



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL
CURSO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL**

CARLA ISONEIDE ARAUJO DA SILVA

**SIMULAÇÃO DO COMPORTAMENTO HIDRODINÂMICO DA CÂMARA DE
CONTATO DE DESINFETANTE DO SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA
DA CIDADE DE CAMPINA GRANDE-PB**

CAMPINA GRANDE – PB

2018

CARLA ISONEIDE ARAUJO DA SILVA

**SIMULAÇÃO DO COMPORTAMENTO HIDRODINÂMICO DA CÂMARA DE
CONTATO DE DESINFETANTE DO SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA
DA CIDADE DE CAMPINA GRANDE-PB**

Monografia apresentada como Trabalho de Conclusão de Curso (TCC), à Coordenação de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Estadual da Paraíba como exigência para obtenção do título de Engenheiro Sanitarista e Ambiental.

Orientadora: Prof.(a) Dra. Ruth Silveira do Nascimento

CAMPINA GRANDE – PB

2018

É expressamente proibido a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano do trabalho.

S586s Silva, Carla Isonide Araujo da.
Simulação do Comportamento Hidrodinâmico da câmara de contato do desinfetante do sistema de abastecimento de água da cidade de Campina Grande - PB [manuscrito] / Carla Isonide Araujo da Silva. - 2018.
51 p. : il. colorido.
Digitado.
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 2018.
"Orientação : Profa. Dra. Ruth Silveira do Nascimento, Coordenação do Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental - CCT."
1. Simulação numérica. 2. Desinfecção. 3. Sistema de abastecimento. 4. Saneamento. I. Título
21. ed. CDD 628.32

CARLA ISONEIDE ARAUJO DA SILVA

SIMULAÇÃO DO COMPORTAMENTO HIDRODINÂMICO DA CÂMARA DE
CONTATO DE DESINFETANTE DO SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA
DA CIDADE DE CAMPINA GRANDE-PB

Monografia apresentada como Trabalho de
Conclusão de Curso (TCC), à
Coordenação de Engenharia Sanitária e
Ambiental da Universidade Estadual da
Paraíba como exigência para obtenção do
título de Engenheiro Sanitarista e
Ambiental.

Aprovada em: 05/12/2018.

BANCA EXAMINADORA



Prof.(a) Dra. Ruth Silveira do Nascimento /UEPB
Orientador(a)



Prof. Dr. Fernando Fernandes Vieira/UEPB
Examinador



Prof.(a) Ms. Morgana de Vasconcelos Araújo/UFCEG
Examinador(a)

AGRADECIMENTOS

À Deus pela oportunidade de ter chegado até aqui, com saúde e sabedoria para suportar os momentos difíceis.

Ao meu esposo Wilder pela dedicação, apoio, suporte, paciência e companheirismo ao longo desses 8 anos de relacionamento e por ter me dado o melhor presente da vida que é o nosso filho, José Bento.

À minha mãe, que nunca mediu esforços para que eu pudesse estudar e realizar meu sonho de me formar engenheira.

Aos meus queridos professores Celeide Maria Belmont Sabino Meira, Ruth Silveira do Nascimento e Rui de Oliveira, pela oportunidade e pelo acolhimento com que me receberam na minha chegada à UEPB.

Aos demais professores que contribuíram para o meu desenvolvimento e aprendizado, em especial professor Fernando Fernandes Vieira pela excelência ao exercer sua profissão e prontidão no atendimento sempre que necessário.

Aos colegas e amigos que tornaram essa jornada mais leve com momentos de descontração e muitas risadas.

Por fim, a todos que direta ou indiretamente contribuíram para essa tão sonhada conquista.

Muito Obrigada!

RESUMO

Apesar dos avanços tecnológicos no tratamento de água, ainda pode ser observada a persistência de alguns pontos frágeis no processo de tratamento. É a desinfecção, que tem como objetivo garantir a qualidade microbiológica da água fornecida aos usuários do sistema. Um dos processos essenciais nessa etapa é a aplicação do desinfetante cloro no tanque de contato (TC), onde ocorre o processo de desinfecção através do contato do cloro com água. No presente trabalho foi avaliado o comportamento hidrodinâmico de uma câmara de contato de desinfecção na Estação de Tratamento de Água de Gravatá – Queimadas/PB. Foram analisados os campos e os perfis de velocidade, campo vetorial, traçadas as curvas de Distribuição de Tempo de Residência (DTR) e analisados os indicadores de eficiência hidráulica do tanque de contato. As equações de conservação da massa e da quantidade de movimento foram resolvidas numericamente usando o software OpenFOAM com o auxílio da geometria e da malha que foram construídas com o apoio do software SALOME. Foi utilizado o solver pisoFoam para o cálculo dos perfis de velocidade e o scalarTransportFoam para a simulação das curvas DTR. O tanque de contato apresentou ocorrência de curtos-circuitos e zonas mortas que afetam o processo de desinfecção. O tempo de detenção teórico calculado foi de 2,64 minutos e o resultado obtido na simulação foi de 2,43 minutos, essa diferença foi provocada pela presença dos curtos-circuitos no tanque.

Palavras-chave: Simulação Numérica, CFD, Tanque de Contato, Desinfecção.

ABSTRACT

Despite technological advances in the water treatment, it can still be observed the persistence of some fragile points in the treatment process, one of these is the application of chlorine in the water in the ETA. Disinfection is a process that aims at the inactivation of pathogenic microorganisms, thus avoiding the transmission of diseases of water delivery. One of the essential units in the chlorination stage is the contact tank (TC), where the disinfection process occurs by contacting the chlorine with water. In the present study, the hydrodynamic behavior of a disinfection contact chamber was evaluated at the Estação de Tratamento de Água de Gravatá - Queimadas/PB, a local water treatment place. We analyzed the fields and the profiles of velocity; vector field and it was traced the Residence Time Distribution (RTD) curves where the indicators of hydraulic efficiency of the contact tank were analyzed. The equations of mass conservation and the momentum equation were solved numerically using the OpenFOAM software with the aid of the geometry and the mesh that were built with the support of the SALOME software. The pisoFoam solver was used to calculate the velocity profiles and scalarTransportFoam for the simulation of the DTR curves. The contact tank showed the occurrence of short-circuits and dead zones that affect the disinfection process. The theoretical detention time calculated was 2.64 minutes and the result obtained in the simulation was 2.43 minutes, this difference was caused by the presence of the short-circuits previously mentioned in the tank.

.

Keywords: Numerical simulation, CFD, Contact Tank, Disinfection

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Geometrias estudadas por Angeloudis (2014). a) MS - 1, b) MS - 2, c) MS - 3, d) CT - O, e) CT - 1.	18
Figura 2 – Desenho esquemáticos para curto-circuito causado por: a) diferenças de temperatura; b) circulação do vento; c) mistura inadequada; d) advecção e dispersão do fluido.	20
Figura 3 – Curvas DTR Normalizadas. Curva de baixo “curva E” e a curva de cima “curva F”	22
Figura 4 – Geometria do Tanque de Contato	30
Figura 5 – Domínio Computacional - Malha	30
Figura 6 – Estrutura do diretório de caso no OpenFOAM.	33
Figura 7 – Gráfico dos Resíduos versus número de iterações.	37
Figura 8 – Gráfico de contorno para magnitude da velocidade, vista superior ($z = 1,5$).	38
Figura 9 – Gráfico de contorno para magnitude da velocidade, vista perspectiva ($z = 1,5$).	38
Figura 10 – Linhas de corrente de velocidade. a) Vista frontal do tanque de contato; b) Vista superior do tanque de contato e c) Vista em perspectiva do tanque de contato.	39
Figura 11 – Campos vetoriais de velocidade. a) Vista frontal do tanque de contato; b) Vista superior do tanque de contato e c) Vista em perspectiva do tanque de contato.	39
Figura 12 – Ilustração das linhas dos perfis de velocidade na direção y.	40
Figura 13 – Perfis de Velocidade na direção y do tanque de contato. a) Perfil de Velocidade no compartimento 1; b) Perfil de Velocidade no compartimento 2.	41
Figura 14 – Ilustração das linhas dos perfis de velocidade na direção x.	41
Figura 15 – Perfis de Velocidade na direção x do tanque de contato. a) Perfil de Velocidade no centro do TC; b) Perfil de Velocidade no final do TC.	42
Figura 16 – Curvas de resposta de passagem do traçador. a) Curva E(t); b) Curva F(t).	43
Figura 17 – a) Relação entre a Curva E e os tempos de residência médio e o TDH teórico. b) Curva resposta normalizada de um ensaio com traçador.	43

Figura 18 – Curva normalizada com indicação dos valores de tempo médio de residência, t_{10} e t_{90}44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados dos Estudos de Stamou (2007).	23
Tabela 2 – Termos utilizados para descrever o desempenho hidráulico de reatores.	24
Tabela 3 – Indicadores de Eficiência Hidráulica utilizados por Angeloudis, 2014.	24
Tabela 4 – Valores dos IEH para escoamentos ideais.	25
Tabela 5 – Características dos compartimentos do Tanque de Contato.....	29
Tabela 6 – Pontos das linhas dos perfis de velocidade na direção y.	40
Tabela 7 – Pontos das linhas dos perfis de velocidade na direção x.	41
Tabela 8 – Valores dos IEH encontrado na simulação.....	44
Tabela 9 – Resultado do estudo de Angeloudis (2014).....	46

LISTA DE ABREVIATURAS, LETRAS LATINAS, LETRAS GREGAS E SIGLAS

DTR	Distribuição de tempo de residência
E	Distribuição de idade de saída [T^{-1}]
F	Curva de distribuição de idade de saída acumulada [T^{-1}]
E_{θ}	Distribuição de idade de saída adimensional
Q	Vazão de escoamento [L^3/T]
V	Volume [m^3]
τ	Tempo de residência teórico [T]
t_m	Tempo de residência médio obtido a partir da curva DTR [T]
θ	Tempo adimensional
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i> (Dinâmica dos Fluidos Computacional)
ETA	Estação de Tratamento de Água
TC	Tanque de Contato
IEH	Índice de Eficiência Hidráulica
σ^2	Variância da curva de resposta do traçador [T^2]
Mo	Índice de Dispersão de Morril
SI	Sistema Internacional
U	Vetor velocidade

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 OBJETIVOS	13
2.1 Objetivo Geral	13
2.2 Objetivos Específicos	13
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
3.1 Tratamento de Água	14
3.2 Utilização de cloro no Sistema de Abastecimento	14
3.2.1 Cinética de Desinfecção	15
3.2.2 Decaimento do Cloro	16
3.2.3 Tanque de Contato (TC)	16
3.3 Comportamento hidrodinâmico	19
3.3.1 Modelos de Escoamento	19
3.3.2 Curvas de Distribuição do Tempo de Residência (DTR) e Eficiência Hidráulica	21
3.5 Fluidodinâmica Computacional aplicada aos Tanques de Contato	26
3.5.1 Hidrodinâmica do Tanque de Contato	26
3.6 Regimes de Escoamento e Turbulência	27
4 MATERIAIS E MÉTODOS	29
4.1 Domínio de Estudo	29
4.2 Domínio Computacional: Malha	30
4.3 Modelagem Matemática	30
4.4 Software utilizado para simulação: OpenFOAM	32
4.4.1 Subdiretório <i>System</i>	33
4.4.2 Subdiretório <i>Constant</i>	33
4.4.3 Subdiretório 0	34

4.5 Solvers utilizados na simulação	34
4.5.1 Simulação dos campos de velocidade	35
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
5.1 Campo de Velocidade	37
5.2 Linhas de Corrente e Campo Vetorial.....	38
5.3 Perfis de Velocidade	40
5.4 Curvas DTR.....	42
5.5 Indicadores de Eficiência Hidráulica	44
6 CONCLUSÃO	47

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos tempos tem-se constatado aumento da demanda de água que, aliado a sensível piora da qualidade da água bruta, conduz à necessidade de funcionamento eficiente das estações, tanto do ponto de vista técnico, quanto do econômico. Essa eficiência só será atingida através de gerenciamento adequado (PARSEKIAN, 2003).

No entanto, apesar dos avanços tecnológicos no tratamento de água ainda pode ser observado à persistência de alguns pontos frágeis na metodologia, um desses é a aplicação de cloro na água na ETA. Cabe salientar que tais fragilidades não se referem aos aspectos químicos e de demandas, nem as instalações de manuseio e dosagem do desinfetante, mas nas operações subsequentes, que devem assegurar a qualidade da desinfecção.

A desinfecção é um processo que tem como objetivo a inativação de microrganismos patogênicos, evitando assim a transmissão de doenças de veiculação hídrica. A desinfecção ocorre através do contato de concentrações adequadas de cloro com a água por um tempo suficientemente longo. Esse tempo de contato é usualmente fixado entre 30 e 60 minutos para uma desinfecção efetiva, variando de acordo com a qualidade da água na entrada do tanque de contato e da dosagem do desinfetante. O desinfetante mais utilizado para desinfecção de água potável é o cloro, embora outros agentes possam ser aplicados como ozônio, radiação UV e permanganato de potássio (AWWA, 1990).

