos, capazes de produzir doenças, ou de outros organismos indesejáveis, etapa chamada de desinfecção. O cloro é o desinfetante mais utilizado, devido à sua alta eficiência, poder residual, baixo custo e por ser facilmente encontrado no mercado.

A fluoretação é a etapa seguinte à desinfecção e representa a penúltima etapa do tratamento de água. A adição do flúor é recomendada pela Portaria 2914/2011 (BRASIL, 2011) para prevenção de cárie dentária. E por fim, a adição de álcalis para correção do pH da água e ajuste aos padrões recomendados pela Portaria 2914/2011 (BRASIL, 2011) se configura como a última etapa do tratamento de água

A Figura 1 apresenta uma esquematização do processo descrito.

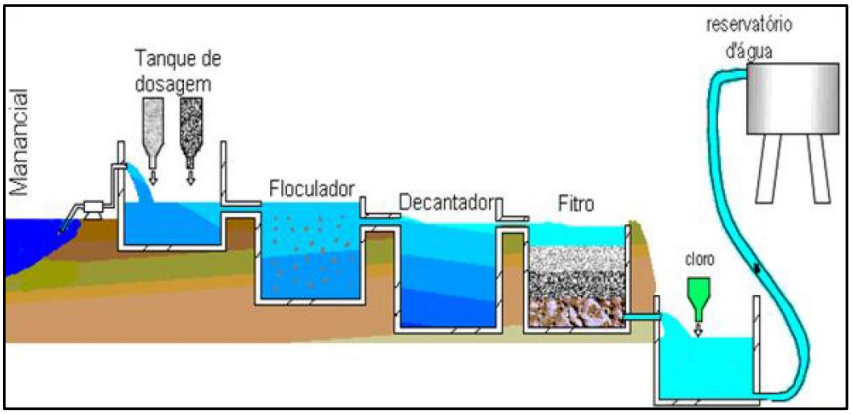

Figura 1 - Representação esquemática do tratamento convencional da água. Fonte: Pelissari (2006).

Todas essas etapas de tratamento, bem como todos os produtos químicos utilizados ao longo do processo, têm por finalidade eliminar microorganismos patógenos, remover impurezas, e controlar as características organolépticas (por exemplo, cor, sabor e odor) garantindo a qualidade da água fornecida para a população.

Dentre as etapas descritas anteriormente, o presente trabalho detalhará a floculação, também chamada de mistura lenta, conforme tópico a seguir.

3.2 FLOCULAÇÃO

A floculação corresponde à etapa em que são fornecidas condições para facilitar o contato e a agregação de partículas previamente desestabilizadas por coagulação química, visando à formação de flocos com tamanho e densidade adequada para serem removidos por sedimentação, flotação ou filtração direta. Após uma mistura rápida em que o coagulante é disperso na água de tratamento, o processo de floculação se inicia com a agitação menos intensa para promover a formação de flocos. É necessária a agitação relativamente lenta, com o objetivo de proporcionar encontros entre as partículas menores para formar agregados maiores ou flocos, e simultaneamente evitar que com o aumento do tamanho dos flocos, as forças de cisalhamento possam causar sua ruptura (PELISSARI, 2006).

Segundo Libânio (2005), as colisões entre as partículas, provocando floculação, são resultado do movimento Browniano (floculação pericinética), das diferenças de velocidade das linhas de corrente do fluido em escoamento (floculação ortocinética) e das distintas velocidades de sedimentação dos flocos (sedimentação diferencial).

A floculação pericinética é devida à energia térmica do fluído. O movimento Browniano (aleatório) das partículas coloidais de dimensão menor a 1 µm possibilita que aconteçam os primeiros choques. Essa fase se inicia logo após a desestabilização das partículas e termina em segundos, uma vez que existe um tamanho limite de flocos acima do qual o movimento Browniano não tem mais efeito (CALIJURI; CUNHA, 2013).

A floculação ortocinética acontece a partir da introdução de energia mecânica externa que impulsiona a aglutinação das partículas desestabilizadas e dos flocos formados inicialmente pelo movimento Browniano, para formação de flocos de maior peso, capazes de serem removidos na sedimentação ou flotação. Os parâmetros gradiente de velocidades e tempo de residência são determinantes na eficiência da floculação. Assim, a floculação ortocinética é o único mecanismo que pode ser alterado para poder melhorar a operação.

A sedimentação diferencial resulta na não uniformidade de volume e densidade dos flocos formados. Deste modo, os flocos adquirem velocidades diferentes de sedimentação, almejando que no movimento descendente na unidade de decantação, ocorram os choques e a consequente formação de flocos mais pesados.

O processo de floculação convencional para prover a dispersão e o contato dos agentes de desestabilização usualmente é realizado em tanques de agitação mecânica (floculadores mecanizados) ou em sistemas que aproveitam o fluxo hidráulico (floculadores hidráulicos) (PELISSARI, 2006). A seguir serão descritos esses tipos de unidades de floculação.

3.2.1 Tipos de unidades de floculação

A floculação pode ser realizada em unidades hidráulica ou mecanizada, essa classificação depende do tipo de dispositivo utilizado para fornecer a energia necessária ao processo. A escolha do tipo de sistema de floculação está relacionada com diversos fatores, como a qualidade da água bruta, mecanismos de coagulação, tamanhos das unidades, existência de profissional qualificado para operação e manutenção, regime de funcionamento e outros (DI BERNARDO; DANTAS, 2005).

Nas unidades mecanizadas, a agitação da água é provida por equipamento mecânico, normalmente são utilizados agitadores dotados de paletas ou agitadores do tipo hélice ou turbinas. Nas unidades hidráulicas, a água percorre caminhos com mudanças de direção para promover sua agitação.

3.2.1.1 Unidades de floculação hidráulica

Dentre os floculadores hidráulicos, normalmente são encontrados os de chicana com escoamento vertical ou horizontal e com menor frequência, o tipo Alabama, o de escoamento helicoidal e o de meio granular fixo ou expandido (DI BERNARDO; DANTAS, 2005).

Os chicanados são os mais difundidos, e são subdivididos de acordo com o tipo de escoamento promovido, que pode ser vertical ou horizontal. No primeiro tipo, a água sofrerá movimentos verticais ascendentes e descendentes sucessivamente, enquanto que no segundo tipo o escoamento efetua-se com movimentos horizontais (Figura 2 e Figura 3).

Os floculadores hidráulicos dotados de escoamento vertical são mais indicados para ETA de vazões maiores, acima de 100 l/s, pois a profundidade mínima de escoamento é maior do que a dos floculadores de chicanas com escoamento horizontal (DI BERNARDO, 1993).

Vale ressaltar que os sistemas hidráulicos apresentam algumas vantagens, como o baixo custo de implantação, operação e manutenção e não exigem profissionais qualificados para operação e manutenção. Contudo, esse sistema possui pouca flexibilidade em relação à variação de vazão e impossibilidade de variar ou ajustar o gradiente de velocidade e perda de carga relativamente alta (DI BERNARDO; DANTAS, 2005).

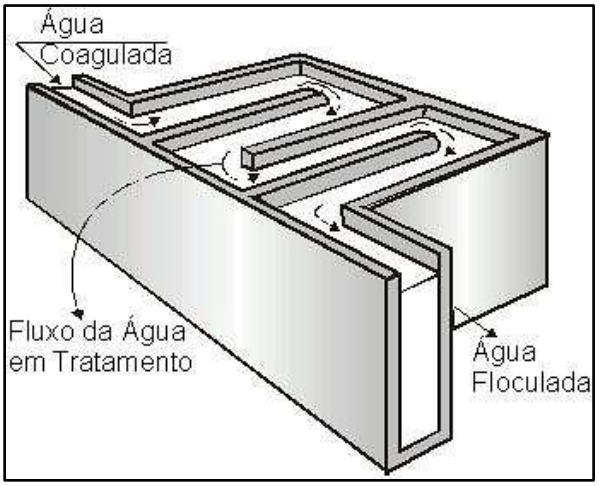

Figura 2 - Floculador hidráulico de fluxo horizontal. Fonte: Vianna (1997).

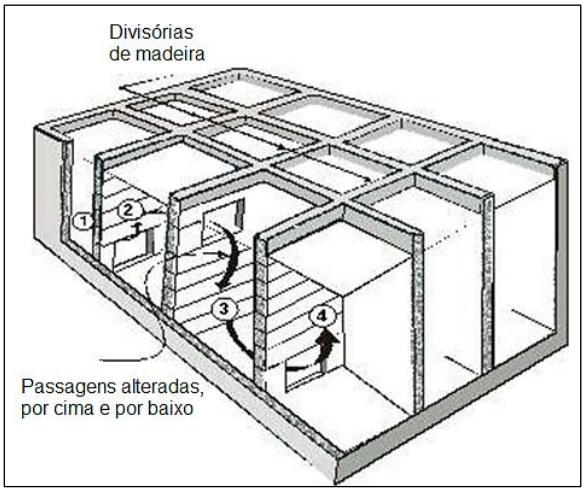

Figura 3 - Floculador hidráulico de fluxo vertical. Fonte: Vianna (1997).

3.2.1.2 Unidades de floculação mecanizada

As unidades de floculação mecanizada diferenciam-se principalmente pelo eixo, vertical (Figura 4) ou horizontal (Figura 5), onde as paletas, turbinas ou hélices estão conectadas aos conjuntos motor-redutor. (LIBÂNIO, 2005).

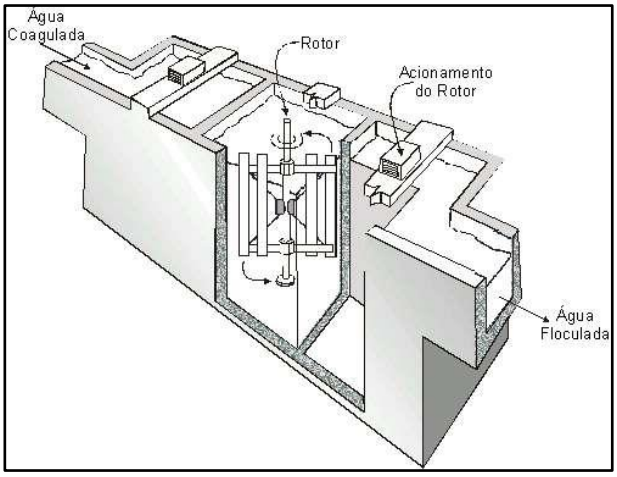

Figura 4 - Floculador mecânico de eixo vertical tipo com paletas. Fonte: Vianna (1997).

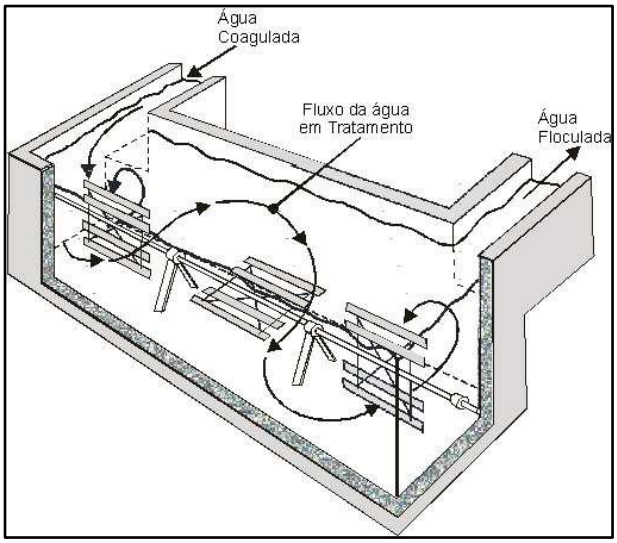

Figura 5 - Floculador mecânico de eixo horizontal tipo com paletas. Fonte: Vianna (1997).

Os floculadores mecânicos que utilizam equipamento de agitação com eixo vertical geralmente possuem sua base fixada na passarela e o rotor localizado a certa distância do fundo da câmara. Os rotores são, comumente, do tipo turbina com paletas inclinadas (axial) ou do tipo disco com paletas soldadas na parte inferior (radial) (DI BERNARDO; DANTAS, 2005). A Figura 6 apresenta um agitador do tipo axial e esquema de uma câmara com o equipamento.

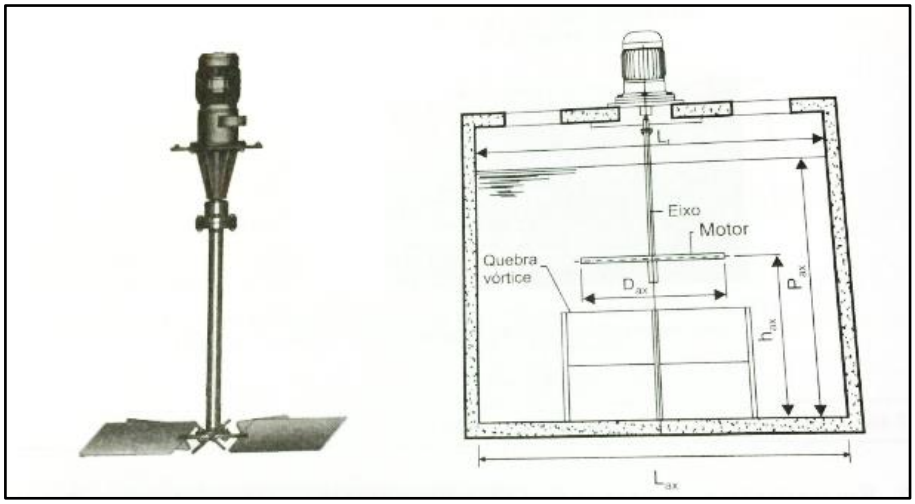

Figura 6 - Agitador do tipo axial e esquema de uma câmara com o equipamento. Fonte: Bi Bernardo (2005).

