

II-127 – SIMULAÇÃO DE TESTE DE TRAÇADOR EM TANQUE DE CONTATO POR MEIO DE TÉCNICAS DE FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL

Rodrigo de Oliveira Marques⁽¹⁾

Engenheiro Ambiental pela Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba. Doutor e Mestre em Engenharia Hidráulica e Ambiental pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EP/USP). Water and Wastewater Engineer na Advisian (Worley).

André Luiz Marguti

Engenheiro Ambiental pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EP/USP). Doutor e Mestre em Engenharia Hidráulica e Ambiental pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EP/USP). Water and Wastewater Engineer Specialist na Advisian (Worley).

Lúcio Monteiro de Sá

Engenheiro Mecânico pela Universidade Federal do Paraná (UFPR). Water and Wastewater Engineer na Advisian (Worley).

Matheus Arndt de Souza

Engenheiro Ambiental pela Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS). Mestre em Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC/USP). Water and Wastewater Engineer na Advisian (Worley).

Endereço⁽¹⁾: Avenida Alfredo Egídio de Souza Aranha, 100, Bloco C, 10º Andar – Chácara Santo Antonio – São Paulo – SP - CEP: 04726-170 - Brasil - Tel: (11) 9-8303-4202 - e-mail: rodrigo.marques@advisian.com

RESUMO

O objetivo deste trabalho é apresentar os resultados obtidos após a realização de testes de traçador por meio de simulações de fluidodinâmica computacional (*Computational Fluid Dynamics – CFD*). Durante o desenvolvimento de um projeto de readequação de uma estação de tratamento de efluentes industriais, foi identificada a oportunidade de conversão de uma elevatória existente em um tanque de contato. Visando verificar a aplicabilidade de simulações de CFD como uma ferramenta auxiliar durante a concepção de unidades de processo, realizou-se uma etapa adicional de verificação do dimensionamento convencional para validação da metodologia. Foram simulados testes de traçador virtuais em cada configuração de geometria selecionada para a conversão da elevatória (configurações C1 e C2), e para condições de vazão máxima média mensal (MM) e máxima média diária (MD) de projeto. Os resultados indicaram que ambas as configurações C1 e C2, apresentaram potencial para aplicação na readequação da elevatória para tanque de contato, uma vez que os tempos de residência médio estimados com as simulações de CFD foram próximos aos valores de TDH estimados por meio do dimensionamento convencional. Para a configuração C1, na condição de vazão MM, a simulação do teste de traçador indicou um tempo de residência médio de 16,2 minutos, enquanto o valor do TDH teórico foi de 17,5 minutos (diferença de 7%). Na condição de vazão MD, a simulação do teste de traçador resultou em um tempo de residência médio de 13,7 minutos, enquanto o valor de TDH teórico foi de 14,6 minutos (diferença de 6%). O mesmo comportamento foi observado para a configuração C2, na qual os valores teóricos de TDH para as condições de vazão MM e MD foram de 24,4 e 20,4 minutos, respectivamente e os testes de traçador simulados resultaram em tempos de residência médios de aproximadamente de 22,2 e 19,0 minutos (diferenças de aproximadamente 9% e 7%, respectivamente). A realização deste trabalho possibilitou verificar aplicabilidade de simulações de CFD em estágios iniciais de concepção de unidades de processo. Quando aplicadas considerando boas práticas de simulação, e para casos específicos, os resultados de simulações de CFD podem ser utilizados para enriquecer o entendimento sobre o comportamento da unidade em projeto.

PALAVRAS-CHAVE: CFD, simulação, teste de traçador, efluente industrial, tanque de contato.

INTRODUÇÃO

O aumento da disponibilidade de recursos computacionais tornou viável a aplicação de simulações de fluidodinâmica computacional (*Computational Fluid Dynamics – CFD*) em diversas etapas do ciclo de vida de estações de tratamento de água, esgoto e efluentes industriais. Neste contexto, destaca-se o crescente espaço para aplicação de simulações dessa natureza durante a etapa de concepção de unidades de processo, sejam

unidades completamente novas ou readequações de unidades já existentes (LAURENT *et al.*, 2022; LIU; ZHANG, 2019). E especialmente quando o caso em estudo se enquadra em um cenário no qual uma etapa de validação e/ou calibração experimental não é estritamente necessária.

A Figura 1, adaptada do Relatório Técnico do Grupo de Trabalho de Fluidodinâmica Computacional da Associação Internacional de Águas (IWA), apresenta uma visão esquemática das principais frentes de aplicação de simulações de CFD no âmbito do tratamento de águas e efluentes e o nível de validação necessário (LAURENT *et al.*, 2022).

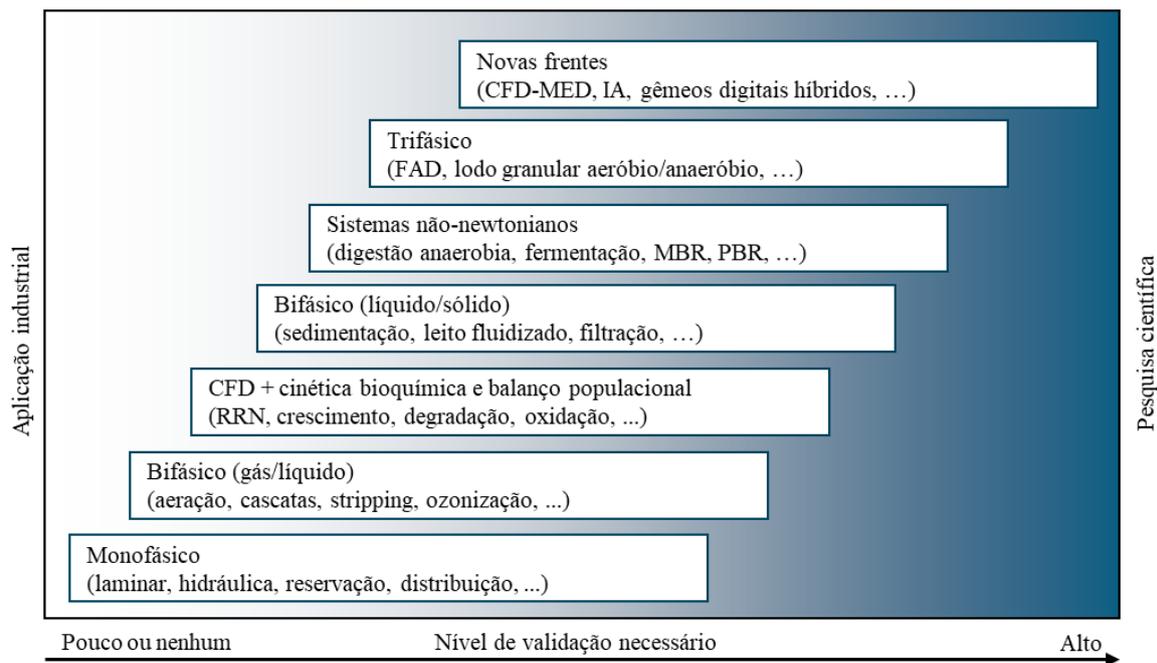


Figura 1 – Nível de validação necessário em função do tipo de aplicação de simulações de CFD no âmbito do tratamento de águas e efluentes. Adaptado de Laurent *et al.*, (2022). MED: método dos elementos discretos; IA: inteligência artificial; FAD: flotação por ar dissolvido; MBR: biorreator de membranas; PBR: fotobiorreator; RRN: remoção e recuperação de nutrientes).