Uma das unidades essenciais na etapa de cloração é o tanque de contato (TC), muitas estações de tratamento apresentam serias deficiências neste processo, uma vez que a desinfecção não é um processo instantâneo, ocorre dentro um tempo suficiente para eliminação da contaminação por microrganismos que depende da forma em que se apresenta o agente desinfetante (gás, sólido), a dosagem, o pH (ótimo próximo de 7,50) e a temperatura da água.

Segundo Azevedo Neto (1998) não se deve confundir o tempo efetivo de contato com o tempo de detenção hidráulica dos reservatórios, devido à existência de zonas mortas, correntes internas, curtos circuitos e estratificação. Logo, para assegurar o tempo mínimo de contato os projetos e operações dessas unidades devem procurar reduzir curtos circuitos, com a construção de partições ou divisórias

internas, examinar as condições de variação de nível para estabelecer o nível mínimo adequado e assegurar um bom sistema de mistura prévia.

A aplicação da técnica de modelagem matemática para diferentes fins tornou-se uma ferramenta rotineira no auxílio da solução de diversos problemas, inclusive no gerenciamento de sistemas de abastecimento de água, na prevenção de ameaças de contaminantes, podendo também ser usada como uma das ferramentas no processo de avaliação da gestão desses sistemas, pois permite a simulação dos efeitos das ações tomadas pelos gestores, sendo uma ferramenta útil para a análise de estratégias alternativas de mitigação e gerenciamento de ameaças (ZECHMAN, 2011).

Desta forma, a hidrodinâmica do TC apresenta um papel de destaque quando o tema é otimização do processo, auxiliando na maximização da sua eficiência, na minimização dos custos de operação e também na minimização da geração de subprodutos indesejáveis, e por sua vez, podem acarretar prejuízos à saúde humana, ao meio ambiente e ao próprio processo (TEIXEIRA, 1993).

Uma forma de se analisar a hidrodinâmica do escoamento em TC, com menor custo, se dá por meio da interpretação da curva de Distribuição de Tempo de Residência (DTR), sendo uma técnica de avaliação da hidrodinâmica bastante empregada em estudos acadêmicos na área de saneamento. Esta curva informa as características do padrão de escoamento e do tempo de contato entre fluidos em um recipiente, além de permitir a modelagem do sistema e ajudar na concepção de reatores, a fim de se obter ou manter um padrão de fluxo desejado.

Este trabalho em particular propõe a utilização da ferramenta da simulação numérica *Computational Fluid Dynamics* (CFD) para analisar a hidrodinâmica do TC de uma ETA, uma vez que esta ferramenta é bastante utilizada para descrever o comportamento do escoamento de gases e líquidos, transferência de massa e energia, corpos em movimento, sistemas multifásicos, reações químicas, acústica, dentre outras aplicações.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar o comportamento hidrodinâmico de um tanque de contato de desinfecção, através da simulação numérica *Computational Fluid Dynamics* (CFD), da Estação de Tratamento de Água de Gravatá – Queimadas/PB.

2.2 Objetivos Específicos

- Traçar os perfis de velocidade dentro do tanque de contato.
- Traçar as curvas de Distribuição de Tempo de Residência (DTR)
- Identificar possíveis zonas mortas, curtos circuitos e tempo de detenção hidráulica.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Tratamento de Água

Qualquer água disponível na natureza pode ser tratada do ponto de vista tecnológico. Porém economicamente é inviável o tratamento de certos tipos de poluentes. Esses poluentes podem inviabilizar um recurso hídrico como fonte de abastecimento humano, devido ao elevado custo para tornar a água potável (VIANNA, 2007).

O tratamento de água pode ser definido como um processamento da água para alcançar um nível de qualidade que atenda aos padrões estabelecidos pelas agências reguladoras até o usuário final. Os padrões podem incluir os requisitos das agências reguladoras, requisitos adicionais definidos pela necessidade da comunidade local ou requisitos associados a processos industriais.

Segundo a Portaria nº 2.914/2011 (BRASIL, 2011) do ministério da saúde a água potável é aquela que atende aos padrões de potabilidade e que não ofereça riscos a saúde. Para que a água seja considerada potável é necessário que ela não apresente características como cor, turbidez, odor ou gosto desagradável, e não apenas ser livre de patógenos ou substâncias nocivas à saúde.

O tratamento mais comum no Brasil é o tratamento completo ou convencional, dotado dos processos de floculação, decantação, filtração, correção de pH, desinfecção (cloração) e fluoretação, antes de ser distribuída à população. Contudo existem também vários processos tecnológicos empregados no país, tais como: filtração direta ascendente, filtração direta descendente e filtração lenta, entre outros.

O principal objetivo do tratamento de água é proteger a saúde. A água pode conter uma grande variedade de contaminantes, que podem gerar doenças de veiculação hídrica, com elevada capacidade de se espalhar rapidamente para um grande número de pessoas. A desinfecção com cloro é amplamente utilizada no Brasil e torna a água oferecida a população micro biologicamente segura.

3.2 Utilização de cloro no Sistema de Abastecimento

A necessidade de tornar a água inócua para a saúde da população trouxe a necessidade do processo de desinfecção da água destinada ao consumo humano,

que teve início na primeira década do século XX. Desde os finais do século XIX, e em particular desde o surto de cólera em Londres em 1880, que é reconhecida a capacidade da água de disseminar doenças. Atualmente, a contaminação de água destinada ao consumo humano por bactérias, vírus e protozoários é encarada como uma ameaça para a saúde pública e apontada como causa de epidemias. O cloro é o desinfetante mais utilizado no mundo todo para esse processo, pois é eficaz, tem baixo custo e simples utilização (FIGUEIREDO, 2014).

Na etapa de desinfecção o cloro passa por série de reações de oxidação que decorrem de forma muito rápida e não seletiva. Nestas reações o cloro é consumido, isto é, a quantidade de cloro que permanece na água no final da desinfecção é muito inferior à quantidade inicialmente adicionada. A desinfecção é um processo unitário, onde se utiliza um reator especificamente projetado e dimensionado para essa função. O principal objetivo da utilização desse reator é maximizar o contato do agente desinfetante com o líquido a ser desinfetado (METCALF e EDDY, 2016). Um dos tipos de reatores mais utilizado é o de fluxo pistonado com chicanas e distribuidores de vazão.

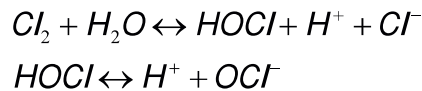
3.2.1 Reações na Desinfecção

A desinfecção é a etapa do tratamento de água que consiste na inativação de microrganismos patogênicos, que pode ser realizada por intermédio de agentes químicos ou físicos. A inativação de microrganismo já ocorre nas demais etapas de tratamento, porém a desinfecção é uma operação unitária obrigatória, pois somente esse processo garante a inexistência de microrganismos na água e evita o crescimento microbiológico nas redes de distribuição (FUNASA, 2014).

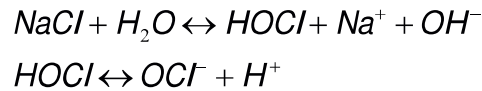
A inativação de microrganismo dentro dos TC não é a única reação química de interesse nesse processo. Vários fatores influenciam no processo de desinfecção dentro do TC e no residual de cloro necessário ao final do processo como: pH, temperatura, composição da água na entrada no TC e a manutenção da concentração do desinfetante. Além desses fatores a formação de subprodutos da desinfecção não pode deixar de ser monitorada.

As equações a seguir expressam as reações dos principais produtos à base de cloro com a água.

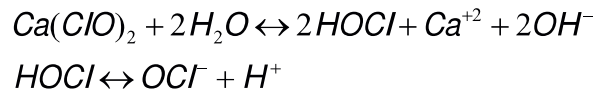
Cloro Gasoso



Hipoclorito de Sódio



Hipoclorito de Cálcio



3.2.2 Decaimento do Cloro

Diversos modelos de decaimento de cloro têm sido desenvolvidos com diferentes níveis de complexidade. Um modelo mais simples e amplamente utilizado é o modelo de Johnson (1978):

$$\frac{dC_{Cl}}{dt} = -K_b C_{Cl}$$

em que C_{Cl} é a concentração de cloro, t é o tempo e K_b é a constante de velocidade da reação ou constante de decaimento.

3.2.3 Tanque de Contato (TC)

O TC tem basicamente como parâmetros de projeto o tempo teórico de detenção hidráulica e o volume do tanque, não levando em consideração o surgimento de zonas mortas e curtos circuitos (TEIXEIRA, 1993). Esse tempo teórico pode ser estimado através da equação $\tau = V/Q$, onde V é o volume do tanque em (m^3) e Q vazão que de alimentação (m^3/s). O dimensionamento do TC é definido de acordo com o regime hidráulico considerado, fluxo pistão ou mistura completa, que são escoamentos ideais teóricos.

No fluxo pistão todos os elementos do fluido passam pelo reator uniformemente, em caminhos paralelos, não ocorre dispersão longitudinal. Todas as partículas permanecem dentro do sistema durante um mesmo período de tempo. Diferentemente do fluxo pistão a mistura completa é caracterizada pela mistura instantânea de todos os elementos do fluido de entrada com o fluido já existente no reator, representando uma dispersão máxima. Este modelo define que a concentração em qualquer ponto do reator é igual a concentração efluente. Na prática o regime

hidráulico nos reatores é não-ideal, mas para otimização de cálculos de projeto, são considerados regimes ideais de escoamento (FLOGGER, 2009).

Estudos mostram que as características construtivas estão diretamente relacionadas aos padrões de fluxo e de mistura dentro do TC, tais como: geometria do tanque, configurações de entrada e saída do fluxo e modificadores de fluxo (defletores). A relação comprimento/largura (β) do tanque, é um dos principais parâmetros de projeto e para obtenção de um bom desempenho hidráulico do TC $\beta \geq 40$. Esse valor é geralmente obtido através de uma geometria longa e estreita e a utilização de modificadores de fluxo, como defletores ao longo do tanque na direção longitudinal (TEIXEIRA, 1993).

A localização, tamanho e orientação das seções de entrada e saída do tanque podem influenciar na ocorrência de zonas de recirculação do fluxo, de estagnação nos planos horizontal e vertical (LEVENSPIEL, 1999). Essas zonas são prejudiciais para o desempenho hidráulico do TC, pois o fluido tende a permanecer um tempo maior que o tempo de contato definido. O fenômeno contrário é chamado de curto-circuito, que ocorre quando o fluido segue caminhos preferenciais dentro do TC permanecendo um tempo menor que o tempo de contato esperado.

Segundo Teixeira (1993), há três objetivos básicos para o estudo da otimização hidráulica de TC: i) maximizar a eficiência da desinfecção; ii) minimizar o uso de desinfetantes e outros produtos químicos para atingir a máxima eficiência do processo e iii) minimizar a formação de subprodutos da desinfecção.

A maior parte dos trabalhos realizados em TC usa modelos de bancada, uma vez que experimentos no local podem não ser eficientes em termos de custos e comprometimento dos processos de tratamento da água (ANGELOUDIS, 2014). Teixeira (1993) avaliou um modelo de tanque com chicanas dividido em oito compartimentos e um canal aberto como dispositivo de entrada. Os resultados experimentais mostraram que o campo de escoamento apresentou elevada turbulência na entrada do tanque, na zona de transição entre dois compartimentos e próxima a regiões de recirculação de fluxo.

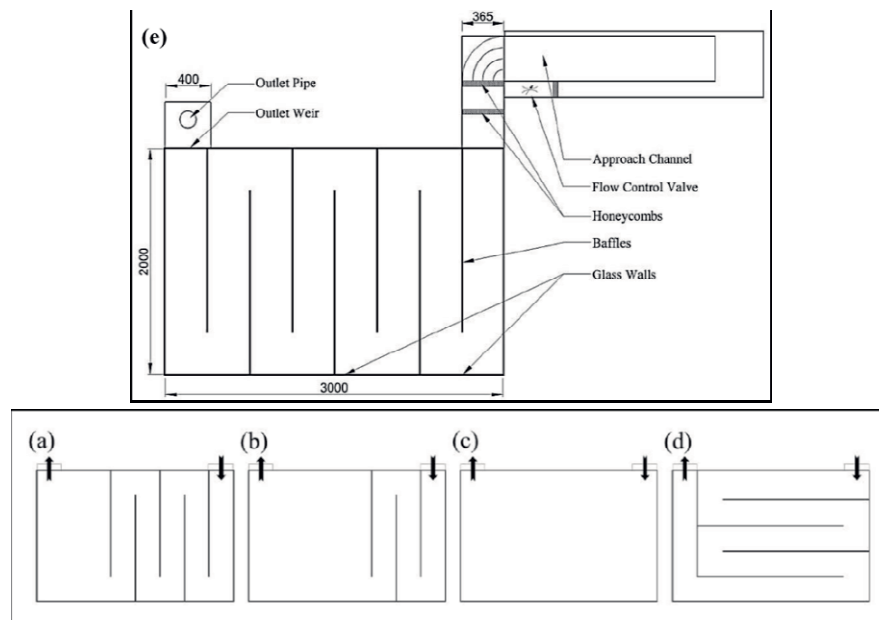
Rauen (2005) investigou o impacto da interferência da mudança dos arranjos das chicanas, em cinco arranjos diferentes e duas diferentes posições dos dispositivos de entrada e saída do tanque, em relação à hidrodinâmica do tanque de contato. Os dados foram confrontados com os dados experimentais obtidos por Teixeira (1993).