Em relação aos floculadores que utilizam equipamento com paletas giratórias paralelas ao eixo, existem dois tipos básicos, os de eixo vertical e os de eixo horizontal. O primeiro está limitado pela largura da câmara que, geralmente, é inferior a 8 m, enquanto o segundo tem sido empregado em estações de tratamento com capacidade relativamente alta (DI BERNARDO; DANTAS, 2005).

Verifica-se ainda que os tanques de floculação mecanizados devem ser subdivididos preferencialmente em pelo menos três compartilhamento em série, separados por cortinas ou parede, interligados, porém, por aberturas localizadas de forma a reduzir a possibilidade de passagem direta de água de uma abertura para outra. O local das aberturas ao ser definido deve levar em consideração as direções de fluxos impostas pelo sistema de agitação e pela própria entrada de água no tanque (VIANNA, 1997).

Vale destacar que os floculadores mecânicos são vantajosos devido à flexibilidade da variação do gradiente médio de velocidade, uma vez que é fácil manipular a mudança de rotação dos dispositivos de agitação e a perda de carga gerada pelos mesmos é pequena. Outra vantagem que pode ser apontada é o fato da energia necessária para proporcionar a floculação ser proveniente exclusivamente da rotação das paletas, cujo comportamento é uniforme, dependente apenas da energia elétrica (DI BERNARDO; DANTAS, 2005).

No entanto, as unidades mecanizadas também apresentam desvantagens. Bhole (1993) aponta o elevado custo de implantação, operação e manutenção e a presença de curtos-circuitos, como fatores que reduzem a difusão deste tipo de

unidade, tornando o uso dos floculadores mecânicos restrito aos projetos de ETA de alta capacidade, ou mesmo á instalações piloto, como a IP objeto desse estudo.

3.2.2 Fatores intervenientes na floculação

O gradiente de velocidade médio de floculação (Gf) e o tempo de residência ou tempo de floculação (Tf) constituem-se nos principais fatores intervenientes na floculação e nos principais parâmetros de projeto, tanto para unidades mecanizadas quanto para as unidades hidráulicas. Contudo, para as unidades mecanizadas as geometrias das câmaras e das paletas podem ser mencionados como fatores secundários (LIBÂNIO, 2005).

Tais parâmetros estão relacionados à densidade e o tamanho do floco formado, reduzindo a turbidez e/ou cor aparente da água nessa etapa de tratamento.

3.2.2.1 Tempo de residência ou Tempo de floculação (Tf)

Segundo Libânio (2005) o tempo residência teórico (T) corresponde à razão entre o volume útil da unidade de floculação e a vazão afluente a ela. Porém, na prática o valor teórico verifica-se apenas nas unidades de floculação hidráulicas do tipo chicana, pois a mesma apresenta um maior número de câmaras, fazendo com que o escoamento se aproxime do tipo pistão. Para as unidades mecanizadas, cujo número de câmaras geralmente é inferior a quatro, existe um expressivo efeito de curto-circuito. Assim, uma parcela resumida de água permanece na unidade por tempo inferior ao teórico.

Apesar da individualidade de cada unidade de floculação, modelos matemáticos apresentam-se como razoável estimativa do tempo real de floculação. Dentre estes Camp (1953a) *apud* Libânio (2005) apresentou o modelo fundamentado na Equação 1.

$$\frac{C}{C_0} = \frac{n^n}{(n-1)!}\left(\frac{T_f}{T}\right)^{n-1} e^{-\frac{nT_f}{T}} \qquad (Equação\ 1)$$

Na qual:

- n: número de câmaras em série da unidade de floculação;
- C_0, C: concentração do traçador na entrada e na saída da unidade, respectivamente (mg/L);
- T_f: tempo real de floculação (min);
- T: tempo de residência teórico da unidade de floculação (min).

De acordo com Libânio (2005) ao empregar a Equação 1, considerando unidade de floculação de três câmaras em série, verifica-se que aproximadamente 4% do volume do traçador deixam a unidade de floculação em um quarto do tempo de residência teórico e 19% na metade deste tempo.

Seguindo esse mesmo contexto, foi proposto por Bratby (1981) *apud* Libânio (2005) um modelo mais simplificado para prever nos ensaios o efeito de curto-circuito. Esse modelo, apresentado na Equação 2.

$$T = T_f \left(\frac{n}{n-1}\right) \qquad (Equação\ 2)$$

Onde:

- T_f: tempo real de floculação (min);
- T: tempo de residência teórico da unidade de floculação (min).
- n: número de câmaras em série da unidade de floculação;

Conforme a Equação 2, para uma unidade de floculação com três câmaras em série, o tempo de residência real seria aproximadamente 66% do teórico. Nesse contexto, para uma unidade de floculação hidráulica dotada de 10 câmaras, o tempo real torna-se 90% do teórico, comprovando o mínimo efeito de curto-circuito.

A ocorrência de curtos-circuitos relaciona-se diretamente com o número de câmaras em série. A compartimentação do floculador diminui a magnitude de curto-circuito da água, pois haverá uma menor quantidade de água permanecendo nos tanques por um tempo menor que o teórico de residência (PARLATORE, 1974).

Segundo estudo de Hudson Junior (1975) apud Vianna (1997) para unidade de floculação com um compartimento, cerca 40% da água ficam retidos por um tempo

inferior à metade do tempo de residência teórico e que para cinco compartimentos, apenas 12% ficam retidos por um tempo inferior à metade do tempo teórico.

3.2.2.2 Gradiente de velocidade (Gf)

O parâmetro Gradiente de velocidade (Gf) é um dos principais parâmetros a serem adotados no dimensionamento de unidades de floculação. Para tanto, NBR 12216 (1992) determina que na ausência de ensaios de floculação, deve-se adotar gradiente de velocidade máximo, no primeiro compartimento, de 70 s^{-1} e mínimo, no último, de 10 s^{-1}.

O estabelecimento desses parâmetros depende, fundamentalmente, da qualidade da água bruta e da tecnologia de tratamento utilizada na ETA (PÁDUA, 1994 *apud* DI BERNARDO *et al,* 2001).

Estudos demonstram que há melhoria na qualidade da água decantada quando a floculação é realizada com gradiente de velocidade decrescente ao longo do tempo. Visto que, no começo da floculação, há um alto índice de dispersão das partículas na água, faz-se necessário empregar valores de gradiente de velocidade relativamente altos para elevar as chances de contato das partículas previamente desestabilizadas, a fim de que se formem os flocos. Todavia, à medida que ocorre a floculação, há necessidade de reduzir o gradiente de velocidade para tomar mínima a ruptura dos flocos que vão se formando (DI BERNARDO et al, 2001; LIBÂNIO, 2005).

A metodologia desenvolvida por Pádua (1994) *apud* Cestari (2011), para unidades de floculação com escoamento contínuo a partir de ensaios realizados em reatores estáticos, comprovou que a gradação do Gf ao longo do tempo da primeira para a última câmara resultou em turbidez remanescente menor que quando o Gf ótimo era constante ao longo do tempo, para o mesmo Tf. Vale ressaltar que o valor ótimo do gradiente de velocidade produz a máxima eficiência para o Tf considerado.

Di Bernardo *at al* (2001) utilizando a metodologia descrita por Pádua (1994) verificaram que a redução do tempo de floculação em unidades com escoamento contínuo é possível a partir do escalonamento do gradiente de velocidade. Para isso, foi realizado um estudo empregando duas amostras diferentes de água bruta, água

tipo I e água tipo II (Tabela 1), e condições semelhantes de coagulação, mistura rápida, floculação e sedimentação.

Tabela 1- Características das águas Tipo I e Tipo II.

Características das águas de estudo		
Parâmetro	**Água Tipo I**	**Água Tipo II**
pH	7,5 a 7,7	7,3 a 7,7
Turbidez (uT)	21 a 23	24 a 26
Cor aparente (uC)	130 a 150	140 a 160
Cor verdadeira (uC)	45 a 50	5 a 15
Alcalinidade (mg CaCO3/L)	21 a 23	32 a 34
Dureza (mg CaCo3/L)	4	15 a 17
Condutividade	57	45 a 47

Fonte: Di Bernardo *at al* (2001).

Para a amostra de água tipo I os gradientes de velocidade médios nas quatro câmaras de floculação empregados foram $Gf_1=55s^{-1}$, $Gf_2=30s^{-1}$, $Gf_3=20s^{-1}$ e $Gf_4=20s^{-1}$ e os resultados obtidos mostraram que, teoricamente, o escalonamento do gradiente de velocidade permitiria reduzir o tempo de residência de 20 para 15 min sem que fosse afetada a qualidade da água decantada. Enquanto a turbidez remanescente mínima, mantendo-se o gradiente de velocidade constante após 15 min, foi de 2,2 uT, a variação do gradiente de velocidade possibilitaria reduzi-la para 1,4 uT.

Para a água tipo II os gradientes de velocidade médios nas quatro câmaras de floculação empregados foram $Gf_1=50^{s-1}$, $Gf_2=20s^{-1}$, $Gf_3=20s^{-1}$ e $Gf_4=20s^{-1}$e o escalonamento do gradiente de velocidade por 20 min correspondeu à produção de água com a mesma qualidade da resultante ao manter Gf constante por 22,1 minutos, ou seja, teoricamente seria possível reduzir em cerca de 10% o tempo de residência.

Os resultados da pesquisa realizada por Di Bernardo *at al* (2001) indicaram que o escalonamento do gradiente de velocidade na floculação depende além da qualidade da água de estudo, do tipo de coagulante e da velocidade de sedimentação.

3.3 COMPORTAMENTO HIDRODINÂMICO

3.3.1 Modelos de escoamento

Reatores são unidades que convertem reagentes em produtos, em condições controladas. De acordo com o tipo de alimentação estas unidades podem ser classificadas em reator descontínuo ou de batelada e reator contínuo.

No reator descontínuo os reagentes são lançados em um tanque e misturados, permanecendo no reator durante o período em que ocorre a reação, sendo depois descarregada a mistura resultante (LEVENSPIEL, 1974²). O reator descontínuo é utilizado para a operação de pequena escala, para testar os novos processos que não foram totalmente desenvolvidos, para a fabricação de produtos caros e para processos que são difíceis de converter em operações contínuas (FOGLER, 2002).

Nos reatores contínuos, os reagentes e produtos são, respectivamente, adicionados e retirados continuamente do reator. O reator contínuo é adequado para processos industriais onde se utilizam grande quantidade de material (LEVENSPIEL, 1974²).

Os reatores podem apresentar dois tipos de modelos de escoamento ideal, do tipo pistão (*plugflow*) e do tipo mistura completa ou mistura perfeita (*perfectmixing*) (LEVENSPIEL, 2000). Escoamentos com comportamentos diferentes podem ser considerados não-ideais.

No escoamento ideal do tipo pistão todas as partículas de fluido possuem a mesma velocidade e seguem caminhos paralelos e retos, levando o mesmo tempo para percorrer o reator, não havendo mistura (TEIXEIRA, 1993). Segundo Toscani (2010) para que isso aconteça, os reatores devem ter uma alta relação comprimento/largura. Vale destacar que a condição necessária e suficiente para que o escoamento do tipo pistão aconteça é o tempo de residência no reator, que deve ser o mesmo para todos os elementos do fluido (LEVENSPIEL, 2000).

O escoamento ideal do tipo mistura completa é caracterizado pela homogeneidade de qualquer propriedade do fluido, em toda extensão do reator e a qualquer tempo, não existindo variações espaciais de propriedades como, por exemplo, concentração e temperatura (TEIXEIRA, 1993). O modelo de mistura completa se aplica melhor a reatores com formato circular ou quadrado ou naqueles onde ocorre agitação mecânica. Comumente, as condições de mistura encontradas nesse tipo de reator

são fornecidas por uma fonte externa de energia, de modo a homogeneizar a concentração de gases, líquidos e sólidos (TOSCANI, 2010).

Na prática os reatores reais não seguem exatamente os modelos de escoamento ideal descritos anteriormente e apresentam escoamento arbitrário, conforme destacado na Figura 7, ou seja, se aproximam mais de um ou de outro com maior ou menor desvio (LEVENSPIEL, 2000). O grau de desvio entre as características do escoamento ideal e as características observadas na prática é dado pela eficiência hidráulica (TEIXEIRA, 1993).

Segundo Levenspiel (1974[1]) os desvios em relação ao escoamento ideal pode ser causado pela formação de canais ou pelo reciclo do fluido, como também pela criação de regiões estagnantes no recipiente, assim definidos:

- *Curto-circuito*: caminhos preferenciais percorridos por moléculas de fluido que resultam em um tempo de residência no reator inferior ao tempo de residência teórico.
- *Recirculações*: parcelas do fluido são recirculadas para a entrada ou para o seu interior.
- *Zonas mortas*: são regiões do reator onde os tempos de residência das moléculas de fluido são relativamente elevados em relação ao tempo de residência teórico. Estes regimes são caracterizados pela pequena troca de massa e calor com as regiões adjacentes.