Nota-se que a elevação da complexidade das simulações resulta, naturalmente, em um deslocamento para o lado direito da Figura 1 e, portanto, à maior exigência de validação experimental. Entretanto, diversos casos que podem ser encontrados durante a concepção de unidades de processo podem enquadrados no setor esquerdo da Figura 1 e, portanto, com baixa exigência de validação experimental. Isso é consequência da constante “validação” dos modelos disponibilizados em softwares comerciais frente a problemas reais, possibilitando assim a extração de boas práticas de simulação a partir de casos que já tenham sido validados previamente. Dessa forma, usuários podem aplicar tais práticas em casos “usuais”, de forma que o esforço para validação seja direcionado para novas frentes, tal como indicado na Figura 1 (LAURENT *et al.*, 2022; LIU; ZHANG, 2019).

Nesse contexto, uma das vertentes que apresenta potencial para aplicação durante a concepção de unidades de processo é a simulação de testes de traçador para diferentes condições de contorno. Testes de traçador permitem estimar o tempo de residência médio (t_m) em uma unidade de processo, possibilitando a comparação com o tempo de detenção hidráulica (TDH) teórico, auxiliando na identificação de eventuais volumes mortos não utilizados para a reação pretendida na unidade. Adicionalmente, podem ser verificados os impactos no campo de escoamento decorrentes de uma alteração na concepção da geometria da unidade, ou mesmo o comportamento desta unidade frente a variações de vazão (AWWA, 2011; CRITTENDEN *et al.*, 2012; FERREIRA FILHO, 2021; TCHOBANOGLIOUS *et al.*, 2014).

Durante o desenvolvimento de um projeto de readequação de uma estação de tratamento de efluentes industriais, foi identificada a oportunidade de conversão de uma elevatória existente em um tanque de contato. Visando verificar a aplicabilidade de simulações de CFD como uma ferramenta auxiliar durante a concepção de unidades

de processo, foi realizado uma etapa adicional de verificação do dimensionamento convencional para validação do processo. Nesta etapa, foram simulados testes de traçador virtuais em cada configuração de geometria selecionada para a conversão da elevatória, para diferentes condições de vazão (média e de pico). O objetivo deste trabalho é apresentar os resultados obtidos nessa etapa adicional.

MATERIAIS E MÉTODOS

Vazões de projeto

Na primeira etapa realizada pelo trabalho foram definidas as vazões de interesse para o projeto. De acordo com as premissas determinadas ao longo do desenvolvimento do projeto, foram definidas 2 (duas) condições de vazão, sendo estas: vazão máxima média mensal (denominada vazão MM) de 1.384 m³/h (\approx 385 L/s) e vazão máxima média diária (denominada vazão MD) de 1.660 m³/h (\approx 461 L/s).

Dimensionamento convencional

Uma vez definidas as vazões de interesse para o projeto, prosseguiu-se com o dimensionamento convencional da conversão da elevatória existente para tanque de contato. Foram definidas 2 (duas) configurações diferentes para o tanque de contato, sendo que a diferença entre elas consistiu na variação da altura útil da unidade. Na Configuração 1 (C1) foi mantida a altura útil já existente na unidade (2,5 m) e adicionadas chicanas na região interna da unidade. Já na Configuração 2 (C2) foi prevista também elevação dessa altura para 3,5 m, além da introdução das chicanas. A Tabela 1 apresenta um resumo do dimensionamento convencional realizado.

Tabela 1 – Resumo do dimensionamento convencional de conversão da elevatória para tanque de contato.

Descrição	C1 MM	C1 MD	C2 MM	C2 MD	Unidades
Número de tanques em operação	1	1	1	1	unidades
Vazão por tanque	0,385	0,461	0,385	0,461	m ³ /s
Comprimento interno existente	23,0	23,0	23,0	23,0	m
Largura interna existente	7,0	7,0	7,0	7,0	m
Altura útil	2,5	2,5	3,5	3,5	m
Volume do tanque existente	402,5	402,5	563,5	563,5	m ³
Número de passagens adotadas	4	4	4	4	passagens
Número de anteparos (chicanas)	3	3	3	3	anteparos
Largura adotada para anteparos (chicanas)	0,2	0,2	0,2	0,2	m
Largura das passagens	1,60	1,60	1,60	1,60	m
Área transversal de cada passagem	4,00	4,00	5,60	5,60	m ²
Velocidade média de escoamento	0,096	0,115	0,069	0,082	m/s
Perímetro molhado	8,2	8,2	10,2	10,2	m
Raio hidráulico - R _H	0,4878	0,4878	0,5490	0,5490	m
Comprimento total - L	92,00	92,00	92,00	92,00	m
Tempo de detenção hidráulico teórico	17,4	14,5	24,4	20,4	minutos

Simulações de CFD

Após as definições apresentadas previamente, deu-se início à etapa de construção dos modelos digitais das configurações C1 e C2 e execução dos testes de traçador por meio de simulações de CFD. Essa etapa foi integralmente desenvolvida com o pacote de softwares da Ansys®, versão R2 2022, instalado em 1 (um) notebook empresarial com as seguintes características:

- Marca: Dell® Latitude 5420;
- Processador: Intel® Core™ i7 da 11ª Geração (i7-1185G7) @ 3,00 GHz;
- Memória instalada: 16 GB;
- Sistema operacional: Windows 10 Enterprise.

Inicialmente, o volume útil interno da elevatória existente foi representado digitalmente com auxílio do software SpaceClaim®, em suas dimensões originais: 23,0 m de comprimento, 7,0 m de largura e 2,5 m de altura útil. Isso porque, a abordagem selecionada para este estudo foi de simular apenas o fluido, não sendo necessário representar a estrutura sólida na construção das geometrias (ANSYS, 2022a, 2022b). A partir da geometria original, foram criadas as configurações C1 e C2, nas quais foram adicionadas as chicanas conforme as premissas apresentadas na Tabela 1. Na configuração C1, foram acrescentadas três (3) paredes internas de 20 cm de espessura para criar, no total, quatro (4) passagens de 1,6 m de largura, mantendo-se a altura útil original. Já na configuração C2, além das chicanas internas iguais às da configuração C1, a altura útil da unidade foi elevada de 2,5 m para 3,5 m.

Ainda dentro do processo de criação das geometrias, foram selecionadas as faces que representariam a entrada (*inlet*) e saída do tanque de contato (*outlet*). Para a entrada e saída foram selecionadas as faces das extremidades do primeiro e último canal, respectivamente, totalizando as áreas de passagem indicadas na Tabela 1. Nesse mesmo intuito, foi criada também uma face representando a superfície do líquido em contato com a atmosfera (denominada *top*). Para as simulações desse trabalho, foi assumida a premissa de “tampa fixa” (*rig lid*), na qual a lâmina de água é constante em toda a unidade e em contato com a atmosfera (sem atrito). As Figuras 2 e 3 apresentam vistas isométricas das configurações C1 e C2, com indicações da entrada e saída.

