

EFEITOS DA INSERÇÃO DE MODIFICADORES DE ESCOAMENTO NO DESEMPENHO DE UNIDADES DE CONTATO DE FLUXO CONTÍNUO

EFFECTS OF INSERTION OF FLOW MODIFIERS ON PERFORMANCE OF CONTINUOUS FLOW CONTACT UNITS

Jordan Deambrosio Cussuol (1); Hédrick Colona (1); Michel de Oliveira dos Santos (2, P); Renato do Nascimento Siqueira (3)

(1) Graduando em Engenharia Mecânica, Instituto Federal do Espírito Santo, São Mateus - ES, Brasil.

(2) Ms. Prof., Instituto Federal do Espírito Santo, São Mateus - ES, Brasil.

(3) Dr. Prof., Instituto Federal do Espírito Santo, São Mateus - ES, Brasil.

(P) Apresentador.

Email para Correspondência: jordancussuol@live.com

Resumo: Unidades de contato de fluxo contínuo são muito comuns em diversos processos industriais e em sistemas de tratamento de água e efluentes. De maneira geral, o projeto destas unidades é baseado no tempo teórico de detenção, o qual deve ser o suficiente para que ocorra o processo desejado. No entanto, a ocorrência de curtos-circuitos, zonas mortas e recirculações fazem com que a eficiência destas unidades seja inferior à prevista na fase de projeto. O entendimento da hidrodinâmica no interior das unidades e a análise das Distribuições de Tempo de Residência (DTR), auxiliam na avaliação do desempenho dessas unidades, permitindo que se detecte os principais problemas que ocorrem em seu interior. Além do diagnóstico de unidades existentes, o entendimento do comportamento hidrodinâmico, juntamente com o conhecimento da eficiência hidráulica, permite o projeto mais racional de novas unidades. Neste trabalho, a Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) é utilizada para se fazer uma avaliação integrada da eficiência hidráulica e hidrodinâmica de unidades de contato para se avaliar os efeitos da inserção de modificadores de escoamento (chicanas e defletores) no desempenho de unidades de fluxo contínuo. Os resultados mostram que a inserção destes modificadores melhora consideravelmente o desempenho das unidades.

Palavras chaves: modificadores de escoamento; unidades de contato; hidrodinâmica de reatores; distribuição de tempo de residência; dinâmica dos fluidos computacional.

Abstract: Continuous flow contact units are very common in many industrial processes and in water and wastewater treatment systems. In general, the design of these units is based on the theoretical residence time, which should be high enough for the desired process. However, short circuits, dead zones and recirculation lead to lower efficiencies than the expected during its design. The understanding of the hydrodynamics inside the units and the analysis of the Residence Time Distributions (RTD) assists the evaluation of the performance of these units, allowing the detection of main problems that occur inside the unit. In addition to the diagnosis of existing units, the



understanding of hydrodynamic behavior, together with the knowledge of hydraulic efficiency, can lead to the rational design of new units. In this work, Computational Fluid Dynamics (CFD) is used to perform an integrated assessment of hydraulic and hydrodynamic efficiency of contact units to evaluate the effects of insertion of flow modifiers (baffles and deflectors) on the performance of continuous flow units. The results show that the insertion of these flow modifiers considerably improves the performance of the units.

Keywords: flow modifiers; contact units; hydrodynamics of reactors; residence time distribution; computational fluid dynamics.



1 INTRODUÇÃO

É uma prática corrente avaliar o desempenho das unidades de contato com base apenas no tempo teórico de detenção (T), usando uma abordagem do tipo “caixa preta”, ou seja, sem maiores detalhamentos do escoamento que ocorre no interior das unidades. Entretanto, nos últimos anos, a difusão da Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) permitiu uma abordagem mais perspicaz para o projeto das unidades de contato.

O conhecimento da hidrodinâmica nas unidades de contato é de fundamental importância para avaliação de seu desempenho, pois permite compreender o grau de existência de curtos-circuitos, zonas mortas e recirculação. Possibilita também identificar se as condições de escoamento encontradas na unidade se aproximam do tipo ideal (escoamento pistão ou mistura completa).

Segundo Teixeira e Siqueira (2008), quanto maior a eficiência hidráulica de uma unidade de contato, maior o desempenho do processo. Vários estudos comprovam essa relação existente entre a eficiência hidráulica da unidade e a eficiência do processo (Angeloudis *et al.*, 2015; Gualtieri *et al.*, 2017; Sanchez *et al.*, 2016; Wilson e Venayagamoorth, 2010). No entanto, apenas a avaliação da eficiência hidráulica não fornece detalhes do comportamento hidrodinâmico da unidade que permite um diagnóstico mais preciso. Assim, a modelagem numérica emerge como uma importante ferramenta para sustentar esse entendimento, uma vez que a aquisição de campos de velocidade dentro da unidade, além de onerosa, nem sempre é tecnicamente viável.

De acordo com Rauen *et al.* (2012), as práticas de otimização hidráulica de unidades de contato mal concebidas começaram com estudos experimentais realizados nas décadas de 1960 e 1970, envolvendo duas abordagens distintas. A primeira abordagem refere-se ao trabalho de campo, utilizando as técnicas de traçadores para diagnosticar o desempenho hidráulico de unidades existentes, com auxílio das Distribuições de Tempo de Residência (DTR) e dos indicadores de eficiência hidráulica. Já a segunda abordagem refere-se à modelagem física em laboratório, verificando o impacto que determinadas modificações exercem sobre o desempenho da unidade com sugestões de implementações em escala real. Na década de 1980, as modelagens matemática e numérica começaram a serem utilizadas para auxiliar as investigações, oferecendo uma maneira econômica e de boa relação custo/benefício para a determinação o desempenho da unidade. Com o crescimento do poder computacional e a popularização dos modelos, a década de 1990 vivenciou o desenvolvimento e a aplicação da Dinâmica dos Fluidos Computacional para simular a eficiência hidráulica de unidades de contato. Isso levou ao cenário atual de modelos CFD como ferramentas de apoio inestimáveis em estudos de otimização de unidades, com as técnicas experimentais ainda sendo usadas para diagnósticos específicos e fornecendo dados para calibração e validação de resultados da modelagem CFD.