As diferentes configurações foram avaliadas usando técnicas de traçador e os resultados interpretados com relação aos padrões de fluxo de ideal.

Os estudos de Angeloudis (2014) permitiram obter novas informações sobre como ocorrem os processos hidrodinâmicos dentro do TC e como ocorre o transporte dispersivo e a mistura dos elementos, além de fornecer dados para calibração e verificação de modelos em CFD. O resultado da simulação numérica foi validado através de estudos experimentais.

Os estudos de Angeloudis (2014) são desenvolvidos em um tanque de contato com chicanas e fluxo horizontal. Podemos observar que quantos mais chicanas mais os índices se aproximam dos valores esperados quando é considerado o fluxo pistonado. As chicanas são utilizadas com o objetivo de maximizar a utilização do volume do TC, aumentar a zona de fluxo pistonado, minimizar a ocorrência de curtos-circuitos, reduzir a velocidade do fluxo na entrada e na saída, diminuir a mistura entre o fluido que entra e o fluido já presente no tanque. A Figura 1 ilustra as geometrias estudadas por Angeloudis (2014).

Figura 1 – Geometrias estudadas por Angeloudis (2014). a) MS - 1, b) MS - 2, c) MS - 3, d) CT - O, e) CT - 1.



Fonte: Angeloudis (2014).

3.3 Comportamento hidrodinâmico

3.3.1 Modelos de Escoamento

Reatores são unidades controladas utilizadas para transformar reagentes em produtos. De acordo com o tipo de alimentação podem ser classificados em: reatores em batelada ou reatores contínuos.

O reator descontínuo é utilizado em pequena escala para testar novos projetos em fase de implantação ou que ainda não estão completamente desenvolvidos, para processos caros ou de difícil execução em um sistema contínuo (FLOGER, 2009). No reator descontínuo os reagentes são lançados no reator permanecendo durante um período pré-estabelecido sendo depois descarregada a mistura resultante (LEVENSPIEL, 1999).

Nos reatores contínuos, os reagentes e produtos são, respectivamente, adicionados e retirados continuamente do reator. Reatores de fluxo contínuo são quase sempre preferidos quando a capacidade de processamento requerido é grande. Embora os requisitos de investimento de capital sejam maiores, os custos operacionais geralmente são menores quando considerado por unidade de produto. As facilidades do sistema contínuo são: controle maior na qualidade do produto, facilita a automação do processo (JUNIOR, 2014).

Os reatores podem apresentar dois tipos de modelos de escoamento ideal, do tipo pistão (*plug flow*), onde as partículas de fluido possuem a mesma velocidade e seguem caminhos paralelos e retos. E do tipo mistura completa ou mistura perfeita (*perfect mixing*), onde é caracterizado pela homogeneidade de qualquer propriedade do fluido (LEVENSPIEL, 1999). Escoamentos com comportamentos diferentes podem ser considerados não-ideais.

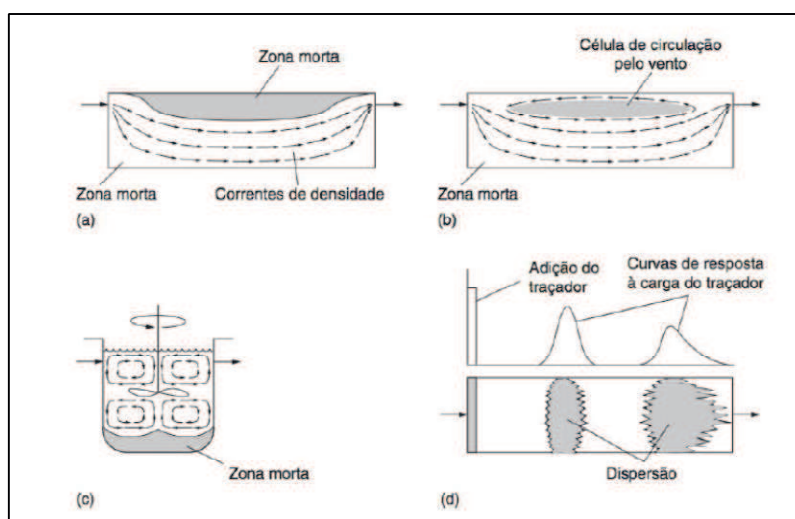
Na prática os reatores reais não seguem exatamente os modelos de escoamento ideal descritos anteriormente e apresentam escoamento arbitrário, ou seja, se aproximam mais de um ou de outro com maior ou menor desvio (LEVENSPIEL, 1999). Segundo Teixeira (1993) o grau de desvio entre as características do escoamento ideal e as características observadas na prática é dado pela eficiência hidráulica.

Segundo Levenspiel (1999) os desvios em relação ao escoamento ideal podem ser causados pela formação de zonas de recirculação, 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 que são recirculadas para a entrada ou para o seu interior.
- Zonas mortas: são regiões onde os tempos de residência das moléculas do fluido são relativamente elevados em relação ao tempo de residência teórico. Estes regimes são caracterizados pela baixa troca com regiões adjacentes.
- Mistura: é o espalhamento aleatório de constituintes no volume do reator, causado pela composição de vários efeitos, tais como a difusão, a advecção e as correntes de densidade

O fluxo não ideal em reatores pode ser causado por diversos fatores como: diferenças de temperatura, circulação pelo vento, mistura inadequada, projeto inadequado, dispersão axial em reatores de fluxo pistonado (METCALF e EDDY 2016). A Figura 2 ilustra desenhos esquemáticos dos desvios de fluxo.

Figura 2 – Desenho esquemáticos para curto-circuito causado por: a) diferenças de temperatura; b) circulação do vento; c) mistura inadequada; d) advecção e dispersão do fluido.



Fonte: Metcalf & Eddy, 2016.

3.3.2 Curvas de Distribuição do Tempo de Residência (DTR) e Eficiência Hidráulica

Um das formas de se avaliar o desempenho dos reatores, o seu fluxo, possíveis desvios, e sua eficiência é através das curvas de distribuição de tempo de residência. As curvas DTR são obtidas através da técnica do uso de traçadores. Os traçadores são dispositivos ou substâncias que simulam o movimento individual ou de um conjunto de partículas do fluido (TEIXEIRA, 1993). Características importantes de um traçador incluem: o traçador não deve afetar o fluxo; deve ser conservativo; deve ser possível injetar em um curto espaço de tempo; deve ser de fácil análise; difusividade molecular baixa; não ser adsorvido nem reagir com a superfície do reator ou partículas do fluido (METCALF e EDDY, 2016).

As curvas DTR e Indicadores de Eficiência Hidráulica são importantes ferramentas para avaliar o desempenho hidráulico de TC. O método consiste na injeção de um traçador através de um pulso ou degrau, e com o passar do tempo às concentrações do traçador são medidas na saída do TC, e é formada a curva C (Concentração *versus* tempo).

A grandeza $E(t)$ é conhecida como função de distribuição de tempo de residência, ela descreve de forma quantitativa, quanto tempo diferentes partículas permaneceram no reator (FLOGER, 2009). É definida como:

$$E(t) = \frac{C(t)}{\int_0^{\infty} C(t) dt}$$

Sabendo que a fração de todo material que ficou no reator por um período de tempo t , entre $t = 0$ e $t = \infty$, temos que:

$$\int_0^{\infty} E(t) dt = 1.$$

Quando a adição do traçador é feita na forma de degrau o resultado da curva é a distribuição acumulativa $F(t)$, considerando uma taxa constante de adição de traçador iniciada em $t = 0$, temos

$$C_0(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ (C_0) \text{ constante} & t \geq 0 \end{cases}$$

Uma vez que a concentração na entrada é constante com o tempo as curvas $E(t)$ e $F(t)$ são descritas pelas seguintes equações:

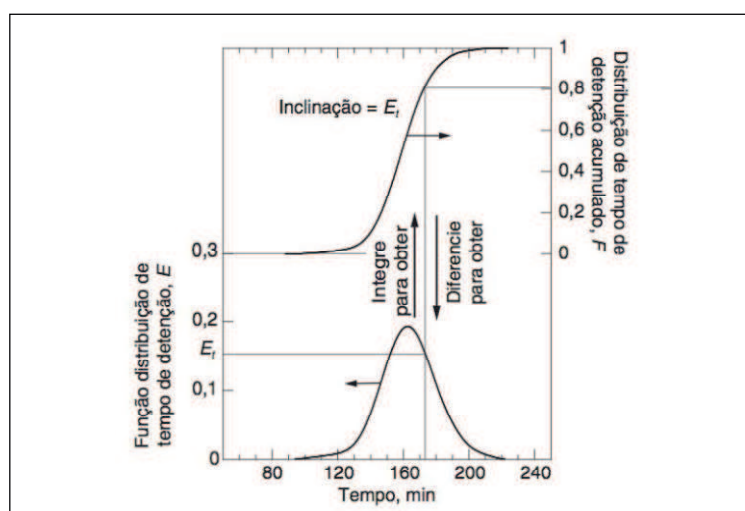
$$F(t) = \left[\frac{C_{saída}}{C_0} \right]_{degrau}$$

$$E(t) = \frac{d}{dt} \left[\frac{C_{saída}}{C_0} \right]_{degrau}$$

A curva $F(t)$ é a integral da curva $E(t)$, é conhecida como a curva de distribuição do tempo de residência acumulado, e representa a massa de traçador acumulada que passou pela seção de monitoramento em função do tempo normalizado. A vantagem da utilização das curvas normalizadas é a possibilidade de comparação de resultados de diferentes experimentos. A Figura 3 ilustra a forma normalizada das curvas E e F .

As análises de desempenho hidráulico dos TC são baseadas em curvas DTR e geralmente envolvem uma comparação, entre as curvas do objeto de estudo e as curvas obtidas através dos escoamentos ideais como fluxo pistão ou mistura completa. O objetivo da análise é geralmente encontrar quanto às curvas obtidas desviam das curvas ideais. Quanto menor o desvio da curva analisada mais alta é a eficiência hidráulica do TC (ANGELOUDIS, 2014). Esse tipo de análise geralmente é complementando por uma análise semiquantitativa baseada em indicadores hidráulicos.

Figura 3 – Curvas DTR Normalizadas. Curva de baixo “curva E” e a curva de cima “curva F”.



Fonte: Metcalf & Eddy, 2016.

Stamou (2007) avaliou a melhora na eficiência hidráulica em TC com a mudança na geometria utilizando técnicas em CFD e curvas DTR. Ele concluiu que as geometrias que não tinham chicanas apresentavam altos níveis de curto-circuito

na entrada, grandes regiões de recirculação e zonas mortas. Com o uso das chicanas, que foi a modificação feita na geometria, o escoamento no tanque se aproximou mais do fluxo pistão, teve redução nos níveis de curto-circuito e menores regiões de recirculação e zonas mortas. Os resultados do estudo de Stamou (2007) estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Resultados dos Estudos de Stamou (2007).

Indicador		Geometria Inicial	Geometria Modificada	Fluxo Pistão	Mistura Completa
Curto-Circuito	θ_0	0,02	0,35	1,00	0,000
	θ_{10}	0,06	0,53	1,00	0,105
Indicadores de Mistura e Dispersão	$\theta_{75} - \theta_{25}$	0,74	0,42	0,00	1,099
	$\theta_{90} - \theta_{10}$	1,30	0,82	0,00	2,197
	θ_{90}/θ_{10}	22,60	2,54	1,00	21,850
	Var	0,35	0,08	0,00	1,000
Eficiência	$\theta_{máx}$	0,05	0,59	0,00	1,000
	θ_{50}	0,47	0,76	1,00	1,000

Fonte: Stamou adaptado, 2007.

Segundo Teixeira (1993) 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. Para a avaliação da eficiência hidráulica utiliza-se amplamente a técnica de traçadores. A Tabela 2 apresenta os termos utilizados, para caracterizar as curvas resposta de traçadores, a análise da concentração em função do tempo e a obtenção das curvas de distribuição do tempo de residência.