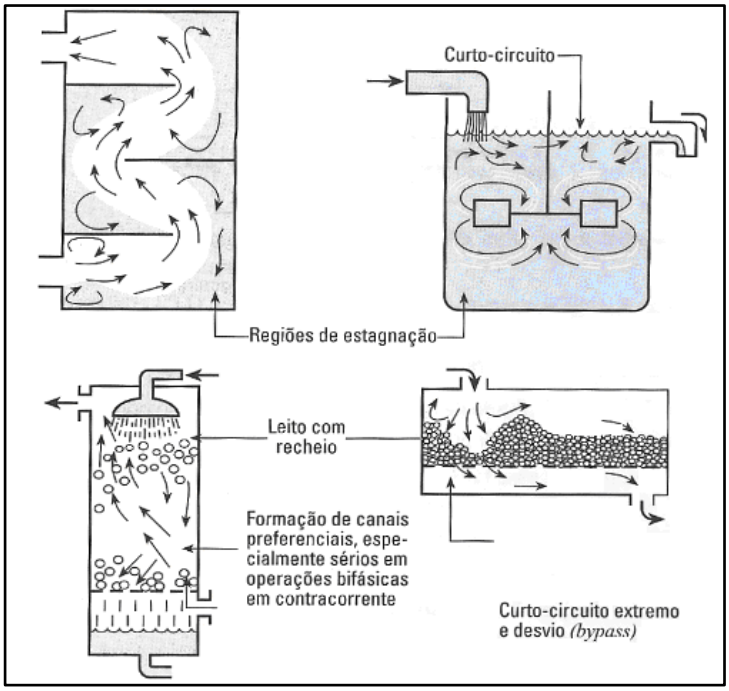

Figura 7 - Modelos de escoamento não-ideal que podem existir em equipamentos de processo. Fonte: Levenspiel (2000).

3.3.2 Traçadores

O emprego das técnicas de traçagem são os métodos mais frequentemente utilizados para a avaliação da eficiência hidráulica de reatores, a técnica consiste na injeção de uma substância solúvel na entrada da unidade, de maneira instantânea ou contínua, e na obtenção sistemática de dados de concentração com o tempo (curvas de passagem) na sua seção de saída (SIQUEIRA, 1999). Os traçadores são dispositivos ou substâncias que simulam o movimento individual ou de um conjunto de partículas do fluido (TEIXEIRA, 1993).

O traçador deve ser uma espécie não reativa, facilmente detectável e as propriedades físicas do traçador devem ser semelhantes àquelas da mistura reagente e deve ser completamente solúvel nela. O traçador deve ainda não ser adsorvido nas paredes do reator e em outras superfícies (FOGLER, 2002). Além disso, na escolha do traçador deve-se assegurar que sua concentração na água seja consistentemente baixa e aproximadamente constante (DI BERNARDO; DANTAS, 2005).

Alguns fatores devem ser levados em consideração na escolha do traçador, dentre os quais destacam-se a vazão afluente à estação, as dimensões das unidades, a

qualidade da água e o custo do produto. Podem ser empregados corantes (fluoresceína, rodamina), sais (fluoreto de sódio, fluoreto de potássio, cloreto de cálcio, cloreto de sódio, hipoclorito de sódio) e bases (hidróxido de sódio). Tanto o cloreto de cálcio quanto o cloreto de sódio são amplamente empregados em estudos hidrodinâmicos de unidades de tratamento de água (DI BERNARDO; DANTAS, 2005).

3.3.3 Método do Estímulo e Resposta

Alguns métodos podem ser aplicados para caracterizar o grau de não idealidade do escoamento, um deles consiste no método de estímulo e resposta.

Essa técnica experimental utilizada para analisar a Distribuição de Tempos de Residência (DTR) de um fluido em um reator consiste em injetar uma quantidade conhecida do traçador na entrada do dispositivo, registrando continuamente ou em intervalos de tempo regular sua saída na corrente que deixa o recipiente (LEVENSPIEL, 2000).

Dessa forma, a massa total de traçador adicionada e sua concentração inicial são conhecidas, obtendo como resposta, a concentração do traçador efluente, em função do tempo transcorrido desde o início da análise (CASTRO, 2010).

Os dois tipos de métodos de injeção mais usados são o de injeção instantânea e o de injeção contínua (CASTRO, 2010). A injeção instantânea (pulso) baseia-se em injetar uma quantidade de traçador de uma só vez na corrente de alimentação do reator, em um intervalo de tempo tão curto quanto possível, passando-se a medir sua concentração na saída em função do tempo (FOGLER, 2002).

A injeção contínua baseia-se em alimentar a unidade durante período de tempo pelo menos três vezes maior que o tempo de residência teórico (T); conhecendo a concentração do traçador no afluente, mede-se sua concentração na saída (CASTRO, 2010).

Para o estudo em questão, será considerada apenas a função pulso, devido às desvantagens da injeção contínua, como a dificuldade de manter uma concentração constante de traçador na alimentação e a grande quantidade de traçador necessária. Além disso, a função pulso é mais fácil de ser aplicada e atende satisfatoriamente ao que se propõe este estudo.

3.3.4 Curva E ou Distribuição dos Tempos de Residência (DTR)

Segundo Levenspiel (2000), os elementos do fluido que adotam diferentes trajetórias no reator podem gastar tempos distintos para atravessarem o recipiente. Portanto, a distribuição desses tempos de permanência para a corrente de fluido que deixa o recipiente é denominada distribuição do tempo de residência (DTR) do fluido ou distribuição do tempo de saída - E.

É conveniente representar a DRT de forma que a área sob a curva seja unitária conforme Equação 3:

$$\int_0^{\infty} E\ dt = 1 \qquad (Equação\ 3)$$

Onde E é a distribuição do tempo de saída.

A fração da corrente de saída com idade entre t e t + dt, sendo a idade o tempo gasto por aquele elemento de fluido no recipiente, é apresentada pela Equação 4:

$$E\ dt \qquad (Equação\ 4)$$

A fração mais nova que a idade t_1 é representada pela Equação 5:

$$\int_0^{t_1} E\ dt = 1 \qquad (Equação\ 5)$$

E a fração de idade superior a t_1 mostrada pela área escura da Figura 8 é apresentada pela Equação 6:

$$\int_0^{\infty} E\ dt = 1 - \int_0^{t_1} E\ dt \qquad (Equação\ 6)$$

A curva E ou Distribuição do Tempo de Residência (DTR) é fundamental na avaliação do grau de desvio da idealidade do escoamento. A Figura 8 apresenta a DTR normalizada.

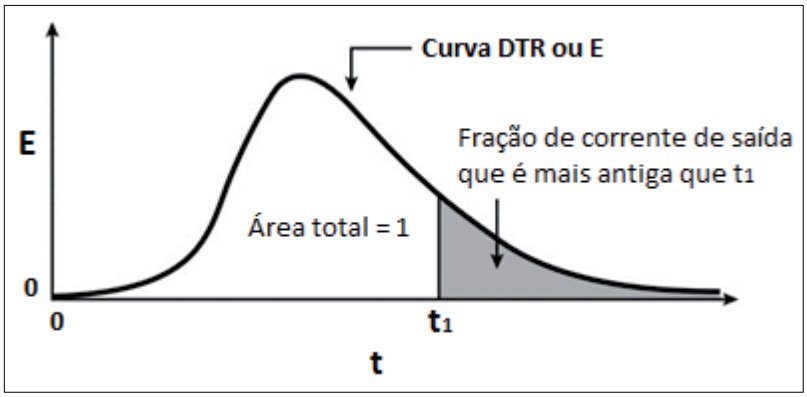

Figura 8 - Curva de distribuição do tempo de residência curva DRT. Fonte: Levenspiel (2000).

3.3.4.1 Determinação da Curva E com aplicação tipo Pulso

A maneira mais simples e direta para determinar a Curva E em reatores emprega o uso de traçador físico não reativo. A forma de aplicação do traçador pode ser do tipo pulso, degrau, periódico e aleatório. Neste caso para a determinação da curva E, será empregada somente a aplicação do tipo pulso.

De acordo com Levenspiel (2000), para encontrar a Curva E em um reator com volume conhecido, através do qual o fluido escoa, deve-se introduzir instantaneamente no fluido que entra no reator, uma quantidade conhecida de massa de traçador e registrar a concentração e o tempo do traçador ao deixar o recipiente, conforme Figura 9.

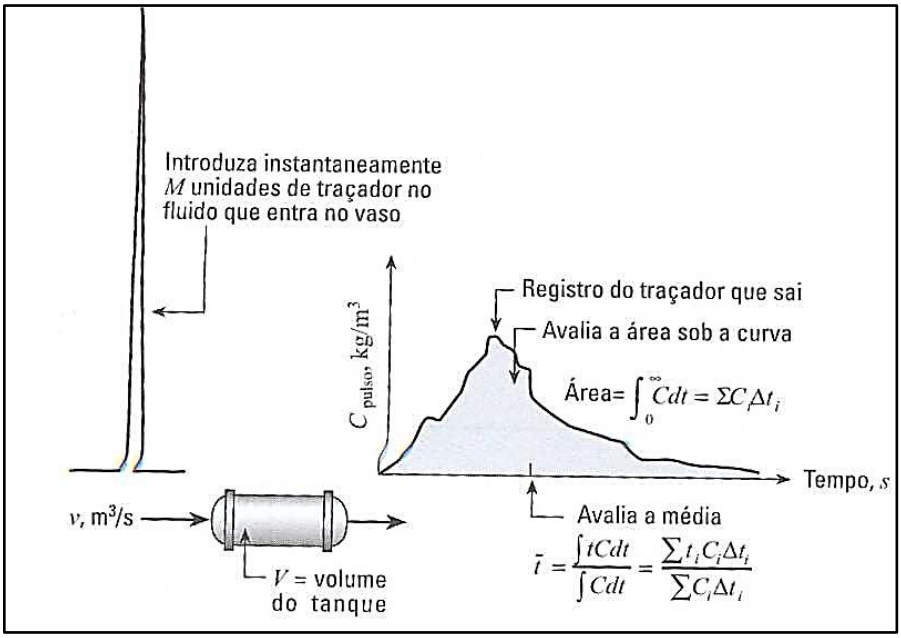

Figura 9 - Informações significativas obtidas com ensaios com traçadores. Fonte: Levenspiel (2000).

Assim, a partir da obtenção da curva concentração pelo tempo pode-se calcular a área (A) abaixo da curva, conforme Equação 7:

$$A = \int_0^\infty C\ dt \cong \sum_i C_i \Delta t_i = \frac{M}{Q} \qquad (Equação\ 7)$$

Onde:

M: $massa\ do\ traçador\ (kg)$

Q: $vazão\ (m^3/s)$

c_i: Concentração de traçador no tempo i;

Δt_i: Intervalo de tempo.

E o tempo de residência médio (t_m), conforme Equação 8:

$$t_m = \frac{\int_0^\infty tC\ dt}{\int_0^\infty C\ dt} \cong \frac{\sum_i t_i c_i \Delta t_i}{\sum_i c_i \Delta t_i} = \frac{V}{Q} \qquad (\ Equação\ 8)$$

Onde:

V: $volume\ (m^3)$

Para encontrar a Curva E a partir da curva concentração pelo tempo, basta simplesmente mudar a escala de concentração, de modo que a área sob a curva seja igual à unidade. Assim, simplesmente dividem-se as leituras de concentração por *M/Q*, como mostrado na Equação 9.

$$E_i = \frac{c_i}{M/Q} \qquad (Equação\ 9)$$

Onde:

$E_i = Distribuição\ de\ idade\ de\ saída\ no\ tempo\ i$

A relação entre as curvas E e a curva concentração pelo tempo somente se mantém de forma exata para a condição de contorno de vaso fechado. Esta condição pressupõe que o fluido deve entrar e sair do reator apenas uma única vez, não existindo escoamento, difusão ou redemoinhos ascendentes na entrada ou na sua saída (LEVENSPIEL, 2000).

Outra maneira de visualização da curva DTR provém da conversão da Curva E para a função E_θ, que adimensionaliza a escala de tempo, ao empregar o parâmetro θ = t/t_m. Essa nova função é obtida de acordo com a Equação 10 e exemplificada pela Figura 10.

$$E_\theta = t_m \times E = \frac{V}{Q} \times \frac{c_i}{\frac{M}{Q}} = \frac{V}{M} c_i \qquad (Equação\ 10)$$

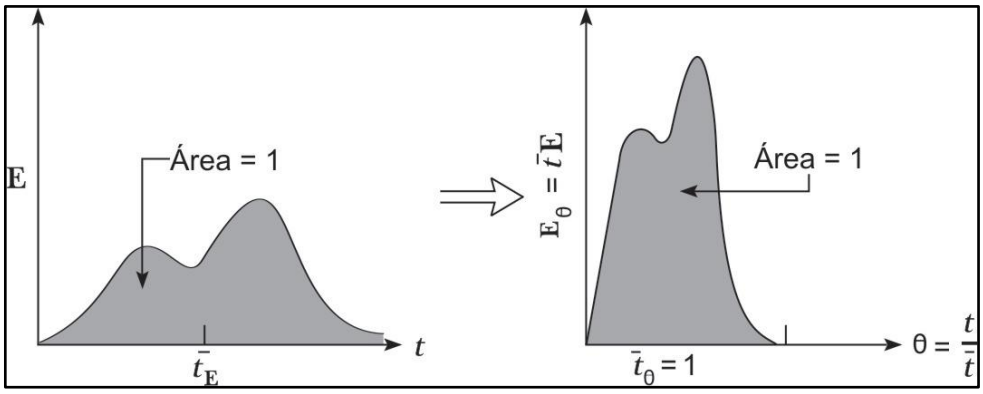

Figura 10- Transformação da Curva C_{pulso} na Curva E_θ. Fonte: Levenspiel (2000).