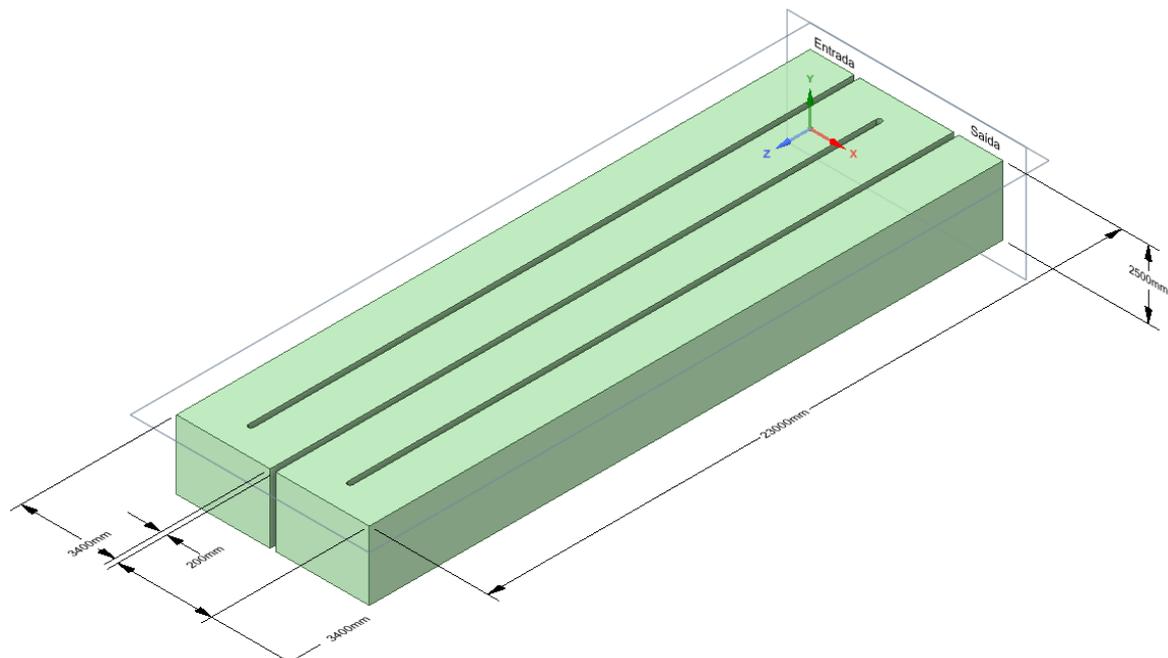


Figura 2 – Vista isométrica da configuração C1 de conversão da elevatória para tanque de contato.

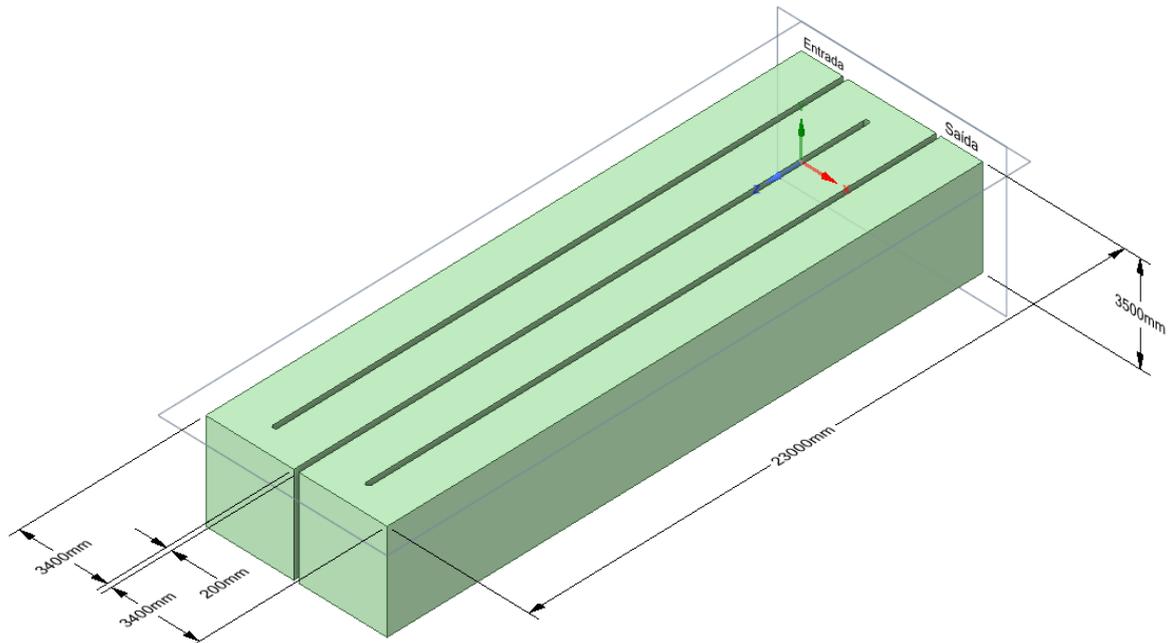


Figura 3 – Vista isométrica da configuração C2 de conversão da elevatória para tanque de contato.

Após a construção das geometrias de cada configuração, foram preparadas as malhas volumétricas com auxílio da funcionalidade interna de criação de malha do software Fluent® (denominada Fluent Meshing®). As malhas volumétricas foram construídas com células do tipo *polyhedra*, usualmente recomendada por sua estabilidade na convergência de soluções em diversos casos e menor demanda computacional (ANSYS, 2022a; 2022b; SOSNOWSKI; KRZYWANSKI; GNATOWSKA, 2017).

Foi realizada uma etapa de verificação da independência das soluções das simulações em relação ao processo de refinamento da malha. Esta verificação foi feita por meio Índice de Convergência de Malha (ICM), desenvolvido por Roache (1998). Foram realizadas 2 (duas) etapas de refinamento a partir de uma malha grosseira inicial para a configuração C1, uma vez que esta já contemplava a introdução das chicanas. O processo de refinamento foi realizado por meio da inflação do número de células nas paredes (*boundary layers*). Nesse sentido, a malha inicial (malha 1), foi criada com um fator de inflação de 5 e as malhas 2 e 3 com fatores de inflação de 10 e 20, respectivamente. A análise de ICM foi realizada verificando-se as seguintes variáveis na saída da geometria (*outlet*): velocidade de escoamento (média ponderada na área); índice de uniformidade de velocidade e vazão volumétrica na saída.

Este procedimento descrito resultou em uma malha inicial (malha 1) com 142.400 elementos. Já as malhas refinadas 2 e 3 apresentaram 233.375 e 474.074 elementos, respectivamente. A análise do ICM indicou que o segundo refinamento (malha 2 – 233.375 elementos) se mostrou suficiente, uma vez que um novo refinamento resultou em um aumento considerável do número de elementos, mas não alterou significativamente os resultados das variáveis selecionadas (acima de 5%). Portanto, as malhas finais de cada configuração (C1 e C2) foram criadas com base nas premissas do processo de refinamento 2 (malha 2), ou seja, com um fator de inflação de 10 para as células nas paredes. Ao final do processo de construção, as malhas volumétricas das configurações C1 e C2 apresentaram 233.375 e 280.405 elementos, respectivamente. As malhas criadas apresentaram uma qualidade ortogonal mínima superior a 0,3, atendendo à recomendação de um valor mínimo de 0,1 (ANSYS, 2021a, 2021b; SOSNOWSKI; KRZYWANSKI; GNATOWSKA, 2017).

Uma vez concluído o processo de criação das malhas, prosseguiu-se com a execução das simulações do campo de escoamento de cada cenário. Todas as simulações foram executadas em estado estacionário por pelo menos 5.000 iterações, com a opção de precisão dupla acionada, considerando o fluido no interior do tanque como água limpa a 20 °C. Os valores das vazões MM e MD foram convertidos para velocidade e atribuídas às faces de entrada (*inlet*) de cada geometria. Foi utilizado o esquema acoplado de solução (*Coupled*), e para as equações de quantidade de movimento, energia cinética turbulenta e taxa de dissipação específica, foi utilizado o esquema

numérico *Upwind* de segunda ordem. Para os residuais de todas as equações foi mantido valor padrão recomendado pela ANSYS de 10^{-3} , sendo complementarmente analisada a estabilidade da solução ao longo das iterações. Para a modelagem do fenômeno de turbulência, foi utilizada a abordagem RANS (*Reynolds Average Navier Stokes Equations*), na qual são usados modelos para fechar o sistema de equações de Navier Stokes após a aplicação da Decomposição de Reynolds. Dentre os modelos existentes para essa abordagem, foi selecionado o modelo de turbulência $k-\omega$ *Shear Stress Transport* (SST), que combina os benefícios de 2 (dois) modelos clássicos de turbulência (modelo $k-\omega$ e modelo $k-\epsilon$). O modelo foi utilizado em sua formulação padrão, incluindo o número turbulento de Schmidt de 0,7 (ANSYS, 2022a; 2022b; LAURENT *et al.*, 2022; MENTER *et al.*, 2021; VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