Análises qualitativas do desempenho hidráulico de TC são baseadas em curvas DTR normalizadas, geralmente envolvem uma avaliação do grau de similaridade entre os resultados obtidos para um determinado tanque e a curva de referência correspondente, ou seja, para fluxo de pistão ou mistura perfeita. Quando duas ou mais condições são contrastadas, por exemplo, o objetivo da análise é geralmente encontrar a condição que forneceu os resultados mais próximos da curva de referência, a fim de determinar o modelo com a maior eficiência hidráulica. Este tipo de análise é geralmente complementado por uma análise semiquantitativa baseada em indicadores de eficiência hidráulica (IEH) (ANGELOUDIS, 2014). Os indicadores de eficiência hidráulica utilizados por Angeloudis (2014) estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 2 – Termos utilizados para descrever o desempenho hidráulico de reatores.

Termo	Definição
τ	Tempo de detenção hidráulico (V , volume/ Q , vazão)
t_i	Tempo em que o traçador aparece pela primeira vez
t_p	Tempo em que o pico de concentração do traçador é observado (moda)
t_g	Tempo médio para atingir o centroide da curva DTR
t_{10} , t_{50} , t_{90}	Tempo no qual 10, 50, e 90% do traçador passou pelo reator
t_{90}/t_{10}	Índice de Dispersão de Morill, IDM
$1/MDI$	Eficiência Volumétrica, definida por Morrill (1932)
t_i/τ	Índice de Curto-Circuito. Em um reator ideal pistonado, a razão é 1 e se aproxima de zero com o aumento da mistura
t_p/τ	Índice de tempo de detenção modal. A razão tende a 1 em reatores de fluxo pistonado e a 0 em reatores de mistura completa. Para valores de razão maiores ou menores que 1,0 a distribuição da vazão no reator não é uniforme
t_g/τ	Índice do tempo médio de detenção. Um valor de 1 indica que um uso completo do volume está sendo feito. Para valores de razão maiores ou menores que 1,0 a distribuição da vazão no reator não é uniforme
t_{50}/τ	Índice do tempo mediano de detenção. A razão t_{50}/τ é a medida da assimetria da curva DTR. Em um reator de fluxo pistonado eficiente, a curva DTR é muito parecida com a normal ou Distribuição Gaussiana (U.S. EPA, 1986). Um valor de t_{50}/τ , menor que 1,0 corresponde a uma curva DTR assimétrica à esquerda. Da mesma forma, para valores maiores do que 1.0, a curva DTR é assimétrica à direita.
$t/\tau = \theta$	Tempo normalizado, utilizado na construção da curva DTR normalizada

Fonte: Metcalf & Eddy, 2016.

Tabela 3 – Indicadores de Eficiência Hidráulica utilizados por Angeloudis, 2014.

IEH	Definição	Indicador
t_i	tempo do início da passagem do traçador na saída da unidade	Curto-Circuito
t_{10}	Tempo no qual 10% do traçador passou pelo reator	Curto Circuito
t_p	Tempo em que o pico de concentração do traçador é observado	Curto Circuito
t_m	Tempo médio de residência do traçador	Curto Circuito
t_{90}	Tempo no qual 90% do traçador passou pelo reator	Processo de Mistura
$\frac{t_{90}}{t_{10}}$	Índice de Dispersão de Morrill (Mo)	Processo de Mistura
σ^2	Índice de dispersão	Processo de Mistura

Fonte: Angeloudis, 2014.

A Tabela 4 apresenta os indicadores mais utilizados para determinar eficiência hidráulica de um reator para escoamentos ideais, segundo Angeloudis (2014).

Tabela 4 – Valores dos IEH para escoamentos ideais.

IEH	Tipos de Escoamento		
	Pistão	Mistura Completa	Pistão com Dispersão
d	0,0	∞	0,014
$\frac{t_{10}}{\tau}$	1,0	0,11	0,81
σ^2	0,0	1,0	0,027
Mo	1,0	22,8	1,52

O tempo (t_i) é o indicador que melhor representa fisicamente o fenômeno de curto-circuito, porém, indica somente a intensidade de curto-circuito. O indicador (t_{10}) representa bem o indicador de curto-circuito, pois está associado ao período inicial de passagem do traçador na saída na unidade. O índice de Morril (Mo) representa um indicador de mistura, e o seu inverso indica a eficiência do volume utilizado no reator. O 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 pela seguinte equação (FLOGGER, 2009):

$$\sigma^2 = \int_0^{\infty} t^2 E(t) dt - t_m^2,$$

onde:

E (t) = curva E;

t = tempo de coleta dos dados;

t_m = tempo de residência médio.

Normalizando o índice de dispersão temos:

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

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.

Segundo Fogler (2009) o tempo de residência médio, que é a média de tempo que uma partícula passa pelo sistema, pode ser calculado pela equação seguinte:

$$\int_0^{\infty} tE(t)dt.$$

3.5 Fluidodinâmica Computacional aplicada aos Tanques de Contato

Os avanços na modelagem utilizando CFD e o aumento da capacidade computacional permitiu o desenvolvimento de modelos que podem simular os processos de transporte de massa e o fluxo dentro de TC com detalhes consideráveis (ANGELOUDIS, 2014). Os modelos físicos, de bancada em laboratório, apresentam dificuldades no seu processo de execução devido a impedimentos técnicos e financeiros. Já os modelos em CFD, mais econômicos, apresentam uma gama de parâmetros que podem ser modelados como processos físicos, químicos, biológicos, turbulência e taxas de decaimento, além de facilmente ajustáveis e flexíveis.

Os modelos em CFD aplicam esquemas numéricos para resolver equações matemáticas aplicadas à mecânica dos fluidos. Para simulação dos TC serão resolvidas equações de descrevem a hidrodinâmica do tanque, como perfis de velocidade e transporte de soluto.

3.5.1 Hidrodinâmica do Tanque de Contato

Os processos hidrodinâmicos em TC são governados pelas equações de continuidade e conservação de movimento de *Navier-Stokes* (N-S). A água é geralmente tratada como fluido incompressível e, as condições de temperatura são consideradas constantes para efeitos de modelagem do problema. Com essas considerações as equações de continuidade e conservação de movimento podem ser desacopladas da equação de energia assumindo viscosidade constante e a pressão se torna uma variável comum (ANGELOUDIS, 2014). Expressa em coordenadas Eulerianas retangulares as equações da continuidade e conservação de movimento podem ser escritas como:

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_i^2},$$

onde U_i é a componente da velocidade média nas direções x , y e z , ρ e ν são as características do fluido, massa específica e viscosidade cinemática, respectivamente, t é o tempo e p a pressão. Segundo Rodi (1993) as equações N-S não podem ser resolvidas analiticamente para problemas práticos, como no caso dos TC. Assim abordagens matemáticas têm sido usadas para resolver essas equações. As abordagens mais utilizadas são *Equations Reynolds-Averaged* (RANS) e *Large Eddy Simulations* (LES) para casos turbulentos.

3.6 Regimes de Escoamento e Turbulência

A turbulência é caracterizada por um escoamento de fluido com intensa agitação caótica e imprevisível. Para estudar a turbulência é necessário conhecer dois importantes conceitos. O primeiro é a viscosidade turbulenta, μ_t , que não é uma propriedade termodinâmica dos fluidos, mas sim uma condição do escoamento, podendo ser determinada conhecendo-se duas propriedades termodinâmicas, como a pressão e a temperatura. O segundo é o comprimento de mistura, l_m , que é um comprimento característico que equivale à distância percorrida pelo fluido onde há variação nas velocidades locais médias. Em um tubo, o comprimento de mistura é a distância necessária, partindo-se da entrada, a partir da qual o perfil de velocidades não se modifica mais com o aumento da distância ao longo do tubo (VASCONCELOS, 2014).

Quando num escoamento as camadas adjacentes do fluido se deslocam com a mesma velocidade, ou deslizam entre si de maneira ordenada com pequenas variações de velocidade relativa entre elas, os elementos de fluido seguem trajetórias bem definidas e contínuas. Esse fenômeno é descrito como escoamento em regime laminar. Porém, caso haja um deslocamento brusco entre as camadas, com os elementos de fluido se interceptando em suas trajetórias de forma aleatória, o escoamento é classificado como regime turbulento (SILVA, 2014).

Um parâmetro usado para medir o grau de turbulência de um escoamento é o número de Reynolds, aplicando-se a definição de viscosidade cinemática é definido pela expressão:

$$Re = \frac{UL}{\nu},$$

onde U e L são respectivamente a magnitude do vetor velocidade e o comprimento característico do escoamento.

4 METODOLOGIA

4.1 Domínio de Estudo

O domínio de estudo é o Tanque de Contato de cloro da Estação de Tratamento de Água – ETA de Gravatá situada no município de Queimadas, a uma distância de 21 km de Campina Grande. A estação é do tipo convencional com capacidade máxima para tratar 1500 L/s, a vazão atual de entrada do tanque de contato é 1.200 L/s e recebe uma dosagem de cloro de 28 kg/h. A ETA é composta por uma calha parshal, flocluladores mecânicos, decantadores de fluxo horizontal, tanque de contato de cloro e casa de química completa. O TC é composto por dois compartimentos, a geometria é apresentada na Figura 4, as características dos compartimentos estão apresentadas na Tabela 5:

Tabela 5 – Características dos compartimentos do Tanque de Contato.

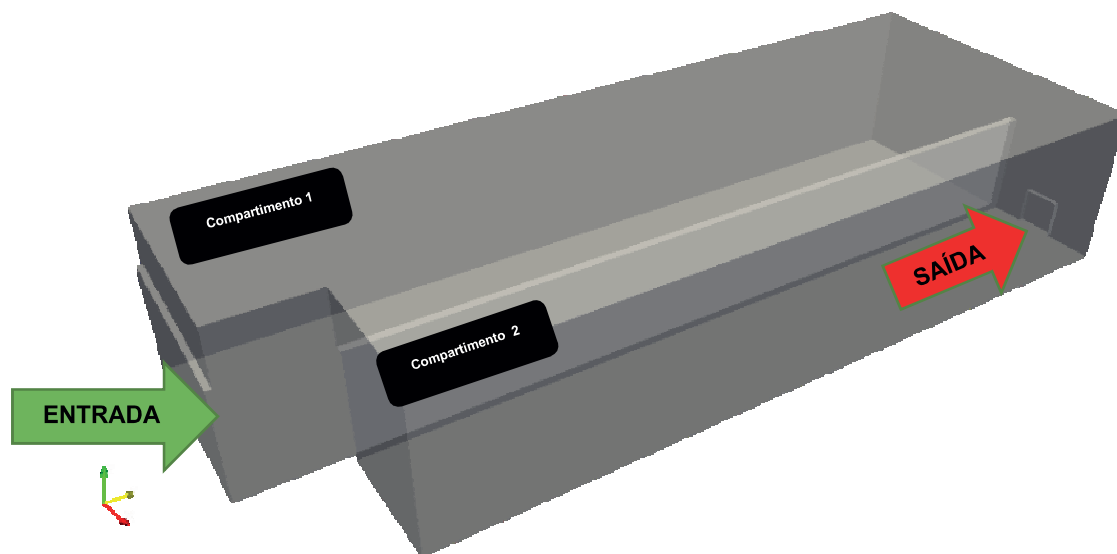
Características	Compartimento 1	Compartimento 2
Comprimento (m)	15,8	14
Altura Total (m)	3,0	3,0
Altura da lâmina de água (m)	2,2	2,2
Largura (m)	3,5	2,2
Vazão de entrada (m ³ /s)	1,2	vazão da compartimento1
Volume Útil (m ³)	121,66	67,76
Volume Total (m ³)	165,90	92,40

Também foi calculado o volume sobre a parede de passagem entre uma câmara e outro, chamado de zona de passagem com as seguintes dimensões (0,15 x 14,0 x 0,20) resultando em um volume de 0,42 m³. O volume útil de 189,84 m³ foi o volume considerado para o cálculo do tempo de detenção hidráulico teórico (τ), dado por:

$$\tau = \frac{V}{Q}$$

onde V é o volume útil total do tanque e Q a vazão de alimentação na primeira câmara. O valor de τ calculado é de 2,64 minutos.

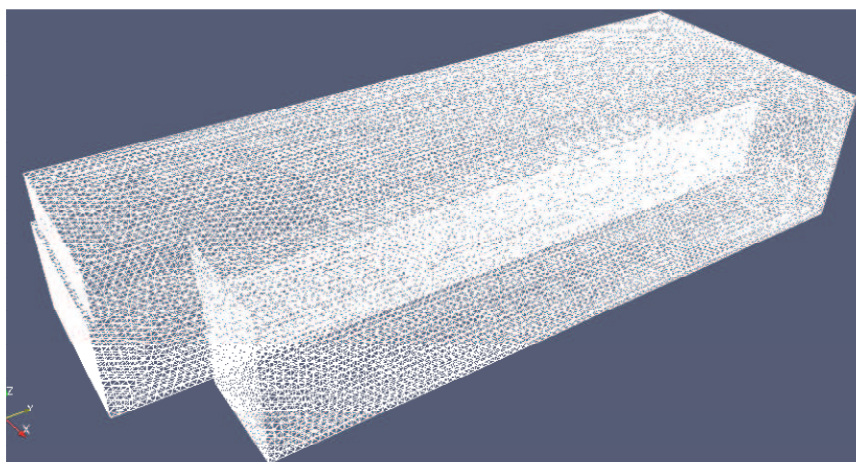
Figura 4 – Geometria do Tanque de Contato



4.2 Domínio Computacional: Malha

A malha representativa do domínio de estudo, ilustrada na Figura 6, foi gerada usando o software SALOME da Code_Aster, empregando a estratégia de NETGEN 3D, onde é definido pelo usuário maior e menor aresta e o nível de refinamento da malha. A malha apresenta 29419 nós e 226818 tetraedros. Após a geração da malha é realizada a exportação através do formato “.unv”, e o arquivo é convertido para o OpenFOAM através do comando `<ideasUnvToFoam nomedoarquivo.unv>`. A Figura 5 apresenta a malha utilizada na simulação.