Segundo Di Bernardo e Dantas (2005), para determinar a fração dos elementos de fluido que sai ou permanece da unidade por um tempo menor ou igual a t, utiliza-se a Equação 11.

$$F_{(t)} = \frac{\sum_{i=1}^{n} Q\ \Delta t_i\ C_i}{\sum_{i=1}^{m}\ Q\ \Delta t_i C_i} \qquad (Equação\ 11)$$

Analisando Equação 11, temos que o divisor representa a quantidade de traçador que saiu até o tempo t ou continuou por um tempo menor ou igual a t na unidade e o membro inferior, a quantidade total de traçador recuperada no tempo tm. A Equação 11 pode ser simplificada considerando que a vazão Q permaneça constante e que o intervalo de tempo para coleta de amostra seja igual, obtendo assim a Equação 12.

$$F_{(t)} = \frac{\sum_{i=1}^{n} C_i}{\sum_{i=1}^{m} C_i} \qquad (\ Equação\ \ 12)$$

3.3.5 Indicadores de Eficiência Hidráulica

A eficiência hidráulica (EH) pode ser definida como a medida do grau de desvio entre as características hidrodinâmicas do escoamento ideal e do escoamento real (TEIXEIRA, 1993).

Para a avaliação da eficiência hidráulica utiliza-se amplamente a técnica de traçadores. Por meio da utilização desse procedimento, podem ser extraídos das curvas de passagem alguns indicadores que permitem caracterizar o escoamento de um reator, tanto qualitativa quanto quantitativamente. Estes indicadores tentam quantificar o nível de semelhança entre o escoamento real e o escoamento ideal, através da determinação dos níveis de curto-circuito e mistura (SIQUEIRA, 1998).

Segundo estudo realizado por Siqueira (2008) os principais indicadores para medir os níveis de curto-circuito e mistura em uma unidade são:

***Tempo inicial de passagem* (t_i):** tempo do início da passagem do traçador na saída da unidade. É o indicador que melhor representa fisicamente o fenômeno de curto-circuito, porém, indica somente a intensidade de curto-circuito.

***Tempo de chegada de 10% de massa do traçador* (t_{10}):** tempo que 10% da massa do traçador injetado necessita para alcançar a saída da unidade. Representa bem o indicador de curto-circuito, pois está associado ao período inicial de passagem do traçador na saída na unidade.

***Tempo de passagem da máxima concentração do traçador* (t_p):** tempo de passagem da máxima concentração de traçador na saída da unidade. É um bom indicador para situações com alta ocorrência de curto-circuito.

***Índice de Morril* (M_O):** esse índice representa um indicador de mistura e define-se pela razão entre os tempos de passagem de 90% e 10% da massa do traçador na saída da unidade ($M_O = {t_{90}}/{t_{10}}$).

***Índice de Dispersão* (σ^2):** representa um indicador de mistura que está diretamente relacionado com a variância da curva de passagem, portanto, indica o grau de espalhamento do traçador no interior da unidade. Pode ser calculado conforme Equação 13 ou Equação 14.

$$\sigma^2 = \frac{\int_0^\infty t^2\, C\, dt}{\int_0^\infty C\ dt} \tag{13}$$

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n} t_i^2\, .\, C_i(t).\, \Delta t_i}{\sum_{i=1}^{n} C_i(t).\, \Delta t_i} - t_m^2 \tag{14}$$

Onde:

c_i: Concentração de traçador no tempo i;

t_i: tempo de coleta

Δt_i: Intervalo de tempo.

Normalizando o índice de dispersão obtém-se a Equação 15.

$$\sigma_\theta^2 = \frac{\sigma^2}{{t_m}^2} \tag{15}$$

O índice de dispersão é o mais recomendado para se avaliar o grau de mistura em uma unidade, pois leva em consideração toda a curva de passagem.

Tabela 2 apresenta os valores dos indicadores de Eficiência Hidráulica para escoamentos ideais.

Tabela 2 - Valores de indicadores de EH para escoamentos ideais.

Indicadores de EH	Tipos de Escoamento	
	Pistão	Mistura Completa
t_i	1,0	0,0
t_{10}	1,0	0,11
σ^2	0,0	1,0
M_O	1,0	21,8

Fonte: Adaptado Siqueira (1998).

A eficiência das unidades de floculação também pode ser avaliada segundo o tempo de residência médio (t_m). De acordo com Rebhun e Argaman (1965) apud Cestari (2011) quando este parâmetro (t_m) é igual ao tempo de residência teórico (T) não há problemas de escoamento com o reator. Entretanto para t_m menores que T, há formação de zonas mortas e consequentemente ocorrência de curtos-circuitos hidráulicos.

3.3.6 Modelo para escoamento não ideal

Os regimes de mistura completa e fluxo pistão são abstrações matemáticas que dificilmente ocorrem na prática, visto que pressupõem condições ideais de mistura ou de ausência de dispersão longitudinal respectivamente (TOSCANI, 2010).
Os modelos de escoamento são válidos para representar escoamentos em reatores, no caso do estudo em questão - floculadores, e para diagnosticar problemas em escoamento, dessa maneira, é possível comparar as curvas obtidas experimentalmente com as curvas do modelo de escoamento ideal (CESTARI, 2011).

3.3.6.1 Modelo de tanques de mistura completa em série

Esse modelo de tanques de mistura completa em série (N) representa o número de reatores de mesmo volume, igualmente agitados, em série, através dos quais o fluido escoa (Figura 11).

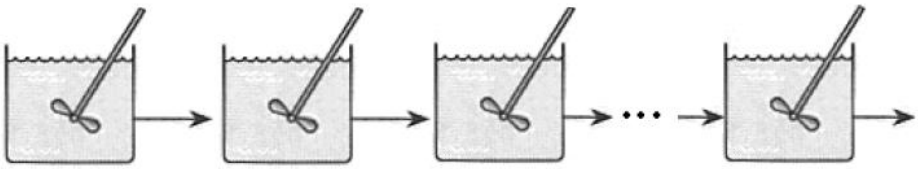

Figura 11- Tanques de mistura completa em série. Fonte: Adaptado Levenspiel (2000).

O grau de mistura é caracterizado pelo número de tanques. Então, quanto maior o número de N (o que equivale ao número de câmaras do floculador) mais baixo é o grau de mistura e, no caso limite de um número de tanques infinito, prevalece o escoamento pistonado (LEVENSPIEL, 2000). A Equação 17 apresenta o ajuste para o modelo de n-reatores de mistura perfeita em série.

$$E_\theta = \frac{N(N\theta)^{N-1}}{(N-1)!} e^{-N\theta} \qquad (Equação\ 17)$$

Na Figura 12 são mostradas as curvas delineadas a partir da Equação 17.

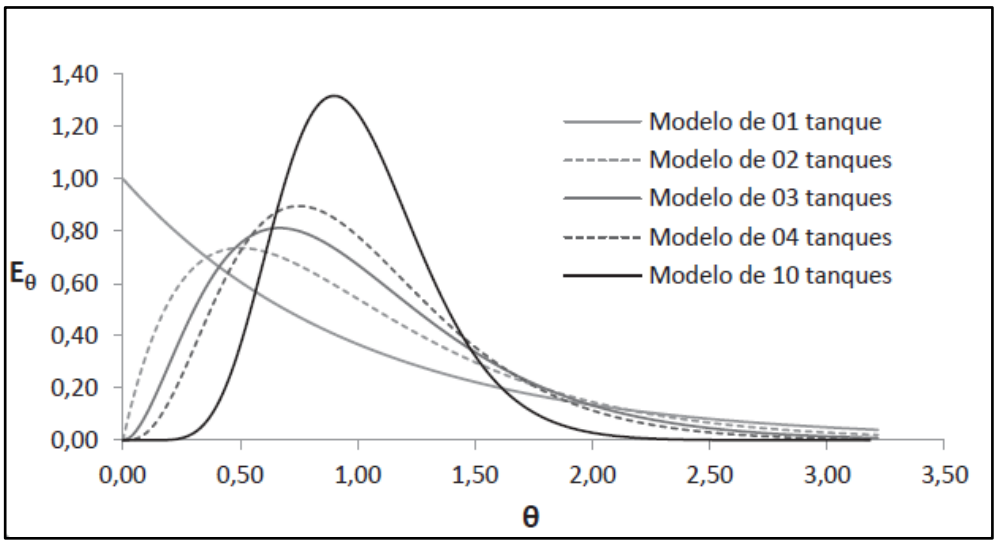

Figura 12- Curvas de DTR para modelos de tanques em série. Fonte: Cestari (2011).

E a variância do modelo de n-reatores de mistura perfeita em série pode ser calculada pela Equação 18.

$$\sigma_\theta^2 = \frac{1}{N} \qquad (18)$$

À medida que o número de tanques em série aumenta, a variância decresce. Para N elevado, a curva DRT torna-se cada vez mais simétrica e aproxima-se da curva de escoamento do tipo pistão.

3.3.7 Comportamento Hidrodinâmico em Floculadores

Os floculadores podem apresentar escoamento tanto do tipo pistão quanto do tipo mistura completa, sendo o tipo de escoamento dependente do modelo da unidade projetada. Floculadores do tipo chicana apresentam escoamento do tipo pistão e floculadores mecanizados apresentam escoamento do tipo mistura completa (DI BERNARDO; DANTAS, 2005)

No entanto, para floculadores mecanizados em série, se a série for composta por apenas uma câmara de floculação o sistema reproduz um reator de mistura completa. E se o sistema apresentar um número infinito de câmaras em série, o escoamento pistão é reproduzido (LEVENSPIEL, 2000).

Os efeitos de curto circuito somente assumem relevância para unidades mecanizadas, pois a própria concepção dos floculadores hidráulicos favorece a redução do fenômeno (LIBÂNIO, 2005).

Em floculadores que apresentam curtos-circuitos, zonas mortas ou estagnadas, ou recirculação do fluido, as curvas DTR experimentais caracterizam-se por apresentarem respectivamente picos antecipados em relação ao tempo de residência hidráulico (T), longas caudas e oscilações na curva.

Os efeitos de curto circuito podem ser minimizados na concepção do projeto da unidade de floculação e/ou na sua operação. Em termos de projeto, os efeitos podem ser atenuados através da disposição alternada das aberturas em relação à direção do escoamento e pela inserção de anteparos logo após as aberturas. Operacionalmente os efeitos podem ser reduzidos alterando o sentido de rotação das paletas, ou seja, na primeira câmara, o eixo gira no sentido horário para, na segunda, girar no sentido anti-horário e assim sucessivamente (LIBÂNIO, 2005).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 LOCAL DE TRABALHO

O presente trabalho foi desenvolvido em parceria com Laboratório de Saneamento da Universidade Federal do Espírito Santo, Laboratório de Análises Físico-químicas e a Instalação Piloto de Tratamento de Águas de Abastecimento do Tipo Convencional, localizados na ETA de Carapina, Serra – ES. Ao longo do desenvolvimento da pesquisa foram usadas as dependências dos laboratórios da Universidade, bem como o laboratório de apoio da CESAN e a Instalação Piloto, onde foi concentrada a maior parte dos trabalhos.

4.1.1 Instalação Piloto

A Instalação Piloto (IP) está localizada na ETA da Companhia Espírito Santense de Saneamento (CESAN) que se situa em Carapina no município de Serra/ES.

A IP (Figura 13) foi projetada para uma vazão nominal de 1000 $l.h^{-1}$ com fluxo descendente por gravidade, sendo composta pelas seguintes unidades: captação e adutora de água bruta, caixa de entrada e mistura rápida, floculação, decantação, filtração rápida, coluna de adsorção por carvão ativado granular e tanque de contato. Cada unidade será descrita na sequência.