Após a resolução dos campos de escoamento de cada configuração, para ambas as condições de vazão (MM e MD), foram então simulados os testes de traçador. Para isso, o campo de escoamento base de cada simulação final foi “congelado”, sendo então acionado o modelo de transporte de espécies já existente no software Fluent®. Em seguida, criou-se digitalmente um material referencial denominado “traçador”, com as mesmas propriedades do fluido simulado (água limpa a 20 °C). Os testes de traçador foram do tipo pulso e as simulações foram realizadas em regime transiente e por um total de 5.000 segundos de tempo de escoamento. Durante a execução das simulações, acionou-se a opção de registrar o valor da fração mássica do traçador na saída de cada geometria (*outlet*) ao longo do tempo de escoamento simulado. Com os resultados, foi possível estimar o tempo de residência média do traçador em cada geometria por meio da Equação 1. Além disso, foram estimadas as curvas de distribuição de tempo de residência $E(t)$ e as curvas de distribuição acumulada de tempos de residência $F(t)$, por meio das Equações 2 e 3 (AWWA, 2011; CRITTENDEN *et al.*, 2012; LAURENT *et al.*, 2022; LEVENSPIEL, 1999; TCHOBANOGLIOUS *et al.*, 2014).

$$\bar{t} = \frac{\int_0^{\infty} tC(t) dt}{\int_0^{\infty} C(t) dt} \quad \text{Equação 1}$$

$$E(t) = \frac{C(t)}{\int_0^{\infty} C(t) dt} \quad \text{Equação 2}$$

$$F(t) = \int_0^t E(t) . dt \quad \text{Equação 3}$$

Sendo que,

\bar{t} = tempo de residência médio (T);

t = tempo de escoamento (T);

C(t) = concentração do traçador no tempo t ($M.L^{-3}$).

Uma vez obtidos os resultados dos valores de tempo de residência médio para cada configuração de geometria em cada cenário de vazão, estes puderam ser comparados com os valores de tempo de detenção hidráulico teórico estimados por meio do dimensionamento convencional (Tabela 1).

RESULTADOS

Velocidades

O primeiro aspecto analisado após a conclusão das simulações foi o comportamento da velocidade de escoamento em cada configuração (C1 e C2) para as condições de vazão testadas (MM e MD). Para isso, foram criadas renderizações volumétricas da velocidade de escoamento ao final de cada simulação (antes da execução dos ensaios de traçador). Esses resultados são apresentados nas Figura 4, 5, 6 e 7. As Figuras 4 e 5 apresentam os resultados obtidos para a configuração C1 na vazão MM e MD, respectivamente. Já as Figuras 6 e 7 apresentam os resultados obtidos para a configuração C2 na vazão MM e MD, respectivamente.

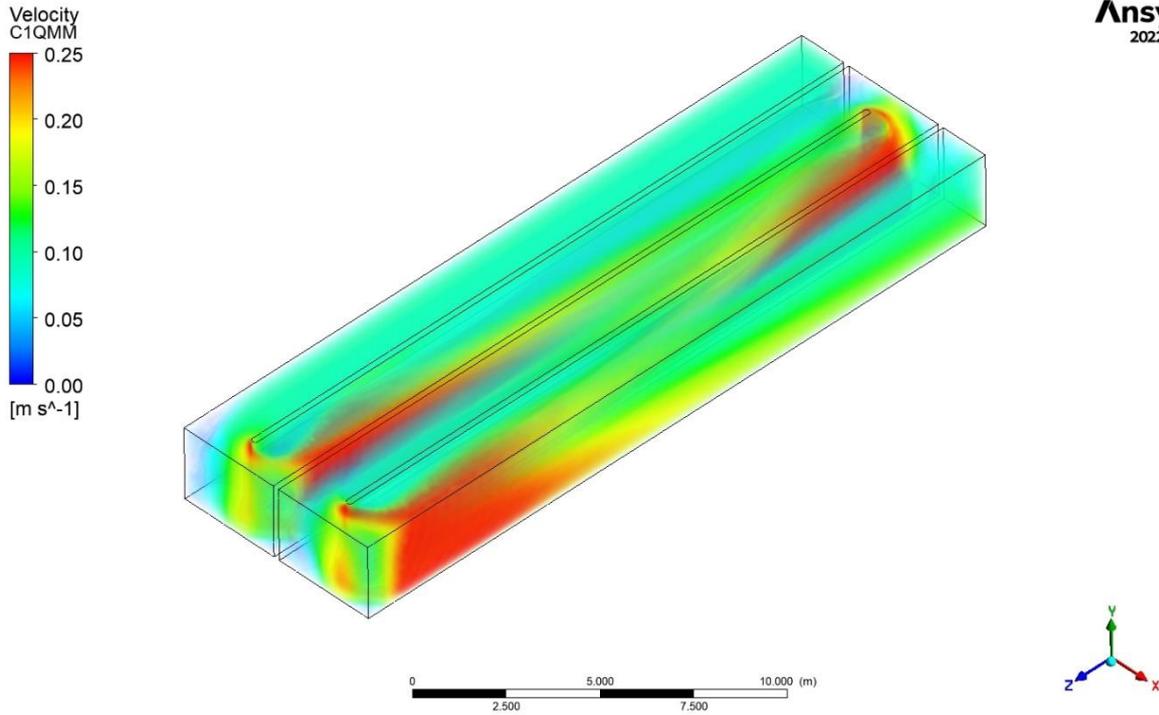


Figura 4 – Renderização volumétrica da velocidade de escoamento (m.s⁻¹) – Configuração C1 - Vazão MM.

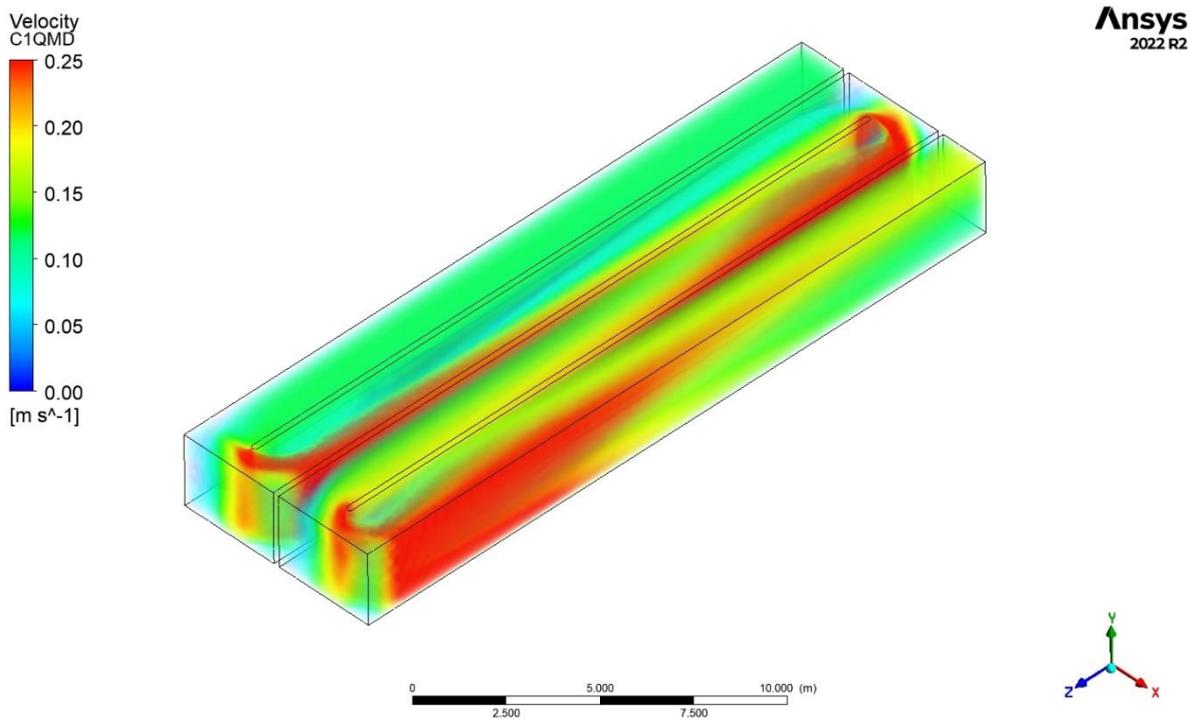


Figura 5 – Renderização volumétrica da velocidade de escoamento (m.s⁻¹) – Configuração C1 – Vazão MD.