Figura 5 – Domínio Computacional - Malha



4.3 Modelagem Matemática

Para fins de modelagem foram admitidas as seguintes características do escoamento:

- Escoamento Transiente;
- Fluido Newtoniano, incompressível e com propriedades físico-químicas constantes;
- Isotérmico;
- Sem reações químicas;
- Regime de Escoamento Laminar.

Logo para as condições adotadas as equações governantes estão detalhadas a seguir:

4.3.1 Equação da Continuidade

A equação da continuidade descreve a conservação de massa, na ausência de fontes ou sorvedouros toda massa que entra no sistema deve sair e/ou se acumular no sistema (FORTUNA, 2000). A equação implica além da conservação da massa, na conservação do volume envolvido no escoamento. A equação da continuidade pode ser escrita em notação vetorial por meio do operador divergente (∇):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho U) = 0$$

Para um fluido com densidade constante a equação da conservação da massa se reduz para

$$\nabla U = 0$$

4.3.2 Conservação de Momento

As equações de conservação de momento são obtidas pela aplicação da segunda lei de Newton. A taxa de variação temporal do momento de uma partícula será igual a resultante das forças que agem sobre essa partícula (FORTUNA, 2000).

Existem dois tipos de força que agem sobre o fluido:

- Forças de Campo: essas forças agem sobre a massa de fluido como um todo. São exemplos dessas forças a gravidade, eletromagnética, centrífuga e Coriolis. Elas são adicionadas como termos fontes na equação de momento quando sua magnitude influencia o escoamento.

- Forças de Superfície: que agem apenas sobre a superfície do elemento de fluido, decorre da pressão exercida sobre o fluido por um elemento exterior e das tensões viscosas normais e de cisalhamento.

Para um escoamento de fluido incompressível e isotérmico a equação da conservação de momento pode ser escrita da seguinte forma:

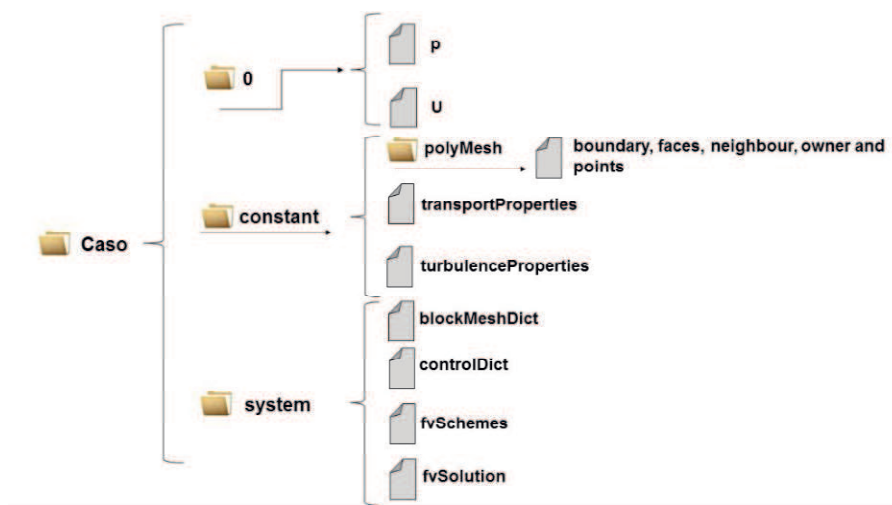
$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \cdot \nabla U - \nu \nabla^2 U = -\frac{1}{\rho} \nabla p$$

4.4 Software utilizado para simulação: OpenFOAM

O OpenFOAM é um conjunto de bibliotecas desenvolvidas em C++ para operação e manipulação de campos tensoriais (*Field Operation and Manipulation*). Este conjunto de bibliotecas é utilizado para criar uma série de aplicativos voltados para solução de problemas de fluidodinâmica computacional. Os aplicativos do OpenFOAM podem ser classificados em duas grandes categorias: os *solvers* e os utilitários. Os *solvers* são os aplicativos desenvolvidos para resolver um problema específico da mecânica do contínuo, como por exemplo a solução de um escoamento incompressível. Os utilitários são aplicativos desenvolvidos para manipular dados, como por exemplo o cálculo da magnitude de um campo de velocidade (JATOBA, 2010). O código é livre e com a fonte aberta sob a licença GNU *General Public License*.

O OpenFOAM não apresenta interface gráfica, isso implica na criação de diretórios para execução dos casos. Nesses diretórios ficarão armazenados os arquivos necessários para solução dos problemas. A Figura 6 ilustra como devem ser organizadas os diretórios de trabalho, subdiretórios e demais arquivos.

Figura 6 – Estrutura do diretório de caso no OpenFOAM.



4.4.1 Subdiretório *System*

No subdiretório *system* devem estar configurados os procedimentos de solução propriamente ditos. O arquivo *controlDict* estabelece os parâmetros que controlam a resolução; tais como tempo inicial e final da solução, tamanho do passo de tempo, output e intervalo da escrita dos dados, número máximo de *Courant* e etc. No arquivo *fvSchemes* são ditados os esquemas numéricos de discretização à serem utilizados nas equações governantes. Aqui o software permite uma grande liberdade de escolha dos esquemas de interpolação, de cálculo de gradientes, divergentes, laplacianos, derivadas temporais etc. O arquivo *fvSolution* contém informações acerca da solução do sistema linear, algoritmos de cálculo, tolerâncias e fatores de relaxação. Para a solução de cada campo de interesse num determinado caso, é necessário que sejam configurados os métodos de solução das matrizes (simétricas e assimétricas) e os critérios de convergência numérica.

4.4.2 Subdiretório *Constant*

Neste diretório ficarão armazenados os dados acerca da geometria do caso, a descrição das propriedades físicas (densidade, viscosidade, modelos de turbulência...) envolvidas, bem como das condições de contorno. Todas essas informações foram declaradas e configuradas através de rotinas chamadas de dicionários ou *Dicts*. No OpenFOAM são utilizadas as unidades do Sistema Internacional (SI) para a descrição das devidas propriedades físicas para massa, volume etc. No subdiretório *polyMesh* estão guardadas as informações sobre

geometria e a malha do caso. O arquivo *blockMeshDict* é um arquivo do tipo dicionário onde são inseridas as informações sobre a geometria como vértices, blocos e informações sobre o refinamento da malha, para posterior criação da malha através do aplicativo *blockMesh*.

4.4.3 Subdiretório 0

Este é um subdiretório de tempo, contém os arquivos e dados individuais de cada variável física envolvida na solução do caso. O conteúdo deste diretório se refere às informações acerca das condições iniciais e de contorno que necessitam ser declaradas antes do início da solução, bem como os resultados obtidos durante a resolução ao longo do tempo. Os nomes com os quais são gravados os dados aos diretórios oriundos dos processos de solução, assim como o intervalo entre eles, serão aqueles especificados em *system/controlDict*. Uma vez que a solução seja iniciada em $t = 0$, as condições iniciais do problema serão aquelas que constam no diretório 0.

4.5 Solvers utilizados na simulação

As equações de conservação de massa, quantidade de movimento e transporte de escalares podem ser representadas pela equação de transporte genérica:

$$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} + \nabla(\rho U \phi) - \nabla(\rho \Gamma_{\phi} \nabla \phi) = S_{\phi}(\phi),$$

que é composta por quatro termos: o primeiro termo é o termo temporal, o segundo termo convectivo, o terceiro difusivo e o último é o termo fonte.

O método dos volumes finitos requer que cada termo dessa equação seja calculado sobre um volume de controle V , ao redor de um ponto P . Após a integração dessa equação no volume de controle temos uma equação diferencial, e o método dos volumes finitos consiste em obter a aproximação numérica dessa equação. A discretização é a integração de todos os termos da equação no espaço para cada volume de controle da malha.

4.5.1 Simulação dos campos de velocidade

Para simulação dos campos de velocidade foi utilizado o solver `pisoFoam` contido no pacote CFD OpenFOAM que é utilizado para simulações em regime transiente, baseado em processos iterativos capazes de avaliar a solução num dado instante de tempo e corrigi-la. O solver `pisoFoam` utiliza o algoritmo PISO (*Pressure-Implicit with Splitting of Operator*) como método de acoplamento pressão-velocidade.

Como critério de estabilidade foi utilizado o número de Courant (Co), que caracteriza a extensão relativa das oscilações numéricas. O número de Courant pode ser definido como uma variável local do domínio fluido que representa o fluxo numérico advectivo, e pode ser interpretado como a razão entre a distância percorrida por uma onda de perturbação em um passo de tempo e o tamanho local dos volumes de malha. É dado pela equação:

$$Co = \frac{U\Delta t}{\Delta x},$$

onde:

U = magnitude da velocidade local;

Δt = passo de tempo;

Δx = comprimento característico de um elemento da malha.

Com essa relação para garantir a estabilidade do modelo, quanto mais refinada a malha menor também será o passo de tempo, esse fato demanda muito tempo computacional. Assim visando garantir a estabilidade do modelo, a qualidade das soluções e o custo computacional mais baixo o solver `pisoFoam` utiliza uma função de ajuste de tempo, chamada de *adjustTimeStep*, de acordo com o número máximo de Co .

4.5.2 Simulação Traçador

Para simulação do uso do traçador foi utilizado o solver `scalarTransportFoam` que simula a injeção de um traçador do tipo degrau no sistema e gera como resultado a curva F . É simulado um traçador passivo escalar, que apresenta as mesmas características do fluido e sem difusividade. O transporte do traçador depende do campo de velocidade já calculado anteriormente pelo `pisoFoam`. O último passo de

tempo é importado para diretório 0 do `scalarTransportFoam`, e a equação de transporte é solucionada.

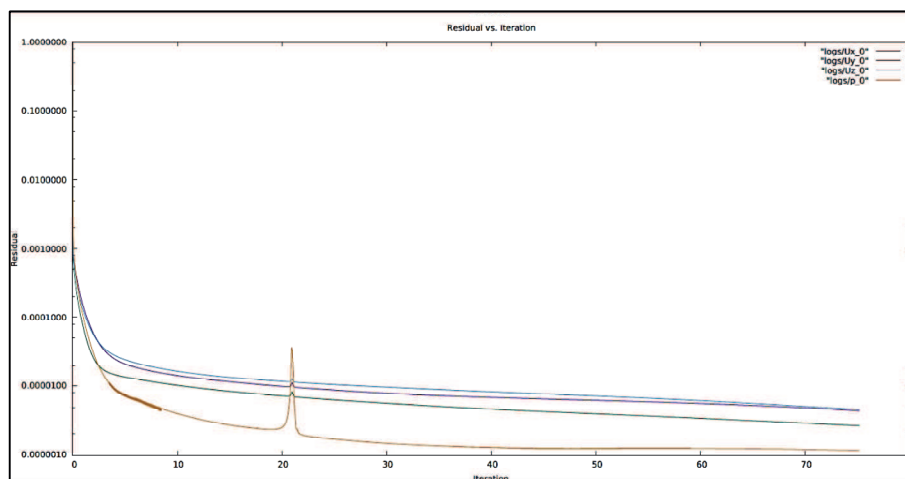
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Uma grande vantagem da modelagem computacional sobre a física é a riqueza de dados que podem ser extraídos no estágio de pós-processamento. Mas o trabalho computacional é realmente validado quando comparado a trabalhos experimentais, um processo completa o outro. Não foi possível a realização da parte experimental da pesquisa, pois o TC usado na simulação é o tanque utilizado na ETA e possíveis experimentos poderiam afetar a qualidade da água.

Alguns estudos experimentais foram encontrados na literatura com TC, porém as geometrias e regimes de escoamento diferem do atual objeto do estudo, por isso não foi possível o uso dos dados experimentais presentes na literatura para validar o modelo.

A primeira análise realizada foi o gráfico dos resíduos, para cada iteração um erro ou resíduo é reportado, para verificar se o critério de convergência foi atingido. Foi determinado como critério de convergência um resíduo na ordem de 10^{-6} , como representado na Figura 7 o critério de convergência foi alcançado.