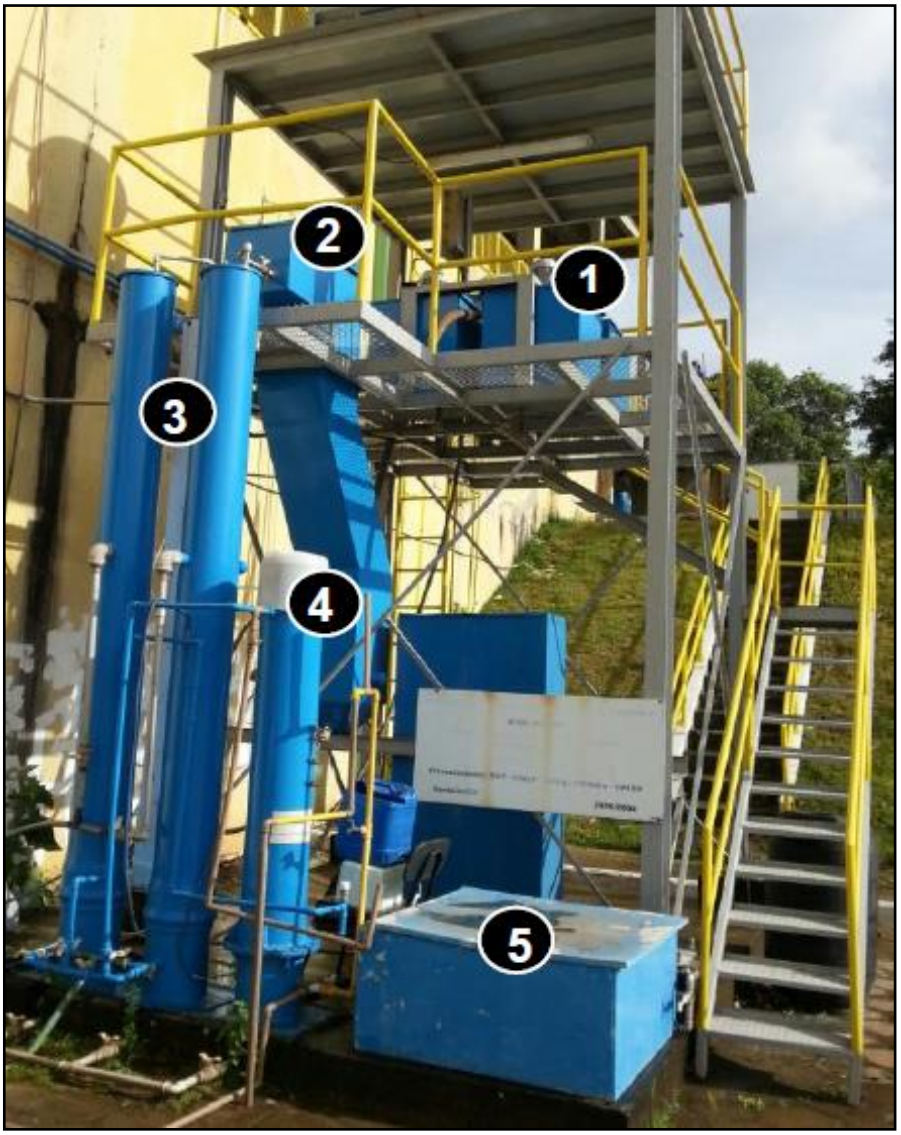

Figura 13 - Foto da Instalação Piloto - 1: Floculadores, 2: Decantador, 3: Filtros Rápidos, 4: Coluna de CAG e 5: Tanque de Contato. Fonte: Brega (2014).

4.1.1.1 Captação e adutora de água bruta

A captação de água bruta acontece por meio de uma tubulação em PVC soldável 25 mm, numa extensão aproximada de 150 metros, alimentada diretamente da caixa de chegada da ETA Carapina. Para medição da vazão da água tem-se um rotâmetro no final da adutora de água bruta.

4.1.1.2 Caixa de entrada e mistura rápida

Após a passagem pelo medidor de vazão - rotâmetro, a água é direcionada a uma caixa de entrada de fibra de vidro equipada com um dispositivo do tipo ressalto, de dimensões 0,60 x 0,40 x 0,40 m (comprimento x largura x altura). Para dosagem do coagulante é utilizada uma bomba peristáltica e sua dispersão feita em sentido contra fluxo.

4.1.1.3 Floculação

Devido às reduzidas dimensões das unidades e também para permitir a variação do Gradiente (G), a unidade de floculação foi projetada com três câmaras mecanizadas com rotação variável, controladas por inversores de frequência eletrônicos. As características da unidade de floculação são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Características da unidade de floculação.

Floculador	
Formato das 03 câmaras	Cúbico
Dimensões de cada câmara (m)	Base: 0,58m; Altura útil: 0,53
Volume útil teórico de cada câmara (m^3)	0,178
Tempo de residência teórico em cada câmara (min)	11
Tempo de residência total (min)	33
Tipo de agitador	Paleta única perpendicular de eixo vertical
Dimensões da paleta (m)	Largura: 0,20; Altura: 0,10
Gradiente/Rotação (s^{-1}/rpm)	Câmara1: 70/78 Câmara2: 30/44,4 Câmara3: 10/21,3

Fonte: Adaptado Brega (2014).

4.1.1.4 Decantação

A unidade de decantação é de alta taxa, com fluxo vertical e dutos formados por placas paralelas inclinadas 60º. As características da unidade de decantação são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Características da unidade de decantação.

Decantador	
Vazão de projeto (m^3h^{-1})	1
Número de decantadores	1
Área superficial do decantador (m^2)	0,18 (0,45m x 0,40 m)
Taxa de escoamento superficial ($m^3.m^{-2}.d^{-1}$)	133
Comprimento de placas paralelas (m)	1,20
Inclinação das placas (°)	60
Espaçamento entre as placas (m)	0,10
Velocidade de escoamento nos dutos ($cm.min^{-1}$)	10,8
Velocidade crítica de sedimentação (V_s) ($cm.min^{-1}$)	1,80

Fonte: Adaptado Brega (2014).

A distribuição de água de entrada no decantador foi realizada por um tubo com três fileiras de furos, totalizando 27 furos. A velocidade de passagem em cada orifício era de $0,145m.s^{-1}$, evitando-se o rompimento dos flocos. O fundo do decantador foi projetado na forma de um tronco de pirâmide para facilitar o escoamento do lodo por ocasião das descargas.

4.1.1.5 Filtração rápida

A unidade de filtração da água decantada foi projetada com dois filtros rápidos de gravidade, taxa constante, fluxo descendente e camada dupla (areia e antracito), confeccionados em tubos de PVC Vinilfer e diâmetro interno de 250mm. Os parâmetros de funcionamento dos filtros são apresentados na Tabela 5 e as características dos leitos filtrantes na Tabela 6.

Tabela 5 - Parâmetros de funcionamento dos filtros rápidos.

Filtros Rápidos	
Vazão nominal (m^3h^{-1})	0,5
Área de orifícios/Área do filtro (m^2)	0,049
Taxa de escoamento superficial ($m^3.m^{-2}.d^{-1}$)	210
Vazão de água de lavagem (Ls^{-1})	0,650
Tempo de lavagem (min)	5
Velocidade da água de lavagem ($m.min^{-1}$)	0,80

Fonte: Adaptado Brega (2014).

Tabela 6 - Características dos leitos filtrantes dos filtros rápidos.

Filtros – Leitos Filtrantes					
Características	**Areia**	**Antracito**	**Camada suporte**		
Altura (cm)	25	55	10	7,5	7,5
Tamanho efetivo (mm)	0,5	0,9			
Coeficiente de uniformidade	1,5	≤1,4	-	-	-
Tamanho mínimo (mm)	0,4	0,71	15	6	3
Tamanho máximo (mm)	1,3	2,0	32	15	6

Fonte: Adaptado Brega (2014).

A lavagem dos filtros se dá a partir de uma tomada de água filtrada na rede da ETA da CESAN. A água encaminhada aos filtros por intermédio de uma tubulação de PVC soldável com diâmetro de 32 mm, por gravidade, e tem sua vazão controlada por um hidrômetro instalado na tubulação de água para lavagem.

A lavagem é realizada por fluxo ascendente, com uma velocidade da água controlada de no máximo 0,8 m/min a fim de se evitar a perda de leito filtrante. O tempo de lavagem, estimado em 8 a 10 minutos, em função do grau de clarificação verificado no efluente de água de lavagem. O recolhimento da água de lavagem é realizado por uma tubulação horizontal perfurada situada a 50 cm acima da superfície do leito filtrante.

4.1.1.6 Tanque de contato

O tanque de contato foi dimensionado com um volume máximo de 0,5 m³ e saída de água com altura variável, permitindo tempos de residência variáveis a partir de 30 minutos.

Conforme projeto, o efluente dos filtros rápidos ou da coluna de CAG é encaminhado ao tanque de contato. A desinfecção é realizada com sistema por gotejamento.

A

Figura **14** apresenta uma visão geral da IP de Carapina, com destaque para todas as unidades descritas anteriormente.

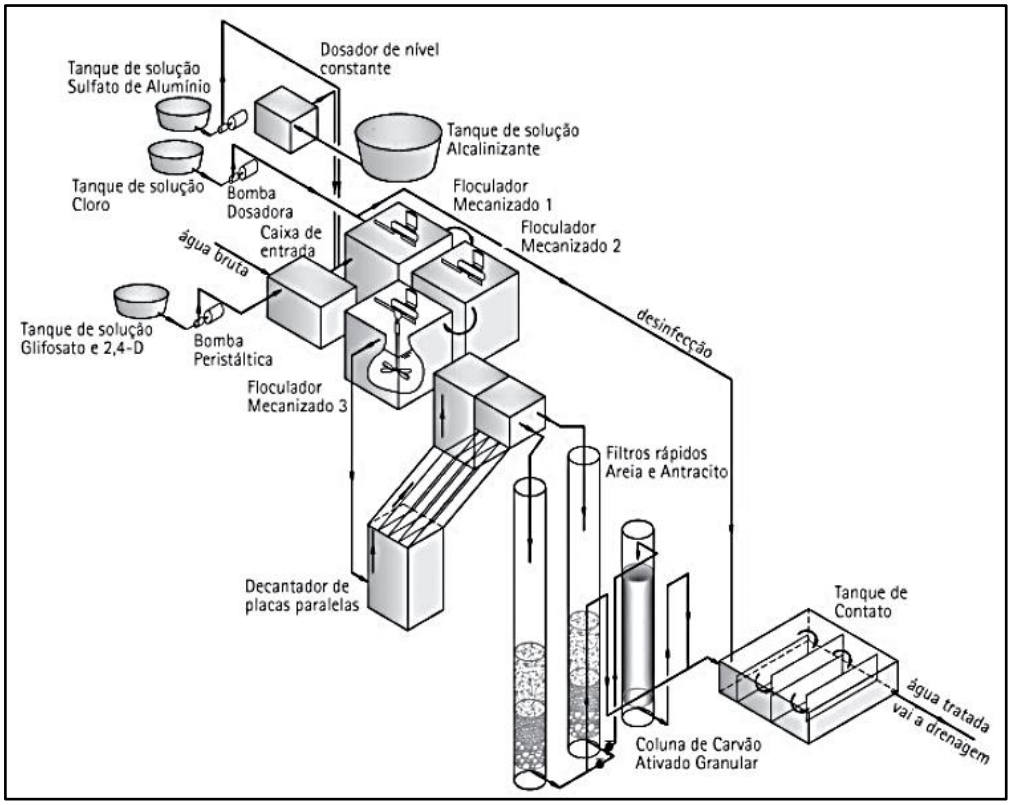

Figura 14 - Vista geral da IP de Carapina - UFES. Fonte: Prosab (2009).

4.2 DESCRIÇÃO DA UNIDADE DE FLOCULAÇÃO

A Unidade de Floculação é constituída por três câmaras mecanizadas de volumes fixos, com agitador de paleta única perpendicular de eixo vertical com rotação variável e controlado por inversores de frequência. Cada câmara possui formato cúbico, com volume útil de 0,178 m³, 0,58 m de base e 0,53 m de altura útil. A paleta que promove a agitação possui largura de 0,2 m e altura de 0,10 m.

A Figura 15 apresenta a unidade de floculação mecanizada da IP.

Figura 15 - Vista superior da Unidade de Floculação. Fonte: do Autor.

O funcionamento da unidade de floculação consiste na entrada da água na parte inferior esquerda da primeira câmara de floculação e da saída para a segunda câmara por meio de uma tubulação inserida na parte superior direita, conforme mostrado na Figura 16. A entrada e a saída da segunda e da terceira câmara são iguais às descritas para a primeira câmara.

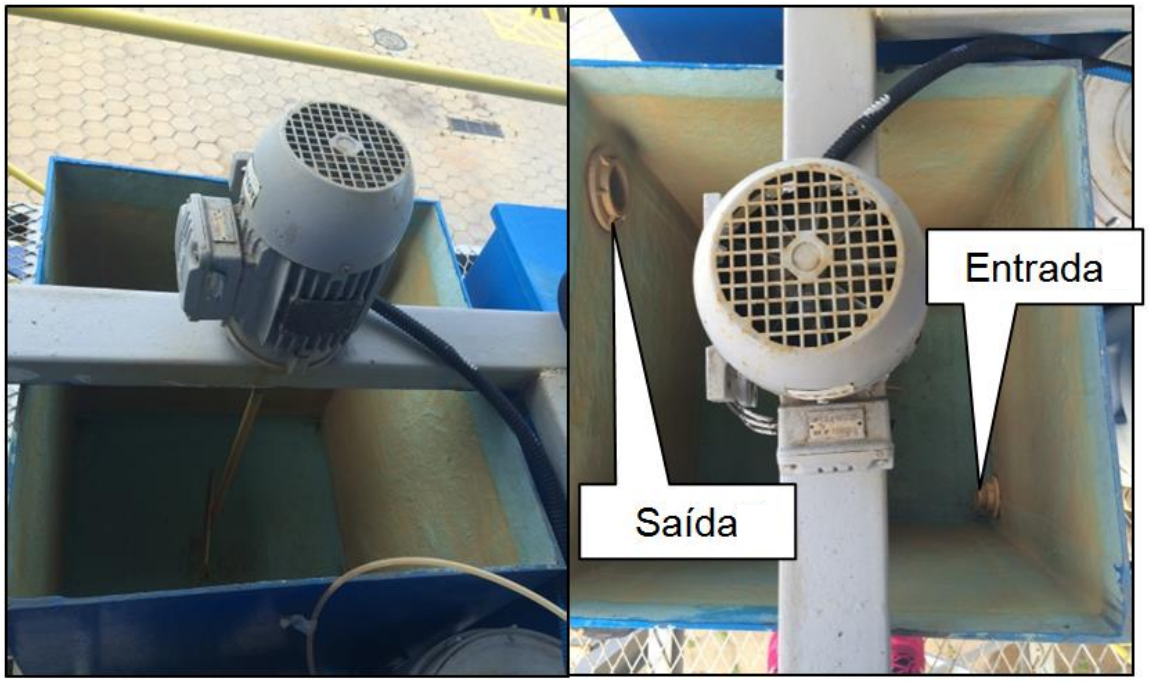

Figura 16 - Vista lateral e superior de uma câmara de floculação. Fonte: do Autor.