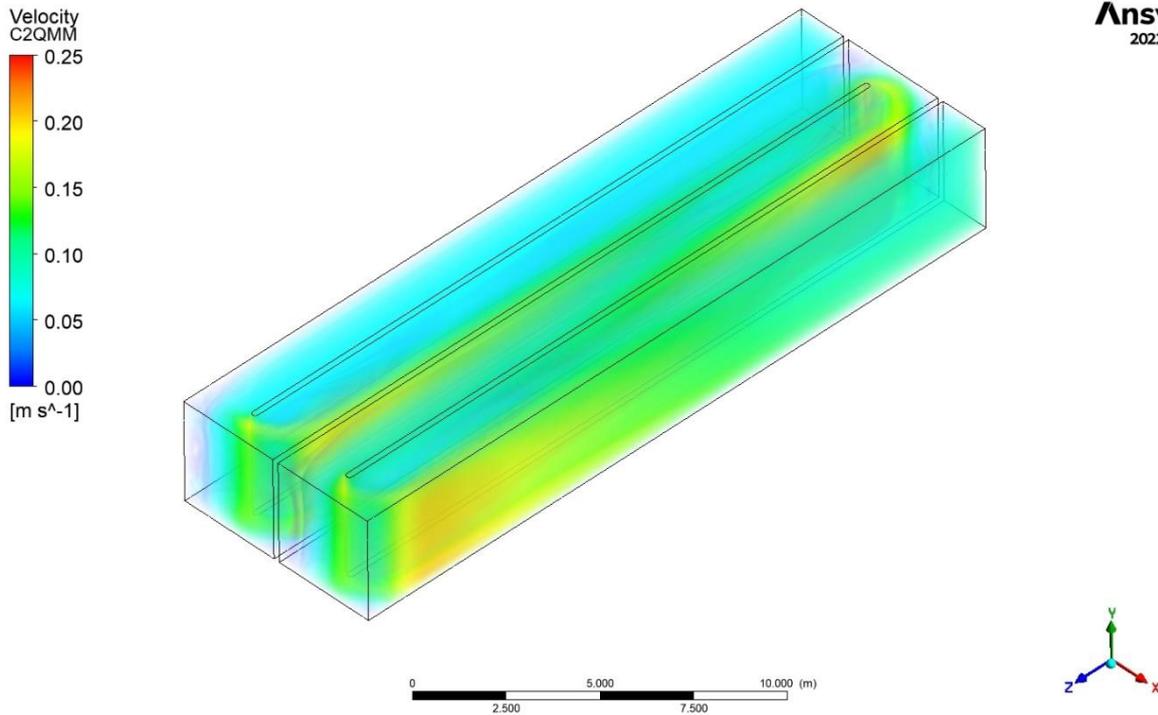


Figura 6 – Renderização volumétrica da velocidade de escoamento ($m.s^{-1}$) – Configuração C2 – Vazão MM.

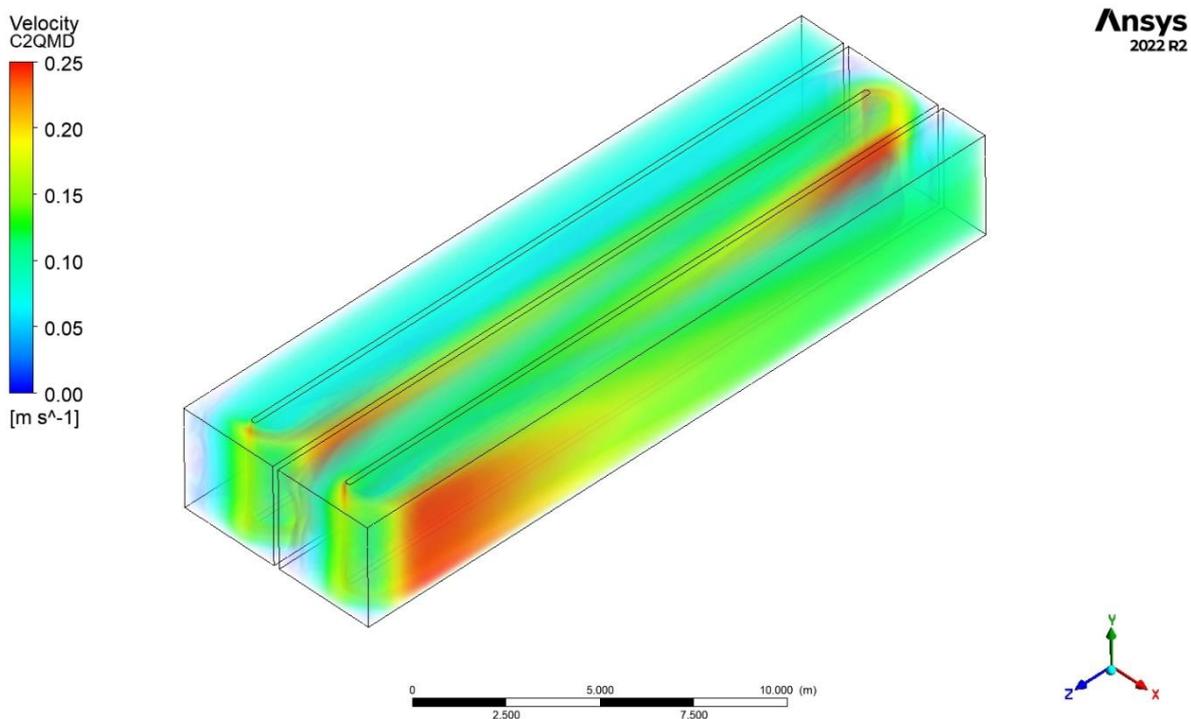


Figura 7 – Renderização volumétrica da velocidade de escoamento ($m.s^{-1}$) – Configuração C2 – Vazão MD.

Conforme é possível observar, a distribuição de velocidade é similar em ambas as configurações, com pontos de aumento de velocidade nas curvas de cada chicana e estabilização nos trechos retos. O aumento da vazão

afluente (de MM para MD) eleva a velocidade nas curvas mencionadas, o que fica evidenciado ao comparar as Figuras 4 e 5 (configuração C1) e Figuras 6 e 7 (configuração C2). Nota-se, por exemplo, que nessas regiões a velocidade estimada com as simulações de CFD supera os valores da velocidade média calculados no dimensionamento convencional apresentado na Tabela 1.