Figura 7 – Gráfico dos Resíduos versus número de iterações.



5.1 Campo de Velocidade

Na Figura 8 estão representados os campos de velocidade sobre o plano longitudinal xy (vista superior), uma altura z de 1,50 m, girado 90° para melhor visualização, onde se observa pontos de baixa velocidade nas extremidades do TC caracterizando a presença de zonas mortas nessas regiões. A presença de zonas mortas prejudica o processo de desinfecção pois nessas áreas não haverá contato

entre a água e cloro. A Figura 9 apresenta o plano inserido na geometria em perspectiva.

Figura 8 – Gráfico de contorno para magnitude da velocidade, vista superior (z = 1,5).

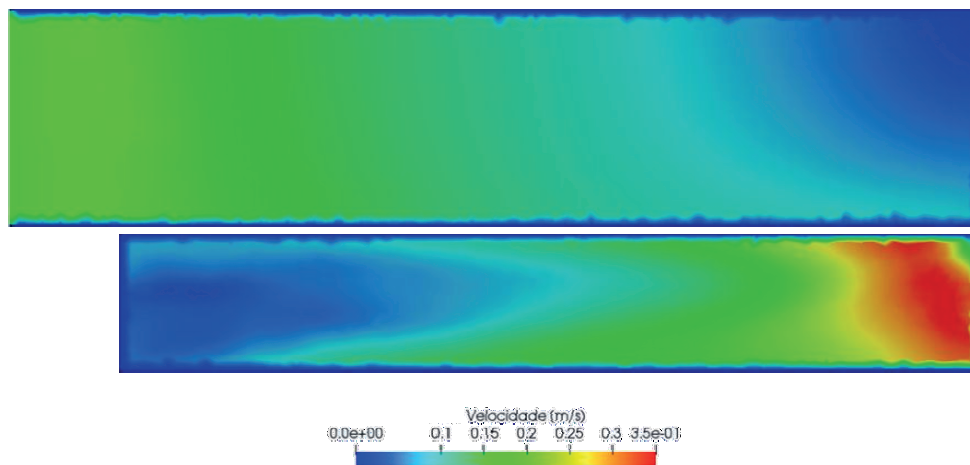
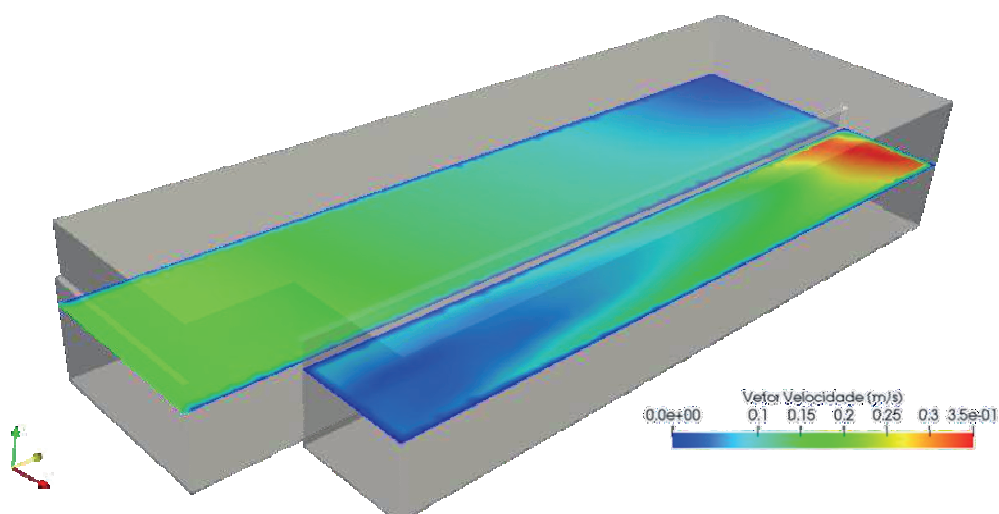


Figura 9 – Gráfico de contorno para magnitude da velocidade, vista perspectiva (z = 1,5).



5.2 Linhas de Corrente e Campo Vetorial

Na Figura 10 estão representadas as linhas de corrente de velocidade da água dentro do TC. No compartimento2 foi observado uma zona de recirculação, com a formação de vórtices. O centro dos vórtices são regiões com baixa velocidade, ou seja, nessas regiões o contato entre o cloro e água ficará comprometido, prejudicando assim o processo de desinfecção.

Na Figura 11 está ilustrado os vetores de velocidade e padrão de fluxo simulado. Os vetores indicam a direção e o sentido dos vetores de velocidade, na

entrada do tanque o fluxo segue ordenado, sem zonas de recirculação e caminhos preferenciais. Quando a água verte sobre a parede para o segundo compartimento é observada a mudança no padrão de escoamento com a formação de zonas de recirculação.

Figura 10 – Linhas de corrente de velocidade. a) Vista frontal do tanque de contato; b) Vista superior do tanque de contato e c) Vista em perspectiva do tanque de contato.

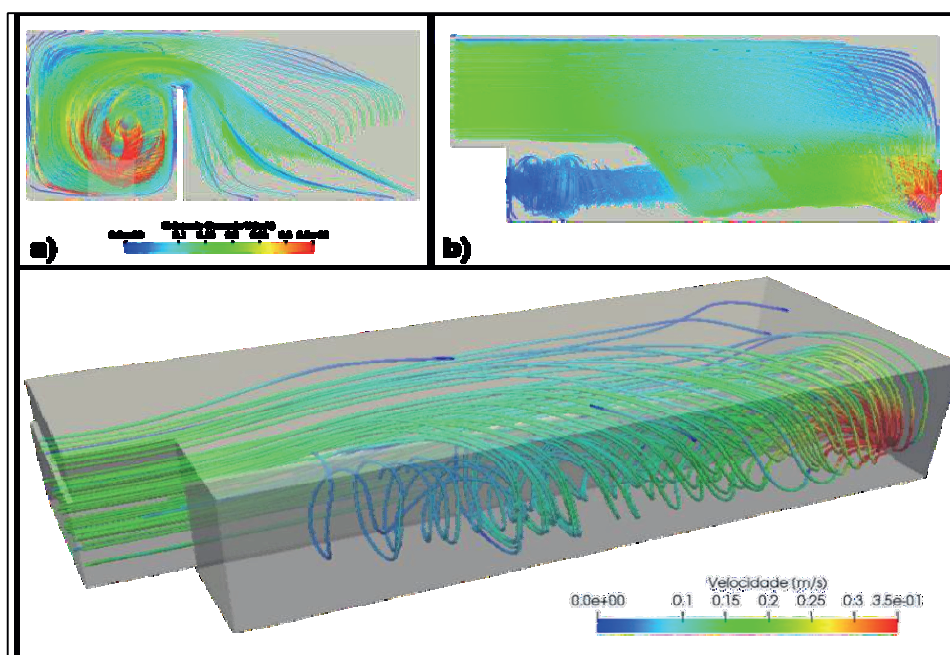
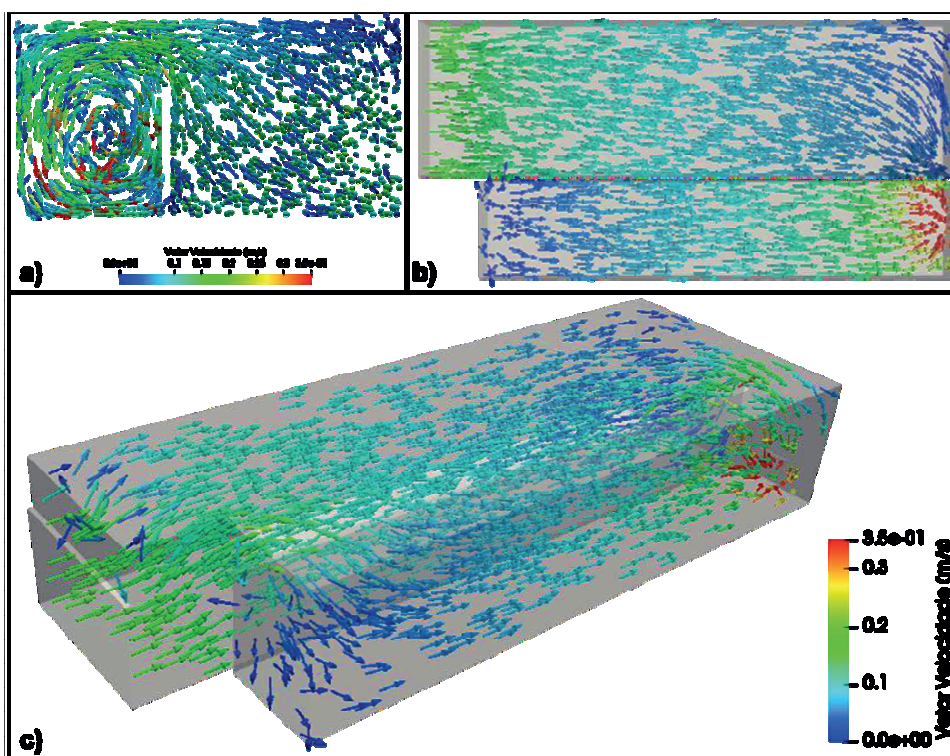


Figura 11 – Campos vetoriais de velocidade. a) Vista frontal do tanque de contato; b) Vista superior do tanque de contato e c) Vista em perspectiva do tanque de contato.



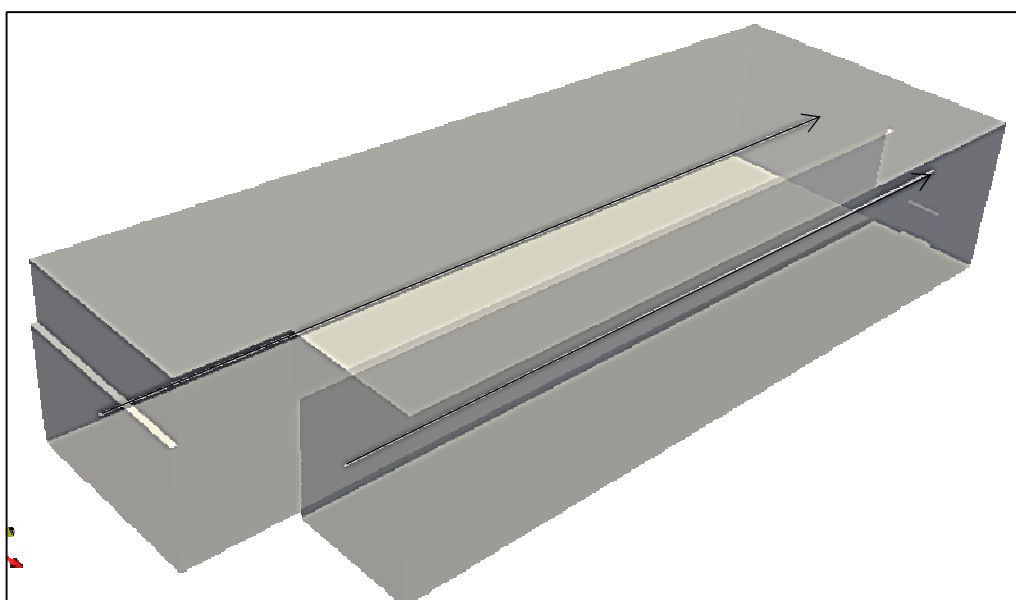
5.3 Perfis de Velocidade

Os perfis de velocidade foram obtidos através do software de pós-processamento ParaView. Foi traçado uma linha no centro dos compartimentos, como ilustrado na Figura 12, nos pontos apresentados na Tabela 6:

Tabela 6 – Pontos das linhas dos perfis de velocidade na direção y.

	P1	P2
Compartimento 1	(1,75 0,00 1,50)	(4,60 1,80 1,50)
Compartimento 2	(1,75 15,80 1,50)	(4,60 15,80 1,50)

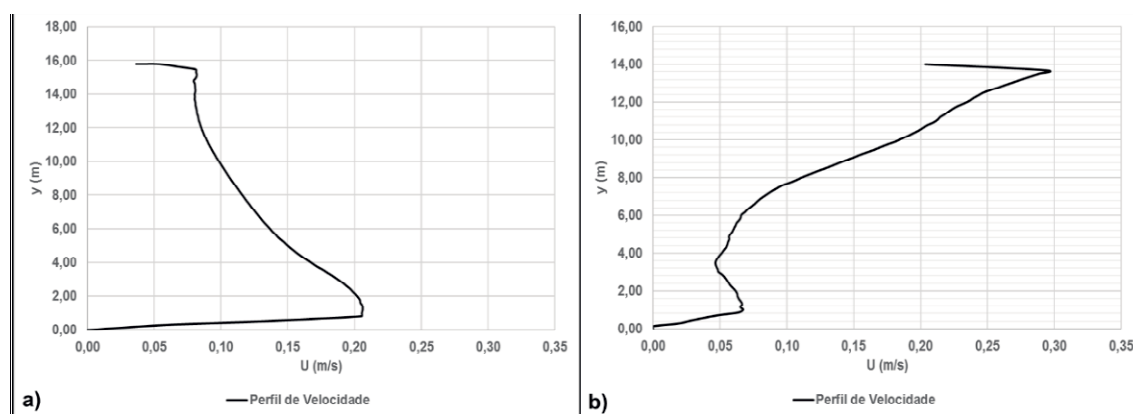
Figura 12 – Ilustração das linhas dos perfis de velocidade na direção y.