4.3 EQUIPAMENTO UTILIZADO NA MEDIDA DO TRAÇADOR

O equipamento utilizado para a medição da condutividade foi o Condutivímetro Microprocessador Portátil mCA 150P da marca MS Tecnopon. O aparelho mostra simultaneamente a condutividade e a temperatura da solução e possui compensação de temperatura automática.

Além disso, o Condutivímetro contém uma saída para computador tipo RS 232C que permite a disponibilidade dos dados on-line.

4.4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.4.1 Gradiente de velocidade adotado e uso dos agitadores

A escolha dos gradientes de velocidade para o estudo dos floculadores foi estabelecida previamente, ficando conforme a NBR 12216 (1992) que preconiza gradiente máximo de 70 s^{-1} e de mínimo 10 s^{-1}, respectivamente.

A rotação adotada e os respectivos gradientes de velocidade para o estudo estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Parâmetros adotados nos testes realizados.

Parâmetros	Câmara 01	Câmara 02	Câmara 03
Sentido do agitador	Anti-horário	Anti-horário	Anti-horário
Rotação (rpm)	74	58	35
Gf(s^{-1})	64,54	47,45	22,95

Fonte: do Autor.

4.4.2 Definição do Traçador

O traçador escolhido para avaliar o comportamento hidrodinâmico da unidade de floculação mecanizada foi o cloreto de sódio (NaCl). A escolha deste traçador foi feita com base na facilidade e segurança de manuseio, baixo custo e alta disponibilidade. Além disso, o NaCl é altamente solúvel em água e estável ao longo do tempo.

O cloreto de sódio utilizado, mas comumente chamado de sal de cozinha, foi o da marca Cisne produzido pela Refinaria Nacional de Sal S.A.

4.4.3 Preparo e injeção da solução de traçador

A metodologia utilizada para determinar a massa do traçador foi baseada no estudo de Souza (2003) que quantificou o traçador utilizando equipamento de “Jar-test”.

Foram utilizadas concentrações crescentes de cloreto de sódio (5, 10, 30, 40, 50 e 75 mg/L) uma para cada um dos 6 jarros do “Jar-test”. As soluções foram preparadas adicionando quantidades de NaCl previamente estabelecidas em água bruta, recolhida da entrada da ETA V da CESAN em Carapina, no “Jar-test”, conforme Figura 17.

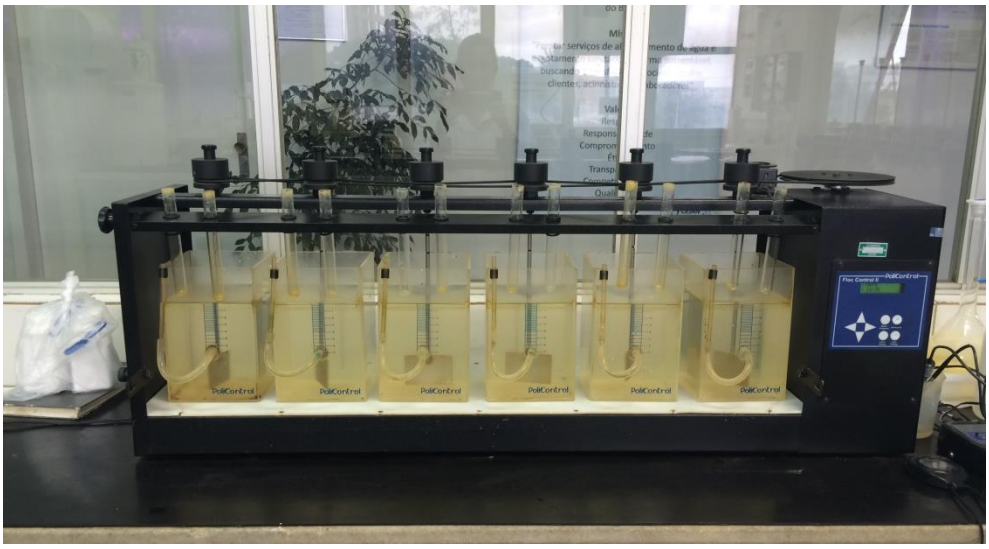

Figura 17 - Mistura água bruta e NaCl no “Jar-test”. Fonte: do Autor.

Posteriormente, as soluções foram mantidas sob agitação por 5 minutos, na rotação de 70 rpm para promover a completa solubilização do NaCl. Após esse período, com a rotação desligada, foi realizada a leitura da condutividade e da temperatura em todos os jarros. A condutividade da água foi medida com condutivímetro digital.

A concentração do traçador escolhida foi a que gerou um valor de condutividade expressiva com relação à condutividade da água bruta, ou seja, escolheu-se o valor da concentração que apresentou uma diferença perceptível e facilmente mensurável entre a condutividade inicial da água bruta (sem adição de qualquer produto químico) e a condutividade final com a adição do cloreto de sódio.

4.4.4 Ensaios Hidrodinâmicos

Primeiramente, foi feita a alimentação da Instalação Piloto até que o sistema entrasse em regime permanente. Em seguida, injetou-se o traçador na entrada da primeira câmara de floculação, fazendo-se uso da técnica de estímulo e resposta. A injeção do volume de traçador foi realizada através de um funil alocado na parte superior de uma tubulação de aproximadamente 1 cm de diâmetro e 60 cm de altura. O tempo de injeção utilizado foi de 15 segundos para todos os ensaios, pois, o mesmo necessita ser inferior a 3% do tempo teórico de residência para ser considerado do tipo pulso (DI BERNARDO; DANTAS, 2005).

Imediatamente após a injeção do traçador, iniciaram-se as leituras da condutividade elétrica na saída da última câmara da unidade de floculação por meio de sonda de condutividade. As leituras foram realizadas em intervalos regulares de tempo de 1 minuto, prolongando-se por até aproximadamente três vezes o tempo teórico de residência, a fim de assegurar a saída de toda massa do traçador injetada.

Para o estudo em questão foram feitos três ensaios com traçadores, a fim de verificar a representatividade dos dados gerados.

Vale ressaltar que a água bruta utilizada foi a mesma captada pela ETA Carapina para o abastecimento público de diversos bairros da Região da Grande Vitória. A ETA Carapina é abastecida pelas águas do rio Santa Maria da Vitória, cuja bacia hidrográfica situa-se na região central do estado do Espírito Santo.

4.5 AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO HIDRODINÂMICO

A Avaliação do Comportamento Hidrodinâmico foi realizada de acordo com a metodologia proposta por Levenspiel (2000). As curvas experimentais de concentração *versus* tempo foram normalizadas, obtendo-se as curvas de distribuição dos tempos de residência adimensional (E_θ) em função do tempo adimensional (θ).

A normalização da curva de passagem é necessária para comparar os ensaios realizados e extrair os indicadores empregados na determinação da intensidade de curto-circuito e no grau de mistura.

Todos os dados foram processados com o auxílio do Microsoft Excel 2010.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 DEFINIÇÃO DA MASSA DO TRAÇADOR

O valor de condutividade da água bruta medido antes da adição de NaCl foi de 59,32 µS/cm. Os dados de entrada (concentração de traçador usado) e os dados de saída (condutividade) dos testes feitos com o traçador no “Jar-Test”, são apresentados na Tabela 8, abaixo, com esses dados elaborou-se a curva de condutividade versus concentração, conforme apresentado na Figura 18.

Tabela 8 - Dados de entrada e saída dos testes feitos com o traçador no "Jar-Test", para determinação da Curva de calibração do traçador.

Concentração de NaCl adicionada (mg/L)	Condutividade (µS/cm)
0	59,32
5	72,58
10	79,79
30	113,10
40	127,30
50	153,00
75	183,60

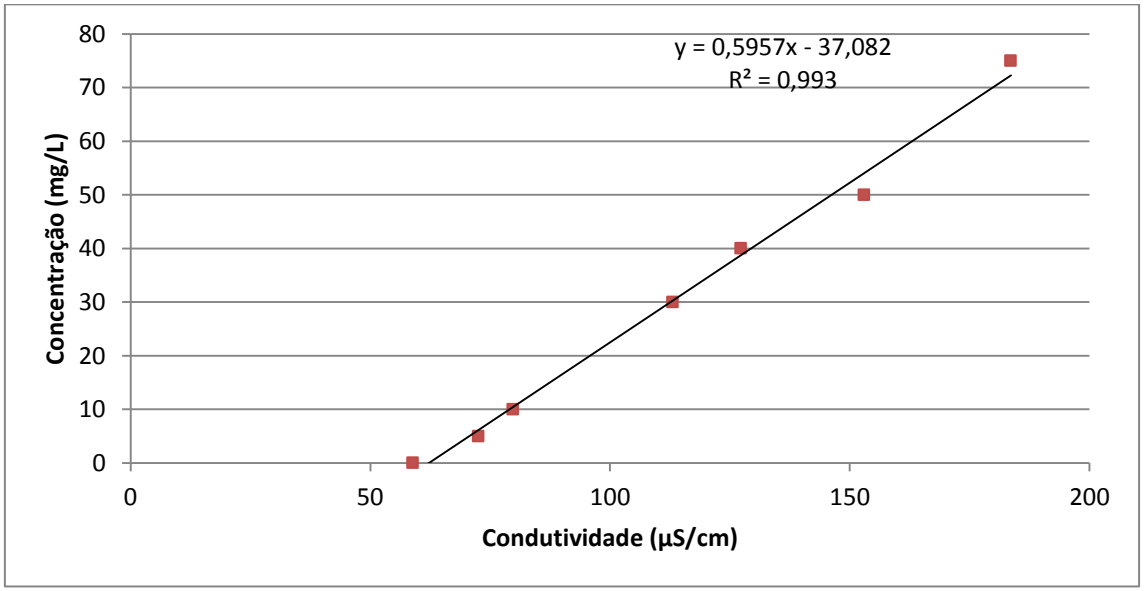

Figura 18 - Curva de calibração, condutividade *versus* concentração.

Com base nesses resultados escolheu-se a concentração de 40mg/L para confecção da solução do traçador. Conforme descrito anteriormente, essa escolha

se deu em função o valor da concentração que apresentou uma diferença nítida e de fácil determinação entre a condutividade inicial da água bruta (sem adição de qualquer produto químico) e a condutividade final com a adição do cloreto de sódio. Além disso, a escolha se deu prezando pelo uso de uma quantidade significativa de traçador, garantindo a solubilização do NaCl na água bruta.

A fim de assegurar sensibilidade no teste relacionou-se a concentração obtida no "Jar-test" com o volume total da unidade de floculação, 534 l, obtendo uma massa aproximada de 22 g para a solução do traçador. Sendo assim, preparou-se uma solução de 22 g de NaCl em 220 ml de água bruta.

5.2 AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO HIDRODINÂMICO

5.2.1 Análise da Curva de Passagem

Para a obtenção da Curva DTR foram utilizados ensaios de estímulo e resposta seguindo a metodologia proposta por Levenspiel (2000).

As Curvas de Condutividade em função do tempo para Unidade de Floculação obtidas nos Ensaios 1, 2 e 3 (Figura 19) são apresentadas a seguir.