Embora seja possível observar as variações de velocidade nas regiões mencionadas, os resultados das simulações indicaram que as velocidades médias na saída de cada configuração foram similares às estimadas na Tabela 1: 0,096 m/s e 0,115 m/s para as vazões MM e MD na configuração C1, respectivamente; e 0,070 e 0,085 m/s para as vazões MM e MD na configuração C2, respectivamente. Embora o valor numérico em si tenha que ser considerado com cautela, uma vez que se trata de uma simulação em estágio de concepção, terem sido obtidos valores próximos aos estimados por meio do dimensionamento convencional foi interpretado como um sinal positivo, trazendo confiabilidade para as premissas adotadas para o projeto de readequação.

Testes de traçador

Após a verificação da variação da velocidade de escoamento descrita previamente, foram então analisados os resultados dos testes de traçador simulados. As Figuras 8 e 9 apresentam as curvas de variação da fração mássica do traçador na saída das configurações C1 e C2, para as vazões MM e MD, respectivamente.

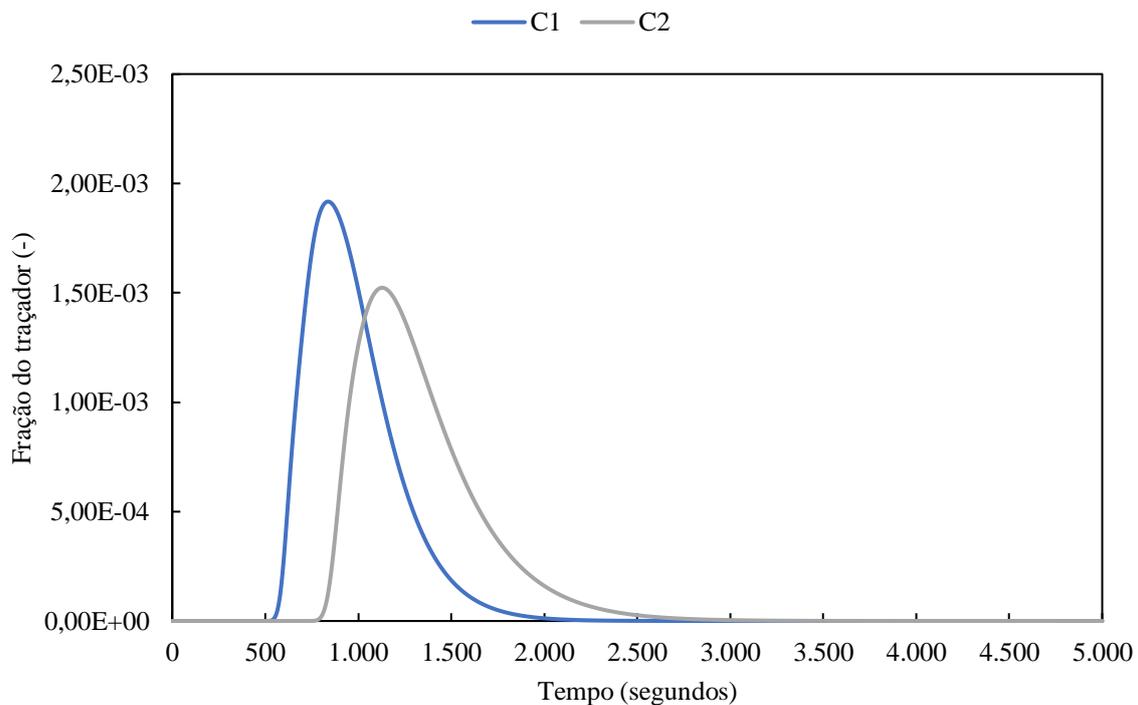


Figura 8 – Variação da fração mássica do traçador em função do tempo de escoamento – Configurações C1 e C2 – Vazão MM.

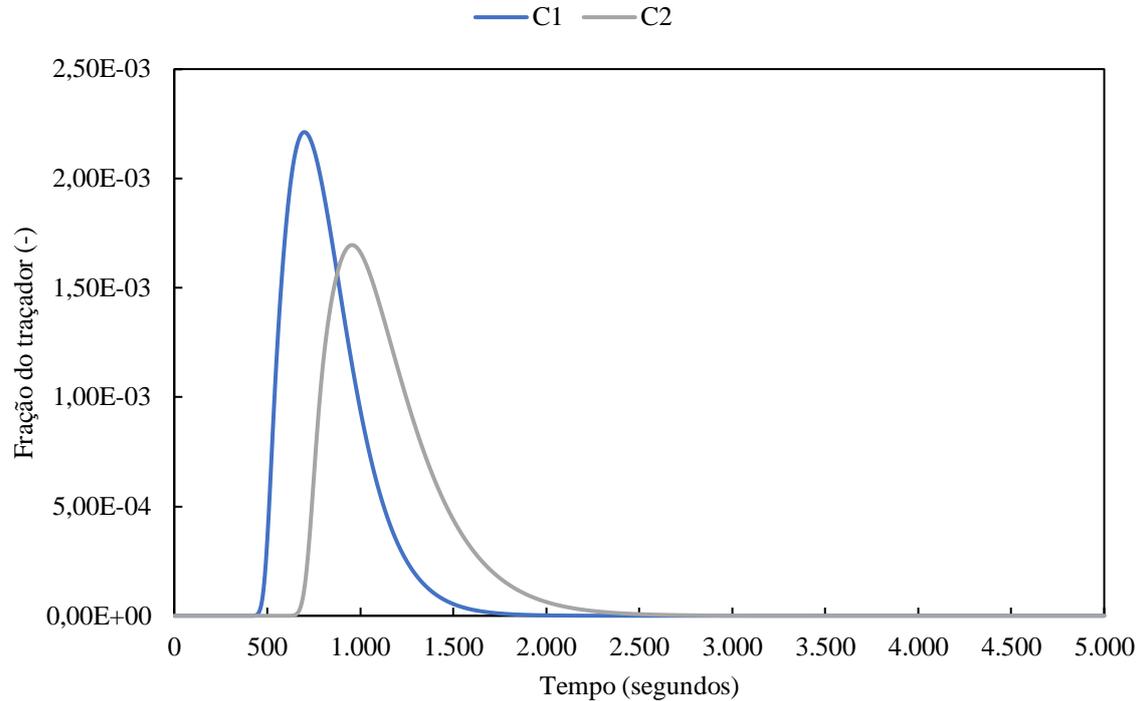


Figura 9 – Variação da fração mássica do traçador em função do tempo de escoamento – Configurações C1 e C2 – Vazão MD.

A partir dos dados apresentados nas Figuras 8 e 9, foi possível estimar o tempo de residência médio do traçador em cada teste por meio da Equação 1. Além disso, foram elaboradas também as curvas $E(t)$ e $F(t)$ para cada teste por meio das Equações 2 e 3. As curvas $E(t)$ das configurações C1 e C2, para as vazões MM e MD, são apresentadas nas Figuras 10 e 11, respectivamente. Já as curvas $F(t)$ das configurações C1 e C2, para as vazões MM e MD, apresentadas nas Figuras 12 e 13, respectivamente.