E traçado o perfil de velocidade, os dados obtidos estão mostrados na Figura 13. O compartimento 1 apresenta um pico de velocidade na entrada e uma diminuição da mesma ao final do TC. Esse resultado comprova o que já foi visto nos campos de velocidade, que há uma zona de baixa velocidade no final do compartimento1, caracterizando uma região de zona morta.

O compartimento 2 é o inverso do compartimento 1, apresenta um pico de velocidade no final do compartimento e no início apresenta zonas com baixos valores de velocidade. No final do compartimento apresenta um pico de velocidade de mais 0,29 m/s que é a maior velocidade encontrada dentro do TC.

Figura 12 – Perfis de Velocidade na direção y do tanque de contato. a) Perfil de Velocidade no compartimento 1; b) Perfil de Velocidade no compartimento 2.

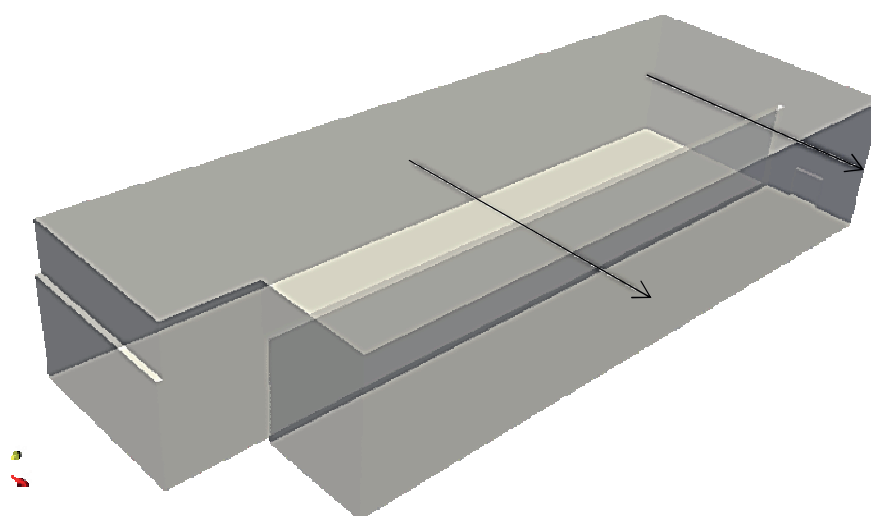


A mesma metodologia foi aplicada para obtenção dos perfis de velocidade na direção x, como ilustrado na Figura 14. Os pontos utilizados estão apresentados na Tabela 7:

Tabela 7 – Pontos das linhas dos perfis de velocidade na direção x.

	P1	P2
Centro do Tanque	(0,00 7,95 1,5)	(5,85 7,95 1,5)
Final do Tanque	(0,00 15,5 1,5)	(5,85 15,5 1,5)

Figura 13 – Ilustração das linhas dos perfis de velocidade na direção x.

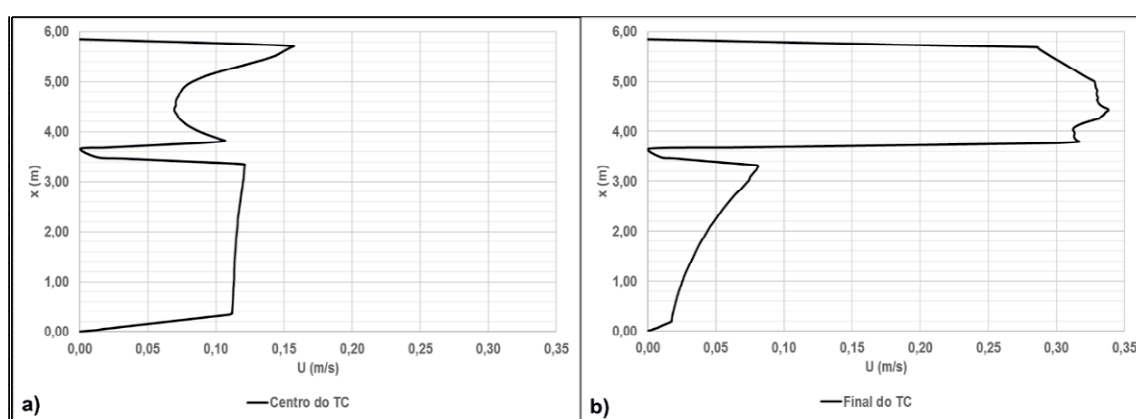


Na Figura 15 pode ser observado uma mudança significativa no padrão do escoamento nesse perfil. No centro do TC o compartimento 1 apresenta um perfil de

velocidade constante, já no compartimento 2 temos um decaimento da velocidade no centro da curva, caracterizando o centro dos vórtices formados.

O perfil no final do TC apresenta uma queda significativa da velocidade no compartimento 1 de valores entre 0,1 e 0,15 m/s para valores entre 0 e 0,8. Já no compartimento 2 temos um salto no perfil de velocidade, apresentando um pico de velocidade de 0,33 m/s.

Figura 14 – Perfis de Velocidade na direção x do tanque de contato. a) Perfil de Velocidade no centro do TC; b) Perfil de Velocidade no final do TC.

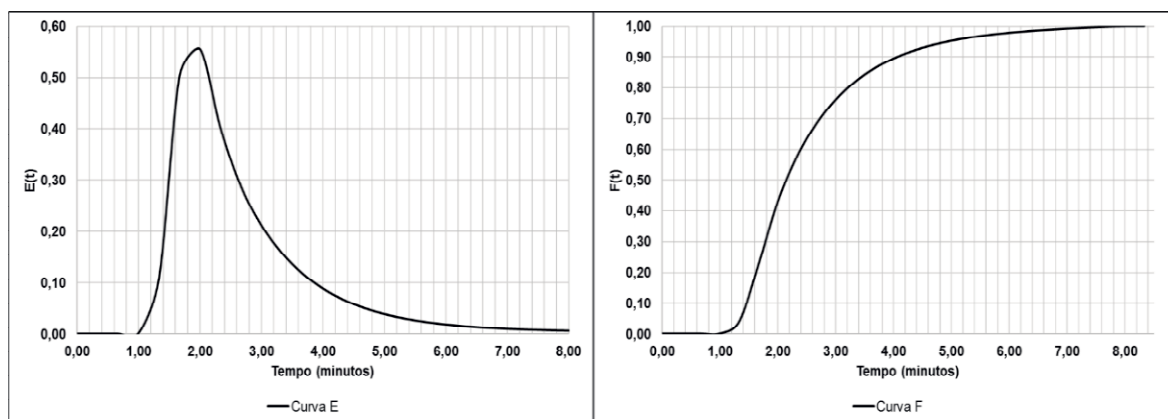


5.4 Curvas DTR

Para obtenção das curvas normalizadas DTR foi utilizado o solver *scalarTransportFoam*, que simula a injeção do tipo degrau de um passivo escalar, tendo como curva resposta do solver a curva $F(t)$. Ilustradas na Figura 16, tem-se no eixo das ordenadas os valores de $E(t)$ e $F(t)$ que representam a distribuição de saída do traçador, e no eixo das abscissas o parâmetro t que representa o tempo em minutos.

A análise das curvas DTR também permitiu inferir que o TC apresenta um comportamento próximo ao regime de escoamento pistão com dispersão, condizente com o que era esperado, tendo em vista que na revisão de literatura o escoamento de tanques de contato tendem a este tipo de escoamento.

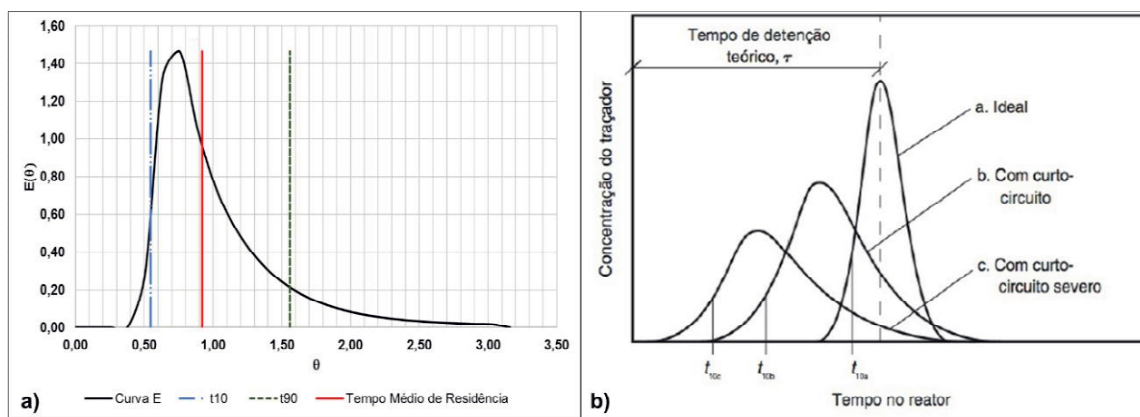
Figura 15 – Curvas de resposta de passagem do traçador. a) Curva E(t); b) Curva F(t).



5.4.1 Comparação do tempo de residência teórico com o tempo médio simulado.

Com base nos valores de $E(t)$, foi possível determinar o tempo de residência médio para simulação realizada, que foi de 2,43 minutos. O TDH teórico calculado foi 2,64 minutos, os valores estão apresentados na Figura 13. Observa-se que o pico principal ocorre antes do TDH teórico, ou seja, caracteriza uma saída antecipada do fluido. Essa saída antecipada do fluido pode ocorrer pela presença de curtos-circuitos. Pelo desvio apresentado, do centro da curva antes do tempo de residência teórico, constata-se de acordo com Metcalf e Eddy (2016) a presença de um curto-circuito severo.

Figura 16 – a) Relação entre a Curva E e os tempos de residência médio e o TDH teórico. b) Curva resposta normalizada de um ensaio com traçador.



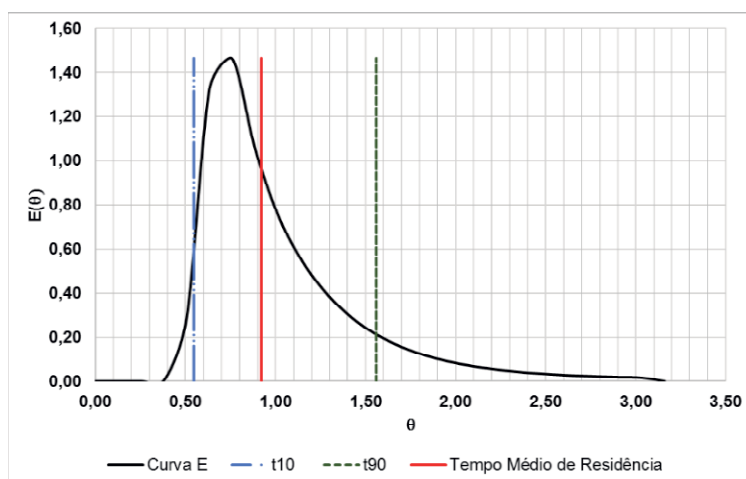
5.5 Indicadores de Eficiência Hidráulica

Através da curva $E(t)$ acumulada foram obtidos os valores de t_{10} e t_{90} . Os valores normalizados encontrados são: $t_{10} = 0,55$ minutos e $t_{90} = 1,56$ minutos, estão representados graficamente na Figura 18. Com esses valores $t_{10} = 1,44$ e $t_{90} = 4,11$ foi calculado o índice de Morril que está mostrado na Tabela 8. Segundo Siqueira (1999) o índice de dispersão σ^2 apresenta grande confiabilidade estatística do grau de mistura, pois relaciona toda a curva de passagem, representando melhor o comportamento do que o índice de Morril, que defini apenas os extremos. A presença de zonas mortas e curtos-circuitos podem influenciar no resultado do índice de Morril. O valor encontrado do índice de dispersão normalizado foi de 0,31 e o índice de Morril foi 2,85, que representa uma eficiência volumétrica do TC de 35%.

Tabela 8 – Valores dos IEH encontrado na simulação.

IEH	Resultado da Simulação (minutos)
t_i	1,00
t_{10}	1,44
t_{90}	4,11
t_p	2,00
Mo	2,85
σ^2	0,31

Figura 17 – Curva normalizada com indicação dos valores de tempo médio de residência, t_{10} e t_{90} .