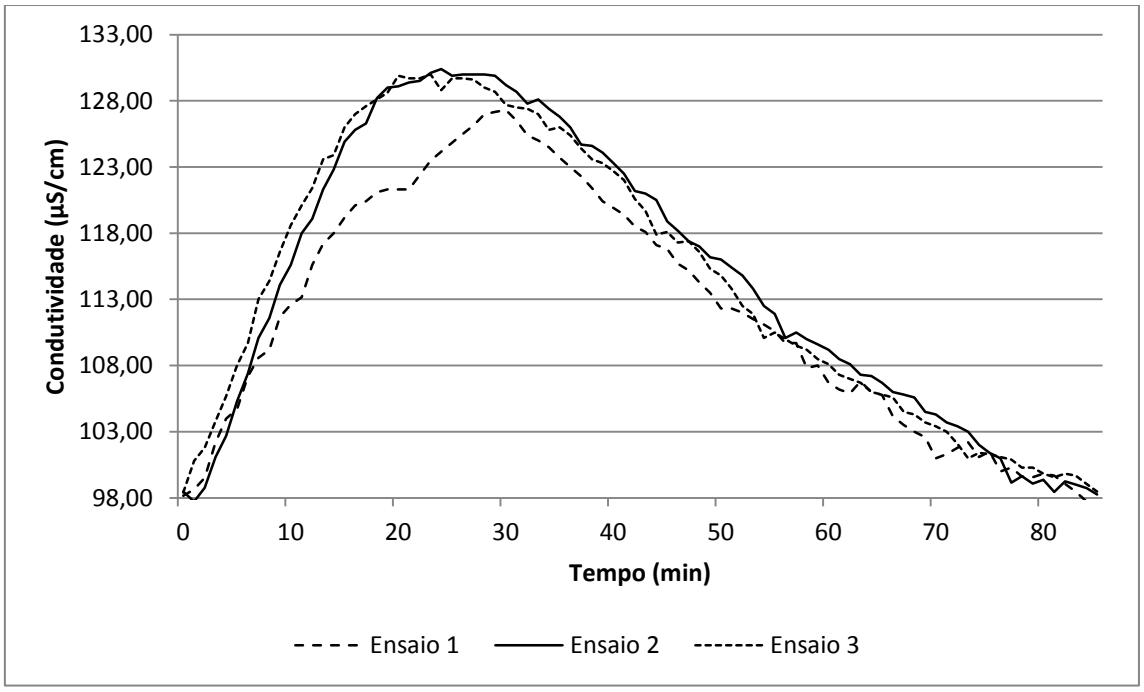

Figura 19 - Curvas de Condutividade em função do tempo, referente aos ensaios 1, 2 e 3.

Os ensaios têm como resposta inicial um gráfico de condutividade em função do tempo. Com base na equação gerada na Curva de Condutividade *versus* Concentração (Figura 18), traçaram-se as Curvas DTR para cada ensaio.

O valor da condutividade que aparece no condutivímetro corresponde à condutividade total da amostra, ou seja, a soma da condutividade do traçador mais a condutividade natural da água bruta (normalmente nomeada como "background"). Esta condutividade natural em geral é proveniente de sólidos dissolvidos que existem na água bruta.

Na realização dos ensaios na IP, verificou-se que o background da água bruta *in loco* estava mais elevado do que nos ensaio realizados no "Jar-Test". No entanto, o background medido antes e depois da realização dos experimentos foi igual, assegurando que o mesmo não variou durante o período de medição.

As curvas experimentais da variação de concentração dos traçadores ao longo do tempo, C(t), foram normalizadas (área sobre a curva igual a 1) de acordo com Levenspiel (2000). Nas curvas de distribuição dos tempos de residência (DTR) apresentadas a seguir (Figura 20), tem-se no eixo das ordenadas o parâmetro E_θ que representa a distribuição de saída da concentração adimensional e no eixo das abscissas o parâmetro θ que representa o tempo adimensional.

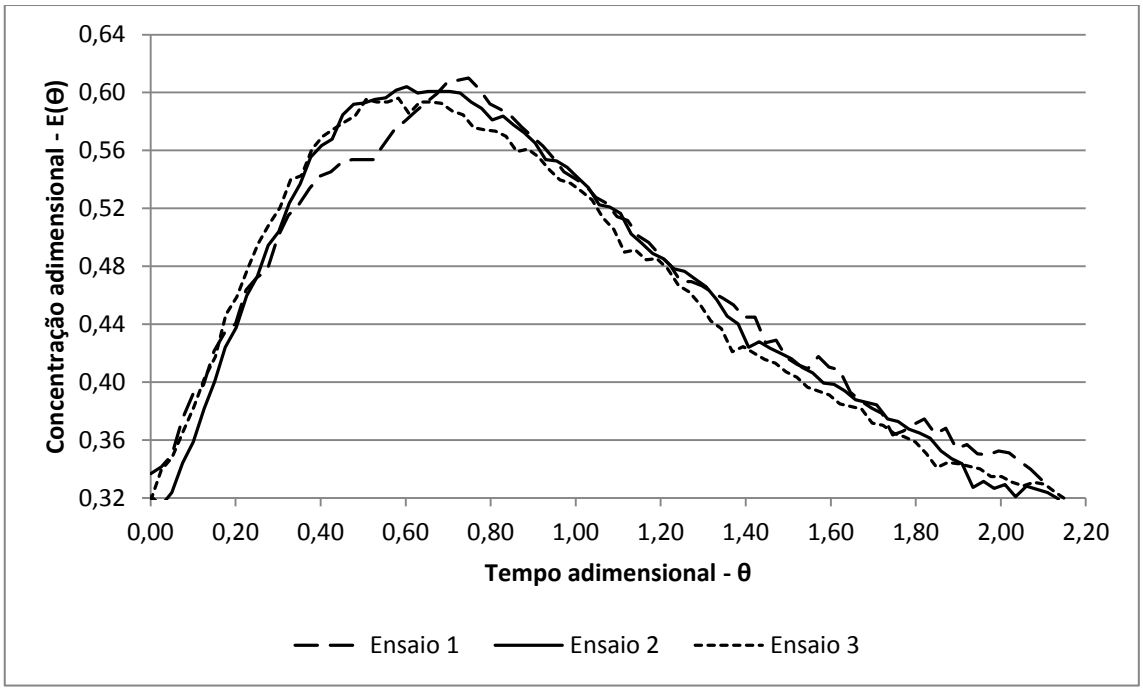

Figura 20 - Curvas de passagem adimensionalizada.

Analisando as curvas DRT normalizadas obtidas nos ensaios, verifica-se a similaridade entre os comportamentos hidrodinâmicos registrados em cada um dos ensaios realizados. Além disso, observam-se oscilações nas curvas de passagem dos três ensaios, podendo ser resultado da presença de caminhos preferenciais, e/ou zonas mortas e/ou áreas de recirculação.

A análise das curvas DRT também permitiu inferir que as câmaras de floculação apresentaram um comportamento entre os regimes de escoamento pistão e mistura completa, condizente com o que era esperado, tendo em vista que, segundo Levenspiel (2000) o grau de mistura, no reator, é caracterizado pelo número de tanques. Então, quanto maior o número de câmaras de floculação mais baixo é o grau de mistura e, no caso limite de um número de tanques infinito, prevalece o escoamento pistonado.

A recuperação da massa do traçador foi feita utilizando a Equação 7. A massa recuperada foi próxima de 70% para todos os ensaios, podendo conferir uma relativa confiabilidade aos resultados, pois para bom comportamento por parte do traçador no interior do tanque são necessárias taxas de recuperação superiores a 85% (TEIXEIRA *at al*, 2000).

Na Figura 21 apresentam-se as curvas de passagem acumuladas que permitiram inferir valores de parâmetros como, por exemplo, t_{10}, e t_{90}.

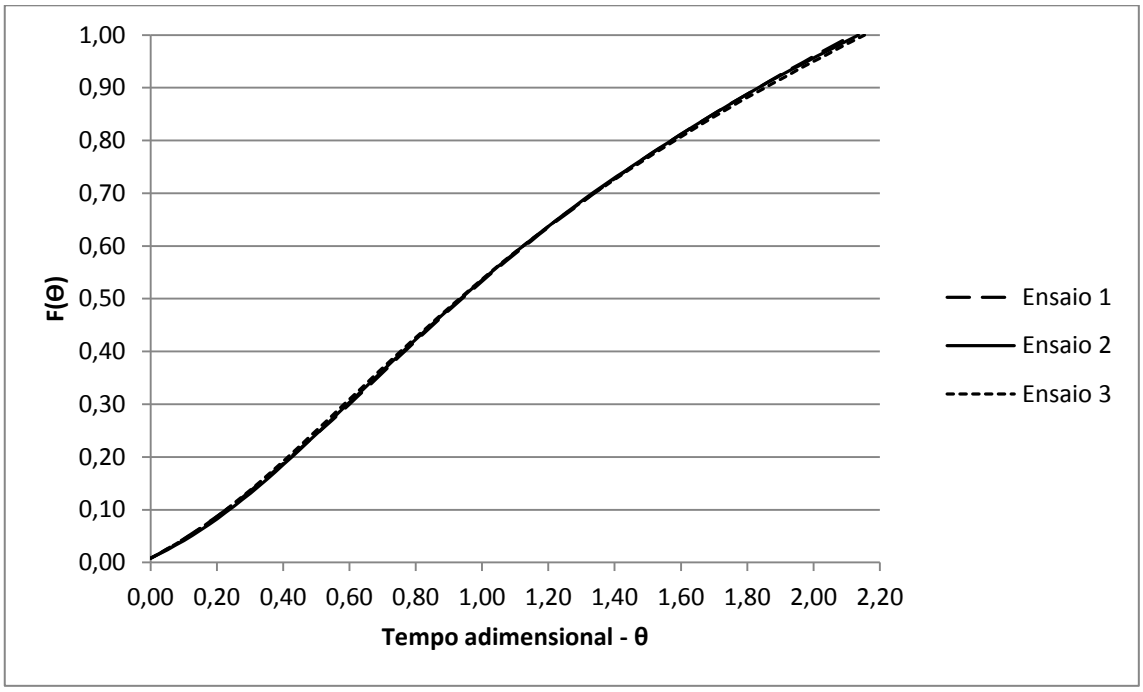

Figura 21 - Curvas de passagem acumuladas.

5.2.2 Comparação do tempo de residência teórico com o real

Com base nos valores de concentração em função do tempo e na Equação (8), apresentada no item 3.3.4.1, foi possível determinar o tempo de residência para cada ensaio realizado, apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Resultados: tempo de residência para os ensaios 1, 2 e 3.

Ensaio	Tempo de residência calculado (minutos)	Tempo de residência médio calculado (minutos)	Tempo de residência teórico (minutos)
1	39,46	39,78	32
2	40,09		
3	39,81		

Observa-se que o valor do tempo de residência médio calculado foi superior ao tempo de residência teórico de 32 minutos. Estes resultados evidenciam um atraso na resposta do traçador, que pode indicar a existência de zonas com recirculação interna ou zonas mortas.

5.3 DETERMINAÇÃO DOS INDICADORES DE EFICIÊNCIA HIDRÁULICA

Os indicadores de Eficiência Hidráulica utilizados para determinar o grau de mistura foram σ_θ^2 e M_o e para os níveis de curto-circuito foram t_i e t_{10}, baseados na metodologia apresentada por Siqueira (1999). A ocorrência de zonas mortas foi analisada segundo o trabalho desenvolvido por Cestari (2011).

5.3.1 Indicadores de Mistura

Os valores dos indicadores de mistura σ_θ^2 e M_o obtidos nos ensaios são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Valores encontrados para os indicadores de mistura.

Indicadores	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Média
σ_θ^2	0,38	0,31	0,32	0,34
M_o	8,41	7,63	8,04	8,03

O índice de dispersão (σ_θ^2) é um indicador de grande confiabilidade estatística, sendo considerado por alguns autores o mais completo e acurado entre os existentes na literatura para a avaliação do grau de mistura, pois relaciona toda a curva de passagem e não apenas a alguns pontos desta (SIQUEIRA, 1999).

O índice de Morril (M_o) também é muito recomendado para a avaliação do grau de mistura, por apresentar uma boa correlação com (σ_θ^2). No entanto a presença de zonas mortas influencia no valor desse indicador, pelo fato do t_{90} estar localizado no final da curva de passagem. Além disso, os níveis de curto-circuito também afetam o valor do índice, uma vez que a definição do M_o envolve o valor de t_{10}.

Os valores encontrados para o índice de dispersão (σ_θ^2) nos ensaios 1, 2 e 3 foram 0,38, 0,31 e 0,32, respectivamente. O valor médio de σ_θ^2 foi 0,34. E os valores encontrados para o Índice de Morril (M_o) nos ensaios 1, 2 e 3 foram 8,41, 7,63 e 8,04 respectivamente. O valor médio de M_o foi 8,03.

Em relação ao índice de mistura (σ_θ^2) ao comparar o valor médio encontrado na realização do estudo com o valor calculado pela Equação 18 ($^1/_3 = 0{,}33$), observa-se que o grau de mistura encontrado está de acordo com o esperado por Levenspiel (2000) evidenciando que os ensaios realizados apresentaram um bom resultado.

Quanto ao índice M_o, ao relacionar o valor médio calculado com os valores referentes aos escoamentos ideais (Tabela 1), verifica-se que este indicador apresentou valor menor de mistura quando comparado com o escoamento ideal do tipo mistura completa e valor maior quando comparado com o escoamento ideal do tipo pistão. Tendo em vista que o reator em estudo é formado por 3 câmaras em série, o resultado encontrado condiz com o estudo de câmaras em série exposto por Levenspiel (2000), que afirma que o aumento no número de câmaras de floculação diminui o grau de mistura.

Destaca-se que de forma individual o esperado é que cada câmara apresente um escoamento mais aproximado da mistura completa, principalmente a primeira câmara, que não sofre influências da hidrodinâmica das demais. No entanto a metodologia aplicada neste estudo não avaliou as câmaras do reator de forma individual. Sendo essa inclusive uma das sugestões para trabalhos futuros.