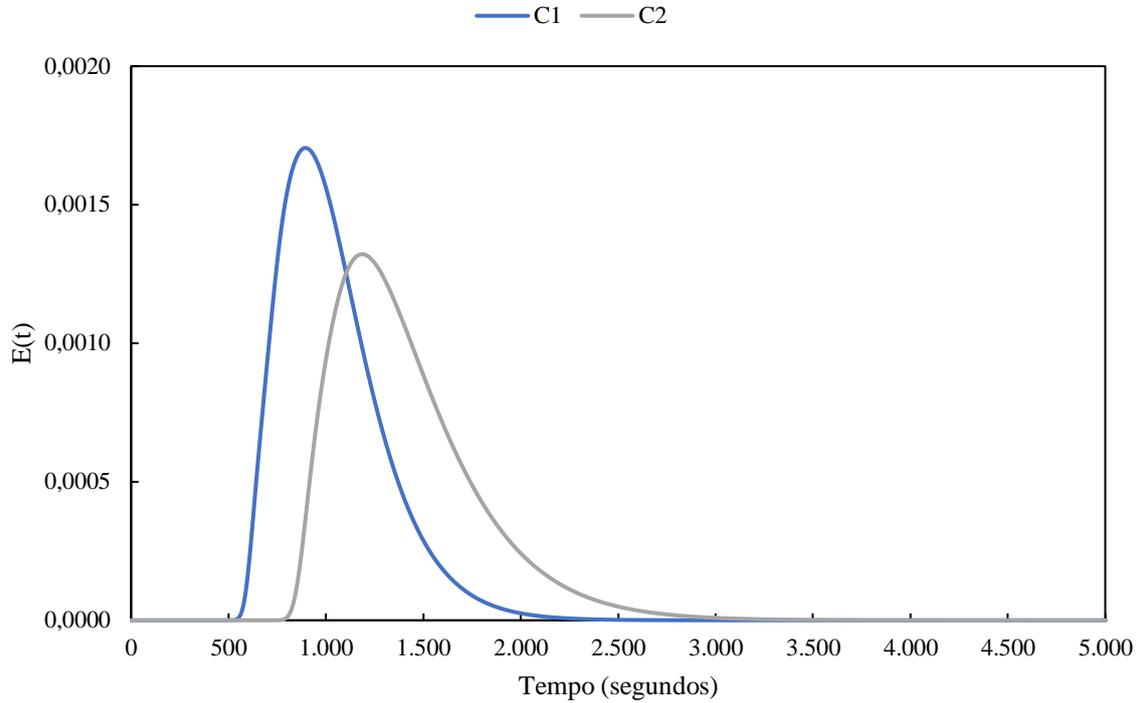


Figura 10 – Curvas de distribuição de tempos de residência $E(t)$ - Configurações C1 e C2 – Vazão MM

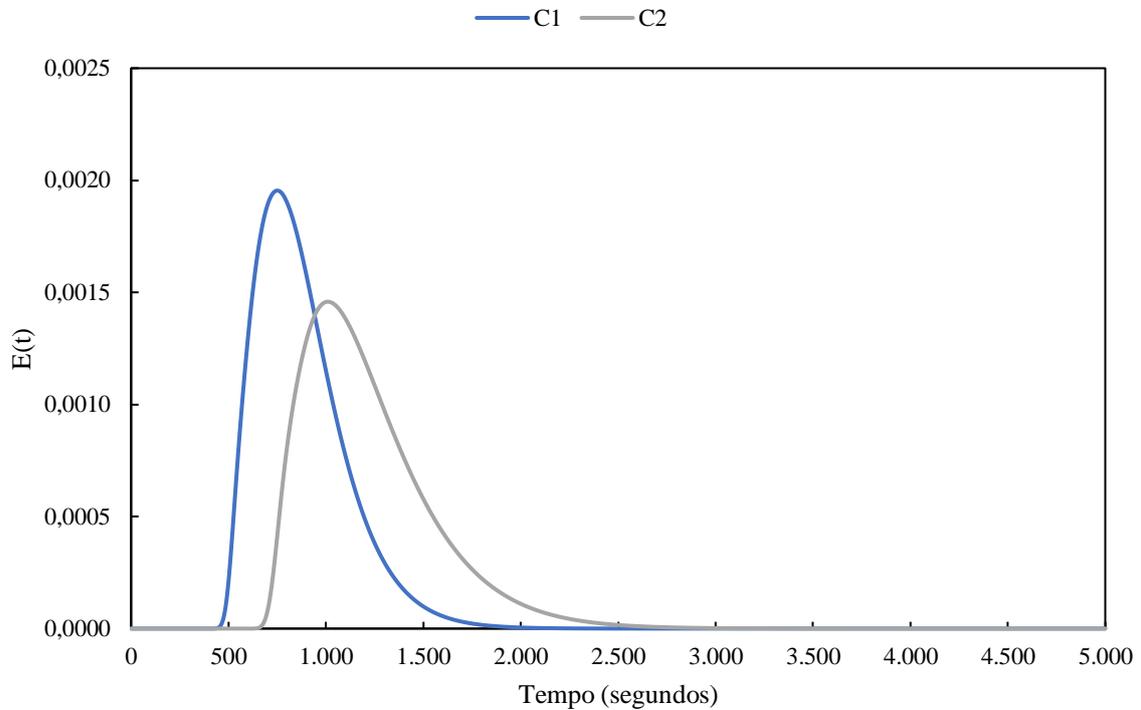


Figura 11 – Curvas de distribuição de tempos de residência $E(t)$ - Configurações C1 e C2 – Vazão MD.

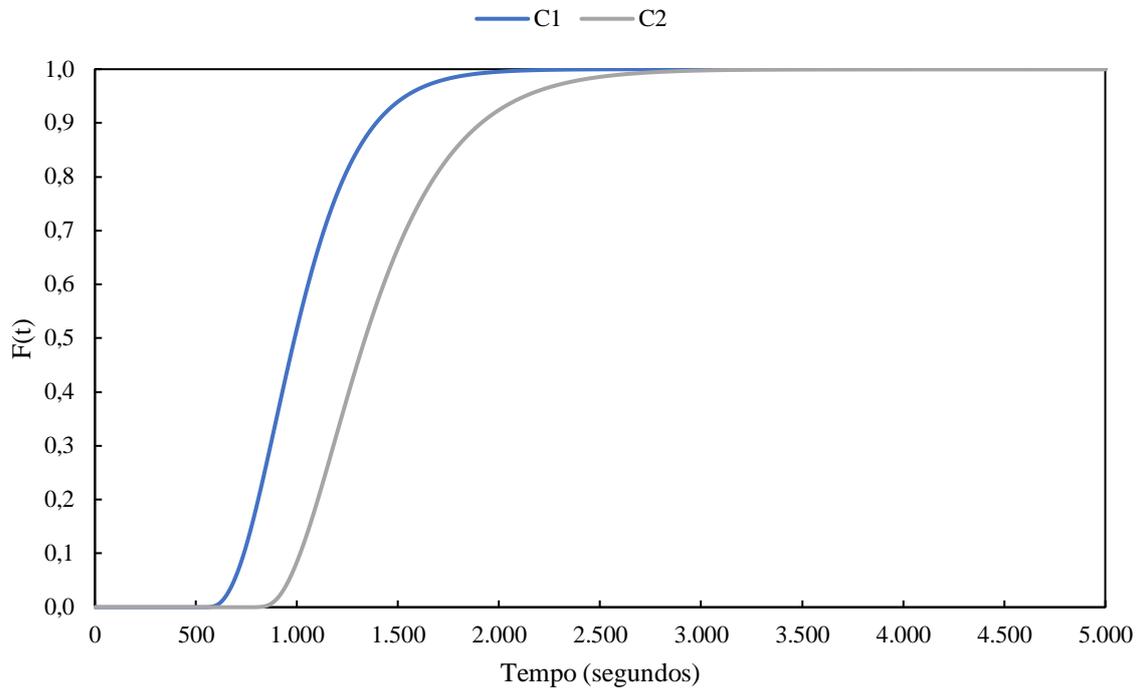


Figura 12 – Curvas de distribuição acumulada de tempos de residência $F(t)$ - Configurações C1 e C2 – Vazão MM