Os indicadores de curto circuito avaliados foram os valores de t_i , t_{10} , e t_p obtidos através da simulação foram respectivamente 1,00, 1,44 e 2,00 minutos. O curto-circuito ocorre quando o fluxo segue caminhos preferenciais dentro do TC, ocasionando uma saída antecipada do fluido. Esse processo afeta a desinfecção, pois o tempo de contato correto é um parâmetro determinante para uma boa desinfecção. A ocorrência de curto-circuito indica a existência de pouca ou nenhuma troca de material com regiões bem misturadas, com isso não há ocorrências de reações diminuindo a eficiência do processo de desinfecção (ANGELOUDIS, 2014).

O valor de t_i foi 1,64 minutos abaixo do tempo teórico esperado, caracterizando a ocorrência de curtos-circuitos dentro do TC. Assim como o t_i , o indicador t_p trata 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 .

A eficácia dos tanques de contato para desinfecção é determinada pela relação CT: concentração do desinfetante e tempo de contato. O valor t_{10} que é o tempo necessário para que 10% do fluido saia do tanque, ou o tempo em que 90% do fluido está retido no tanque e submetido ao contato com o desinfetante. Um valor t_{10}/T alto, próximo de um, permitirá a unidade de tratamento obter um alto nível de desinfecção para uma dada concentração de desinfetante. A relação entre t_{10} e o tempo de detenção hidráulico teórico (TDH) determina a eficiência hidráulica da unidade de tratamento (XU, 2010).

A Tabela 9 apresenta os resultados dos índices encontrados na simulação comparados aos valores estabelecidos para os tipos de escoamentos ideais. Os resultados da simulação se aproximam dos valores apresentados na tabela para fluxo pistão com dispersão, esse fato pode ser explicado devido ao segundo compartimento, onde há formação de vórtices turbulentos resultando numa dispersão turbulenta.

Tabela 9 – Comparação entre os valores encontrados na simulação e os parâmetros para fluxos ideais.

IEH	Tipos de Escoamento			
	Pistão(*)	Mistura Completa(*)	Pistão com Dispersão(*)	Resultado Simulação

$\frac{t_{10}}{\tau}$	1,0	0,11	0,81	0,55
σ_{θ}^2	0,0	1,0	0,027	0,31
Mo	1,0	22,8	1,52	2,85

Fonte: (*) Angeloudis (2014)

Para avaliação de zonas mortas no TC foi analisada a relação entre o tempo de residência médio (t_m) e o tempo teórico de detenção hidráulica (TDH). O valor do t_m de 2,43 minutos, menor do que o valor do TDH calculado que foi de 2,64 minutos. Esse valor pode ser explicado pelo modelo do tanque, que apresenta uma parede onde a água verte de um compartimento para a outra, a água verte por toda seção longitudinal da parede, com isso as regiões mais próximas a saída têm tempo de residência bem inferior ao esperado.

As relações comprimento e largura de pelo menos 20 para 1, preferencialmente 40 para 1, e o uso de chicanas diminuem consideravelmente a ocorrência de curtos-circuitos no TC (METCALF e EDDY, 2016). Na geometria objeto de estudo não temos nenhum desses critérios atendidos.

Angeloudis (2014) avaliou os IEH em diferentes geometrias comparando os dados da simulação com dados experimentais. A Tabela 10 apresenta os resultados obtidos no estudo. O HEI são os indicadores de eficiência hidráulicos e CT – 1, CT – 0, MS – 1, MS – 2 e MS – 3 são diferentes arranjos de geometria, as geometrias estão representadas na Figura 1.

Tabela 10 – Resultado do estudo de Angeloudis (2014).

IEH	CT – 1		CT – 0		MS – 1		MS – 2		MS – 3	
	CFD	EXP	CFD	EXP	CFD	EXP	CFD	EXP	CFD	EXP
σ^2	0,085	0,095	0,048	0,055	0,198	0,224	0,401	0,306	0,637	0,534
t_{10}	0,73	0,73	0,76	0,78	0,53	0,50	0,39	0,37	0,17	0,16
t_{90}	1,46	1,50	1,29	1,32	1,76	1,69	2,06	1,81	2,07	1,84
Mo	2,00	2,05	1,68	1,69	3,30	3,38	5,31	4,89	12,4	11,5

Fonte: Angeloudis (2014).

6 CONCLUSÃO

As simulações em CFD apresentaram resultados condizentes, qualitativamente, com o esperado para a geometria e regime de escoamento do TC. Os perfis de velocidade no compartimento 1 apresentaram um perfil pistonado e os perfis do compartimento 2 apresentaram zonas de baixa velocidade no centro da câmara, que já era previsto devido aos vórtices formados. Os campos de velocidade mostraram claramente a presença de zonas mortas nas extremidades das câmaras, essas zonas diminuem a eficiência hidráulica do TC, pois nessas regiões não há contato entre a água e cloro, e a água não é renovada.

As curvas de distribuição de tempo de residência indicaram o tipo de escoamento mais próximo do tipo pistonado com dispersão, apresentando desvios como a ocorrência de curtos-circuitos e zonas mortas. O tempo médio de residência apresentou um resultado próximo ao valor de tempo de detenção hidráulico médio. A relação entre $\frac{t_{10}}{\tau}$ apresentou um valor de 0,55, quando normalizado, indicando uma eficiência média do TC, pois quanto mais próximo de 1 esse valor, melhor a eficiência.

A utilização do software OpenFOAM permitiu a obtenção de valores de perfis de velocidade e curvas DTR, mas para um aproveitamento melhor da ferramenta seria necessário um trabalho experimental. Com esse tipo de trabalho é possível quantificar com mais eficácia os dados de setup do caso e verificar se os resultados estão de acordo com margem de erro estipulada. O software permite estudos avançado sobre o tema, porém é necessário um conhecimento prévio e mais profundo sobre programação, métodos numéricos, construção de geometria e malha.

Simulações com mudanças na geometria podem ser realizadas para possíveis propostas de melhoria para o TC como o estudo com a implantação de chicanas, ocasionando uma mudança no regime de escoamento, e melhorando o tempo de contato dentro do TC. O estudo mostraria qual o melhor arranjo traria maior eficiência para o processo.

REFERÊNCIAS

American Water Works Association, (1990). *Water Quality and Treatment: a Handbook of Community Water Supplies*. McGraw-Hill.

AMINI, R.; TAGHIPOUR, R.; MIRGOLBABAEI, H. Numerical assessment of hydrodynamic characteristics in chlorine contact tank. **International journal for numerical methods in fluids**, [S.l.], n. 67, p. 885-898, set. 2010. Disponível em: <<http://wileyonlinelibrary.com>>. Acesso em: 25 nov. 2018.

ANGELOUDIS, Athanasios et al. Flow, transport and disinfection performance in small- and full-scale contact tanks. **Jornal of Hydro-environment Research**, [S.l.], n. 9, p. 15-27, jul. 2014. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1570644314000410>>. Acesso em: 25 nov. 2018.

ANGELOUDIS, Athanasios. **Numerical and experimental modelling of flow and kinetic processes in serpentine disinfection tanks**. 2014. 193 p. Tese (Doctor of Philosophy)- Cardiff School of Engineering, Cardiff University, [S.l.], 2014. Disponível em: <<http://orca.cf.ac.uk/58914/>>. Acesso em: 25 nov. 2018.

ARAÚJO, Morgana de Vasconcellos. **Avaliação do escoamento bifásico na presença de vazamento em oleodutos horizontais**: modelagem e simulação. 2012. 78 p. Monografia (Bacharel em Engenharia Química) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2012.

AZEVEDO NETTO, J. M., FERNANDEZ, M. F., ARAÚJO, R., ITO, A.E. - "**Manual de Hidráulica**". Ed. Edgard Blucher Ltda, 8ª Edição. São Paulo, 1998.

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.

CARLSTON, Jeremy S. **Impact of geometric design of hydraulic contact tanks on residence time distributions**. 2015. 125 p. Dissertação (Master of Science) - Colorado State University, Fort Collins, 2015.

CESTARI, Jesus Leonardo. **Estudo Hidrodinâmico de Floculadores Mecanizados Aplicados ao Tratamento de Água**. 2011. 78 p. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil.) - Faculdade de Engenharia - UNESP, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2011. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/98078/cestari_jl_me_ilha.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 25 nov. 2018.

CRITTENDEN, John C. et al. **MWH's Water Treatment: Principles and Design**. 3. ed. New Jersey: Wiley, 2012. 1906 p.

FERZIGER, Joel H.; PERIC, Milovan. **Computational methods for fluid dynamics**. 3. ed. [S.l.]: Springer, 2002. 431 p.

FIGUEIREDO, David Manuel Duarte. **Modelação do decaimento do cloro em sistemas de abastecimento de água**. 2014. 114 p. Dissertação (Mestre em Engenharia do Ambiente)- Técnico Lisboa, Portugal, 2014.

FOGLER, H. S. **Elementos de Engenharia das Reações Químicas**. 4a edição, LTC Editora, Rio de Janeiro, 2009.

FORTUNA, A. O. **Técnicas computacionais para dinâmica dos fluidos: conceitos básicos e aplicações**. São Paulo: EDUSP, 2000.

GREENSHIELDS, Christopher J. **OpenFOAM: User Guide**. Version 6. [S.l.: s.n.], 2018. Disponível em: <<http://foam.sourceforge.net/docs/Guides-a4/OpenFOAMUserGuide-A4.pdf>>. Acesso em: 25 nov. 2018.

JATOBÁ, Livia Flavia Carletti. **Simulação do escoamento de misturas contínuas usando quadratura adaptativa**. 2010. 89 p. Dissertação (Mestre em Ciências em Engenharia Química)- Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

JOHNSON, J. **Measurement and persistence of chlorine residuals in natural waters**. In: Jolley, R.L., et al. (Eds.), *Water chlorination: environmental impact and health effects*, v. 1, n. 37, Ann Arbor Science, Ann Arbor, MI, 1978.

JUNIOR, Charles G. Hill; ROOT, Thatcher W. **Introduction to Chemical Engineering Kinetics and Reactor Design**. 2. ed. Madison: Wiley, 2014. 574 p.

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

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

METCALF, L.; EDDY, H. **Tratamento de efluentes e recuperação de recursos**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016. 2012 p.

PARSEKIAN, M. P. S.; CORDEIRO, J. S. . Aquisição de produtos químicos em ETA: avaliação crítica. *Saneamento Ambiental*, v. 05, n.maio/junho, p. 50-54, 2003

RAUEN, W. B., (2005). *Physical and Numerical Modelling of 3-D Flow and Mixing Processes in Contact Tanks*. PhD Thesis, Cardiff University.

RAUEN, William B.; ANGELOUDIS, Athanasios; FALCONER, Roger A. Appraisal of chlorine contact tank modelling practices. **Water Research**, [S.l.], p. 5834-5847, ago. 2012. Disponível em: <<http://www.elsevier.com/locate/watres>>. Acesso em: 25 nov. 2018.

Rodi, W., (1993). *Turbulence Models and Their Application in Hydraulics*. 3rd ed., Taylor&Francis.

SILVA, PAULO VICTOR SOARES E. **Física do escoamento multifásico: Uma abordagem computacional utilizando o software OpenFoam**. 2014. 81 p. Monografia (Bacharel em Física)- Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.

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.

SIQUEIRA, Renato do Nascimento; REISEN, Valdério; TEIXEIRA, Edmilson Costa. 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., 99, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Abes, 1999. p. 734-743. Disponível em: <<http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/brasil20/i-138.pdf>>. Acesso em: 25 nov. 2018.

STAMOOU, Anastasios I. Improving the hydraulic efficiency of water process tanks using CFD models. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, [S.l.], p. 1179-1189, abr. 2007. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0255270107001493>>. Acesso em: 25 nov. 2018.

TEIXEIRA, E. C. *Hydrodynamic processes and hydraulic efficiency of chlorine contact units*. 1993. p. 260. Thesis (Doctor of Philosophy), University of Bradford, U.K., 1993.

UNESCO. **Relatório WWDR 2018**. Disponível em: <http://www.unesco.org/new/en/natural-sciences/environment/water/wwap/wwdr/>. Acesso em: 28/11/2018.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method**. [S.l.]: Longman Scientific & Technical, 1995. 267 p.

XU, Qing. **Internal hydraulics of baffled disinfection contact tanks using computational fluid dynamics**. 2014. 193 p. Tese (Master of Science)- Colorado State University, Fort Collins, 2010. Disponível em: <https://mountainscholar.org/bitstream/handle/10217/41260/2010_Summer_Xu_Qing.pdf?sequence=1>. Acesso em: 25 nov. 2018.

ZECHMAN, E. M. Agent-based modeling to simulate contamination events and evaluate threat management strategies in water distribution systems. **Risk Analysis**, v. 31, n. 5, 2011.

ZHANG, Jie. **Numerical Simulation of Flow in Ozonation Process**. 2014. 218 p. Tese (Doctor of Philosophy)- College of Engineering, University of South Florida, [S.l.], 2014. Disponível em: <<http://scholarcommons.usf.edu/etd/5161>>. Acesso em: 25 nov. 2018.