5.3.2 Indicadores de Curto-Circuito

Os valores dos indicadores de curto-circuito t_i, t_p t_{10} obtidos nos ensaios são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 - Valores encontrados para os indicadores de curto-circuito.

Indicadores	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Média
t_i	0	0	0	0
t_p	0,75	0,60	0,58	0,64
t_{10}	0,20	0,24	0,23	0,22

O fenômeno de curto-circuito está relacionado com advecção do fluido no interior da unidade, obrigando parte do fluido a sair da unidade, via caminhos preferenciais, mais cedo do que o tempo de detenção teórico.

Dos indicadores utilizados para avaliar os níveis de curto-circuito, o t_i é o indicador que melhor caracteriza o curto-circuito. Entretanto, por se tratar de um único ponto da curva está sujeito a erros experimentais, principalmente quando o monitoramento não é feito de forma automatizada, apresentando uma baixa reprodutibilidade estatística (SIQUEIRA, 1998).

Assim como t_i, o indicador t_p trata-se de um único ponto da curva de passagem do traçador, apresentando uma alta variabilidade estatística. Além disso, esse indicador é bom para situações com altos índices de curto-circuito, por resultar em valores relativamente não muito maiores que t_i. Para baixos níveis de curto-circuito o t_p é influenciado por outros fenômenos que não predominantemente a advecção (SIQUEIRA, 1998).

Em contrapartida, o índice t_{10} atende todos os requisitos esperados para um bom indicador de curto-circuito, tem um comportamento condizente com o fenômeno físico e está diretamente relacionado com o período inicial de chegada do traçador na saída da unidade, possuindo reprodutibilidade estatística superior ao t_i (SIQUEIRA, 1998).

Dessa maneira, para avaliar os níveis de curto-circuito na unidade de floculação mecanizada foram considerados apenas os valores obtidos para t_{10}. Os valores encontrados para este indicador nos ensaios 1, 2 e 3 foram 0,75, 0,60 e 0,58, respectivamente. O valor médio de t_{10} foi 0,64.

Avaliando o valor médio desse indicador, verifica-se que houve uma homogeneidade dos resultados para os três ensaios, provando um padrão no comportamento do escoamento que ocorre no reator em estudo.

Além disso, observa-se que o valor de t_{10} encontrado na realização do presente trabalho é maior que o valor desse indicador para o escoamento ideal do tipo mistura completa (Tabela 1), evidenciando que houve diminuição dos níveis de curto-circuito quando há 3 câmaras em série. Este fato é comprovado por Parlatore (1974) que verificou que a compartimentação de unidades de floculação diminui os níveis de curto-circuito.

Vale destacar que o desvio que mais afeta negativamente o tratamento da água na etapa da floculação é a presença de curtos-circuitos, pois esses fazem com que os flocos permaneçam no reator por um tempo menor do que o previsto na fase de projeto, com a formação de flocos menos densos, prejudicando os processos subsequentes. Conforme apontado Oliveira (2005), para a correção deste problema, geralmente é aumentada a dosagem de coagulante, o que acarreta num acréscimo no custo do tratamento de água.

5.3.3 Indicador de Zona Morta

Um bom parâmetro para avaliar os níveis de zonas mortas relaciona o tempo de residência médio (t_m) e o tempo de residência teórico (T), ou seja, o tempo de residência médio adimensional.

A Tabela 12 apresenta o tempo de residência médio adimensional para os ensaios 1, 2 e 3.

Tabela 12 - Tempo de residência médio adimensional para os ensaios 1, 2 e 3.

Ensaio	Tempo de residência médio adimensional
1	1,23
2	1,25
3	1,24

Quando o t_m é maior que o T demonstra um atraso na resposta do traçador, o que pode indicar a existência de zonas mortas. Nesta situação o traçador é liberado aos poucos, o que provoca atraso em sua resposta na saída do reator.

A ocorrência de regiões de zonas mortas é prejudicial ao tratamento de água na etapa da floculação, pois faz com que os flocos permaneçam na unidade por um tempo maior do o previsto na fase de projeto, podendo gerar sedimentação dos flocos na câmara de floculação.

Além disso, para Levenspiel (2000) a relação t_m/T é maior que 1 (um) quando ocorre erro na medição da vazão, ou erro no volume disponível do reator, ou o traçador não é um material inerte.

Para o presente estudo, os possíveis erros podem estar relacionados à diferença de densidade entre a solução de traçador e a água da rede, à vazão e à variação de temperatura da água da rede ao longo do dia.

A diferença de densidade entre a solução do traçador e a água bruta do reator pode ter sido gerada pela diferença de temperatura da solução e da água bruta.

Além disso, ainda se tratando de temperatura, a variação da temperatura da água do reator, ao longo do desenvolvimento do experimento, poderia ter influenciado na medição da sonda. Entretanto esse problema foi descartado tendo em vista que o equipamento de medição da condutividade utilizado monitora a temperatura e faz a correção automática dos valores aferidos e os ensaios eram realizados em curto espaço de tempo, com duração máxima de 85 minutos.

Por fim, tratando-se da vazão, o não monitoramento desse parâmetro ao longo do desenvolvimento dos ensaios, e o desconhecimento quanta à sensibilidade do equipamento de controle da entrada da vazão, pode ter afetado o tempo de residência médio.

6 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

Os ensaios realizados permitiram obter as curvas de passagem na seção de saída do floculador mecanizado. Através dessas curvas, foi possível determinar os indicadores de eficiência hidráulica e avaliar o comportamento hidrodinâmico da unidade de floculação mecanizada.

Através da análise da curva de passagem adimensionalizada (concentração adimensional versus tempo adimensional) constata-se que a unidade de floculação mecanizada em questão apresenta escoamento entre os regimes ideais de mistura completa e pistão, aproximando-se do regime de mistura completa, regime este esperado para floculadores mecanizados com mais uma câmara de mistura completa em série.

Em análise aos indicadores de mistura estudados foi possível concluir que o nível de mistura no interior da unidade de floculação está em conformidade com o esperado para tanques de mistura completa em série. Uma vez que para uma única câmara de floculação o escoamento seria mais próximo do escoamento mistura completa e à medida que o número de tanques em série aumenta, a variância decresce, ou seja, os níveis de mistura diminuem.

Foi possível avaliar também os níveis de curto-circuito com base nos valores encontrados para este indicador, podendo concluir que para três câmaras de mistura em série os níveis de curto circuito encontrados foram menores que quando comparados com o valor desse índice para o escoamento ideal mistura completa.

A partir dos resultados obtidos para a avaliação do comportamento hidrodinâmico da unidade de floculação mecanizada da Instalação Piloto, pode-se concluir que esta apresenta condições satisfatórias de operação. O bom funcionamento da floculação no tratamento de água é importante, pois o mal funcionamento pode tornar o processo de potabilidade da água antieconômico.

Para a reprodução de ensaios com a metodologia proposta neste trabalho, recomenda-se:

- Controle preciso da vazão de entrada de água bruta na Instalação Piloto;
- Atenção para a escolha do ponto de inserção da sonda, para que durante a coleta de dados a sonda não sofra a influência da hidrodinâmica do reator no qual a mesma está inserida;

- Determinação precisa das condições da água bruta.
- Injeção do traçador na tubulação que está chegando.

Quanto a estudos complementares, recomendam-se:

- Construção da curva de passagem para cada câmara de floculação, a fim de conhecer a hidrodinâmica de cada câmara do reator de forma individual;
- Variação dos gradientes de velocidade das câmaras; e
- Avaliar o sentido de rotação das paletas de cada câmara.
- Avaliar a eficiência do tratamento de água.

7 REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR:12216: **Projetos de Estação de Tratamento de Água para Abastecimento Público**. Rio de Janeiro: ABNT. 1992.

BHOLE, A. G. **Performance of static flocculators**. Water Science and Technology, v. 27, n. 10, p. 181-194, 1993.

BRASIL, Fundação Nacional de Saúde**. Manual de Saneamento**. 4 ed. rev. 408p. Brasília: Fundação Nacional de Saúde, 2006.

BRASIL, Ministério da Saúde. Portaria n.º 2914, de 12 de Dezembro de 2011. **Dispõe sobre normas de potabilidade de água para o consumo humano**. Brasília: SVS, 2011.

BREGA, R. S. **Remoção do herbicida 2,4-D por meio de tratamento convencional da água e adsorção em carvão ativado granular em instalação piloto.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2014.

BOTERO, W. G. **Caracterização de Lodo Gerado em Estações de Tratamento de Água: Perspectivas de Aplicação Agrícola**. Quim. Nova, v. 32, No. 8, p. 2018-2022, 2009.

CALIJURI, M.C.; CUNHA, D.G.F. **Engenharia Ambiental: conceitos, tecnologia e gestão**. Rio de Janeiro, RJ: Elsevier. 2013.

CASTRO, F. M. S. **Estudo do Comportamento Hidrodinâmico de uma Nova Proposta de Configuração Interna para Reatores UASB.** Dissertação (Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2010.

CESTARI, J. L. **Estudo hidrodinâmico de floculadores mecanizados aplicados ao tratamento de água**. 2011. 78 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira. 2011.

CHEREMISINOFF, N. P. **Handbook of Water and Wastewater Treatment Technologies.** 1º Edição. Boston: Butterworth-Heinemann, 576p, 2002.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A.D. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. 2 ed. São Carlos: Rima. v. 1 e 2. 2005.

DI BERNARDO, L. Métodos e Técnicas de tratamento de Água – v. 1. ABES - Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. Rio de Janeiro, Brasil, 1993.

DI BERNARDO, L.; DI BERNARDO, A.; PÁDUA, V.L. **Redução do tempo de floculação em função do escalonamento do gradiente de velocidade**. ANAIS. XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental. p.1-10, 2001.

Disponível em:<http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/tratagua/ii-020.pdf>. Acessado em 19 de maio de 2015.

FOGLER, H. S. **Elementos de Engenharia das Reações Químicas**, 3a edição, LTC Editora, Rio de Janeiro, 2002.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico**. Rio de Janeiro: IBGE, 2008. 219 p.

LEVENSPIEL, O. **Engenharia das Reações Químicas**. 3. ed. São Paulo. Editora Blücher, 2000.

LEVENSPIEL, O. **Engenharia das Reações Químicas: Cinética Química Aplicada**. Vol. 1. São Paulo: Edgard Blucher, 1974[1].

LEVENSPIEL, O. **Engenharia das Reações Químicas: Cálculo de Reatores**. Vol. 2. São Paulo: Edgard Blucher, 1974[2].

LIBÂNIO, M. **Fundamentos da qualidade e tratamento de água**. São Paulo: Editora Átomo, 2005.

OLIVEIRA, D. S.; VALENTIM, E. C.; SIQUEIRA, R. N.; TEIXEIRA, E. C. **Influência das variações de vazão na eficiência hidráulica de floculadores chicanados**. 23° Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Campo Grande/MS, 2005.

PARLATORE, A. C. Mistura e floculação. In: Companhia Estadual de Tecnologia de Saneamento Básico e de Controle da Poluição das Águas. **Técnicas de abastecimento e tratamento de água**. v 2. São Paulo, 1974.

PELISSARI, L. M. T. **Influência de parâmetros de projeto no desempenho do Floculador Tubular Helicoidal aplicado ao tratamento de água de abastecimento.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2006.

PROSAB - Programa de Pesquisa em Saneamento Básico. **Remoção de microorganismos emergentes e microcontaminantes orgânicos no tratamento de água para consumo humano**. 392p. Rio de Janeiro: ABES, 2009.

RIBEIRO, M. C. M. **Nova Portaria de Potabilidade de Água: Busca de consenso para viabilizar a melhoria da qualidade de água potável distribuída no Brasil**. Revista DAE Nº 189 – Maio/Agosto, 2012. Disponível em<http://revistadae.com.br/downloads/Revista_DAE_Edicao_189.pdf>. Acessado em 06 de maio de 2015.

SIQUEIRA, R. N. **Desenvolvimento e aperfeiçoamento de critérios de avaliação da eficiência hidráulica e do cálculo do coeficiente de mistura em unidade de tratamento de água e efluentes**. 1998. 126 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 1998.

SIQUEIRA, R. N.; TEIXEIRA, E. C. **Avaliação de diversos indicadores de eficiência hidráulica como ferramenta para a análise do desempenho de UTAE**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 20, 1999 Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 1999.

SOUZA, L. C. A. **Aumento da capacidade da Estação de Tratamento de Água nº 2 de Valinhos-SP, utilizando polímero natural como auxiliar de floculação.** São Carlos, 253p. Dissertação de Mestrado — Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2003.

TEIXEIRA, E. C. **Hydrodynamic Processes and Hidraulic Efficiency of Chlorine Contact Units.** Tese (Ph.D) – Department of Civil Engineering, University of Bradford, England, 1993.

TEIXEIRA, E. C.; ANDRADE M. W M.; RAUEN, W. B.; MACHADO, C. M. **Estudo da influência da hidrodinâmica de um clarificador na remoção química de cianetos de efluentes de coqueria** . In: XXVII AIDIS, 2000, Porto Alegre. XXVII AIDIS, 2000.

TOSCANI, D. C. **Avaliação e Aplicação de Simulações Matemáticas para Definição de Regime Hidráulico e Constantes Cinéticas de Remoção de Matéria Orgânica em Reatores de Tratamento de Esgoto Sanitário**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental). Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2010.

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