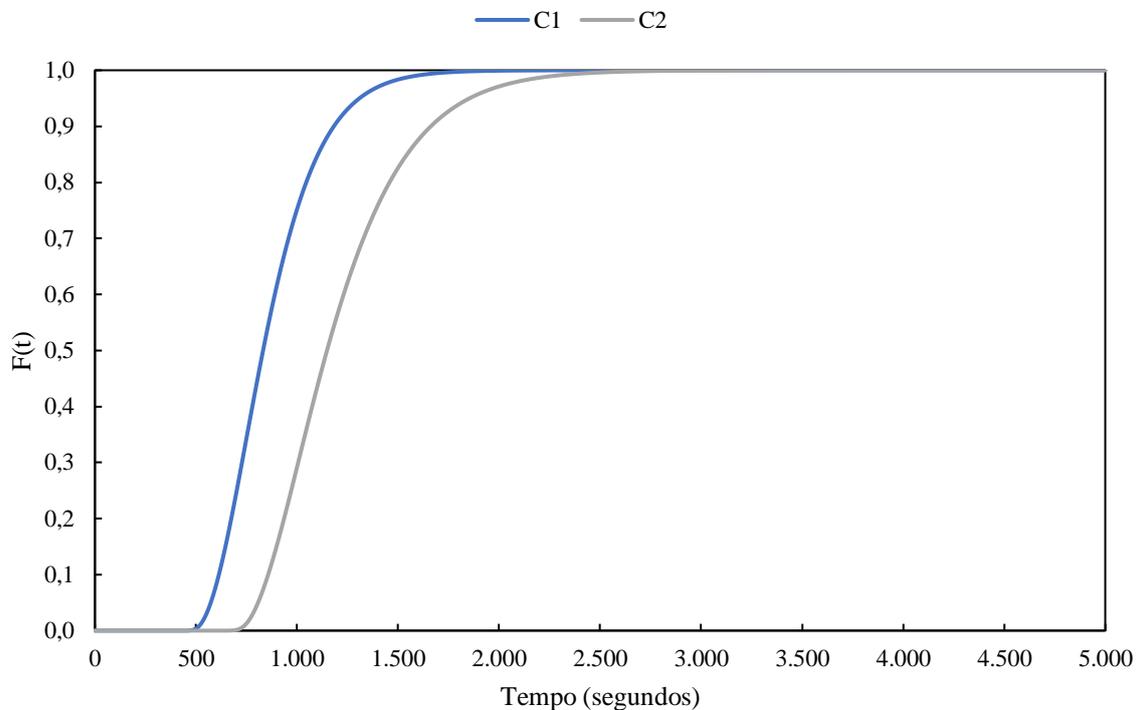


Figura 13 – Curvas de distribuição acumulada de tempos de residência $F(t)$ - Configurações C1 e C2 – Vazão MD.

Para a Configuração 1, na condição de vazão MM, o tempo de residência médio obtido foi de aproximadamente 16,2 minutos. Conforme pode ser observado na Tabela 1, o valor do TDH teórico estimado inicialmente foi de 17,5 minutos (diferença de 7%). Já na condição de vazão MD, a Tabela 1 indica um TDH teórico de aproximadamente 14,6 minutos. A simulação do teste de traçador resultou em um tempo de residência médio de 13,7 minutos (diferença de 6%).

O mesmo comportamento foi observado para a Configuração 2. Para esta configuração, os valores teóricos de TDH para as condições de vazão MM e MD foram de 24,4 e 20,4 minutos, respectivamente (conforme pode ser observado na Tabela 1). Os testes de traçador simulados resultaram em tempos de residência médios de aproximadamente de 22,2 e 19,0 minutos, diferenças de aproximadamente 9% e 7%, respectivamente

A verificação dos tempos de residência médios com a simulação dos testes de traçador indicou que ambas as configurações estudadas apresentaram potencial para aplicação prática. Isso porque, caso houvesse uma predominância de “zonas mortas” ou de “recirculação interna”, teriam sido detectadas discrepâncias mais significativas entre os valores teóricos de TDH e os estimados com os testes de traçador (CRITTENDEN *et al.*, 2012; LAURENT *et al.*, 2022; LIU; ZHANG, 2019; TCHOBANOGLIOUS *et al.*, 2014).

CONCLUSÕES

A realização do presente trabalho possibilitou verificar aplicabilidade de simulações de CFD em estágios iniciais de concepção de unidades de processo. Quando aplicadas de acordo com as boas práticas de simulação, e para casos específicos, os resultados de simulações de CFD podem ser usados para enriquecer o entendimento sobre o comportamento da unidade em projeto.

Especificamente para o caso estudado, concluiu-se que ambas as configurações C1 e C2 apresentaram potencial para aplicação na readequação da elevatória para tanque de contato. No andamento do projeto em questão, optou-se pela Configuração 2 por proporcionar um maior tempo de residência (tanto teórico quando calculado com os testes de traçador), trazendo flexibilidade operacional do ponto de vista de dosagem de produtos químicos na unidade. No entanto, é importante destacar que a obra em questão apresentou maior complexidade, uma vez ser necessária a elevação das paredes da unidade para aumentar a altura útil, além da instalação das chicanas previstas.

Conforme descrito previamente, as simulações de CFD foram do tipo monofásica, com foco no comportamento hidráulico da unidade em estudo. Para trabalhos futuros, almeja-se complementar simulações dessa natureza, incluindo os equacionamentos pertinentes aos processos das unidades em estudo (como, nesse caso, o processo de oxidação química). Assim, o processo de tratamento previsto para ocorrer na unidade poderá ser simulado no campo de escoamento resultante das simulações de CFD, trazendo informações valiosas ainda em uma etapa de concepção.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ANSYS. ANSYS Fluent Theory Guide. Canonsburg: ANSYS, Inc., 2021. 1050 p.
2. ANSYS. ANSYS Fluent User's Guide. Canonsburg: ANSYS, Inc., 2022. 5878 p.
3. AWWA. Water Quality & Treatment – A Handbook on Drinking Water. 6th ed. New York: McGraw Hill, 2011.
4. CRITTENDEN, J. C.; TRUSSELL, R. R.; HAND, D. W.; HOWE, K. J.; TCHOBANOGLIOUS, G. MWH's Water Treatment: Principles and Design. 3. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2012. 1901 p.
5. FERREIRA FILHO, S. S. Princípios, fundamentos e processos em engenharia ambiental. 1. ed. Santana do Parnaíba: SGuerra Design, 2021. 938 p.
6. LAURENT, J.; SAMSTAG, R.; WICKS, J.; NOPENS, I. CFD Modelling for Wastewater Treatment Processes - IWA Working Group on Computational Fluid Dynamics. 1. ed. London: IWA Publishing, 2022. 242 p.
7. LEVENSPER, O. Chemical Reaction Engineering. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons Inc. 1999. 446 p.
8. LIU, X.; ZHANG, J. Computational Fluid Dynamics - Applications in Water, Wastewater and Stormwater Treatment. 1. ed. Reston: American Society of Civil Engineers, 2019. 211 p.
9. MENTER, F.; SECHNER, R.; GERMANY GMBH MATYUSHENKO, A. A.; PETERSBURG, S. Best Practice: RANS Turbulence Modeling in Ansys CFD. Canonsburg: ANSYS, Inc., 2021. 95 p.



10. ROACHE, P. Verification of Codes and Calculations. AIAA Journal. v. 36, n. 5, p. 686-702, 1998.
11. SOSNOWSKI, M.; KRZYWANSKI, J.; GNATOWSKA, R. Polyhedral meshing as an innovative approach to computational domain discretization of a cyclone in a fluidized bed CLC unit. E3S Web of Conferences 14, v. 14, n. 01027, p. 10, 2017.
12. TCHOBANOGLOUS, G.; STENSEL, H. D.; TSUCHIHASHI, R.; BURTON, F. L. Wastewater Engineering - Treatment and Resource Recovery - Part 1. 5. ed. New York: McGraw Hill Education, 2014. 2044 p.
13. VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. An Introduction to Computational Fluid Dynamics - The Finite Volume Method. 2. ed. Harlow: Pearson Prentice Hall, 2007. 503 p.