Uma maneira de aumentar o desempenho das unidades de contato é o uso de modificadores de escoamento. Conforme demonstrado por Siqueira *et al.* (1996) e Almeida (1997), a instalação de chicanas, para direcionar o fluxo e aumentar a relação comprimento/largura, e o uso de defletores de escoamento, para diminuir a energia cinética do jato de entrada, podem melhorar significativamente a eficiência hidráulica da unidade.



A Dinâmica dos Fluidos Computacional é utilizada neste trabalho com o intuito de realizar uma avaliação integrada da eficiência hidráulica e hidrodinâmica de unidades de contato para avaliar os efeitos de inserção de modificadores de escoamento (chicanas e defletores) no desempenho de unidades de fluxo contínuo.

2 CARACTERIZAÇÃO DO ESCOAMENTO

A caracterização do comportamento hidrodinâmico do regime de escoamento no interior das unidades de contato é de suma importância para a realização de uma análise do seu desempenho, por possibilitar o conhecimento do grau de existência de fenômenos que ocorrem no interior das unidades, como os curtos-circuitos, regiões de zonas mortas e recirculações. A obtenção e análise dos campos de escoamento permite identificar, qualitativamente, as condições de escoamento que mais se aproximam do tipo ideal (tipo pistão ou mistura completa). Ademais, a utilização das Distribuições de Tempo de Residência (DTR), conhecidas como curvas de passagem, também possibilita essa identificação qualitativa do escoamento, mas parâmetros quantitativos extraídos das DTR, denominados indicadores de eficiência hidráulica, são ferramentas que podem facilitar a análise dos resultados.

2.1 Indicadores de Eficiência Hidráulica

Com o intuito de se realizar uma análise quantitativa da eficiência hidráulica de uma unidade de contato, são extraídos das curvas de passagem os indicadores de eficiência hidráulica. Para um melhor entendimento do comportamento do escoamento no interior da unidade, os indicadores são divididos em duas categorias: indicadores de curto-circuito e de mistura.

Teixeira e Siqueira (2008) em seu estudo, avaliaram os diversos indicadores existentes e determinaram aqueles que melhor representam o fenômeno físico de curto-circuito e mistura. Os autores mostram que o tempo inicial de passagem (t_i) e o tempo de chegada de 10% da massa do traçador (t_{10}) são os melhores indicadores de curto-circuito, e que o índice de dispersão (σ^2) e o índice de Morril (M_o) são os melhores indicadores de mistura.

2.1.1 Indicadores de curto-circuito

O tempo inicial de passagem (t_i) é o tempo decorrido desde o instante da injeção do traçador na região de entrada até a sua detecção na saída da unidade. Já o tempo de chegada de 10% da massa de traçador (t_{10}) é o tempo decorrido para que 10% da massa do traçador injetado na entrada deixe a unidade.

2.1.2 Indicadores de mistura

Índice de Morril (M_o) é a razão entre o tempo de passagem pela saída da unidade de 90% e 10% da massa do traçador injetada na entrada, ou seja, $M_o = t_{90} / t_{10}$. Já o índice de dispersão (σ^2) é dado pela razão entre a variância da curva de passagem (σ_t^2) e o tempo médio de detenção (t_g), conforme mostrado na Eq. (1).

$$\sigma^2 = \frac{\sigma_t^2}{tg^2} \quad (1)$$

A variância da curva de passagem é dada pela Eq. (2).

$$\sigma_t^2 = \frac{T^2 \int_0^\infty \theta^2 \cdot E(\theta) \cdot d\theta}{\int_0^\infty E(\theta) \cdot d\theta} - tg^2 \quad (2)$$

O tempo médio de detenção, que corresponde ao centroide da área sob a curva de passagem, é dado pela Eq. (3).

$$tg = \frac{T \int_0^\infty \theta \cdot E(\theta) \cdot d\theta}{\int_0^\infty E(\theta) \cdot d\theta} \quad (3)$$

em que T é o tempo teórico de detenção da unidade, θ é a razão entre o tempo (t) decorrido de passagem do traçador pela seção de saída da unidade e o tempo teórico de detenção, ou seja, $\theta = t/T$; e $E(\theta)$ é a concentração adimensional normalizada do traçador, medida na seção de saída da unidade, no tempo relativo θ .

3 METODOLOGIA

Foram avaliadas três configurações de modificadores de escoamento e uma configuração de referência, conforme apresentado na Fig. (1). A unidade de experimentação consiste de um tanque retangular (1,61 m de comprimento e 0,70 m de largura), com uma altura da lâmina d'água de 0,20 m. Os canais de entrada e saída para as configurações de referência, com defletor e com chicanas transversais possuem 0,10 m de largura e estavam posicionados à 0,10 m da lateral da unidade. Para a configuração com chicanas longitudinais, os canais possuem 0,10 m de largura e estavam posicionados à 0,07 m da parede lateral da unidade. As chicanas encontram-se uniformemente distribuídas ao longo da unidade e possuem um comprimento de 0,46 m na configuração transversal e 1,37 m na configuração longitudinal. O defletor de escoamento possui 0,10 m de altura e estava posicionado à 0,10 m do fundo e 0,24 m da seção de entrada. A vazão na entrada utilizada em todas as configurações foi de 1 l/s.

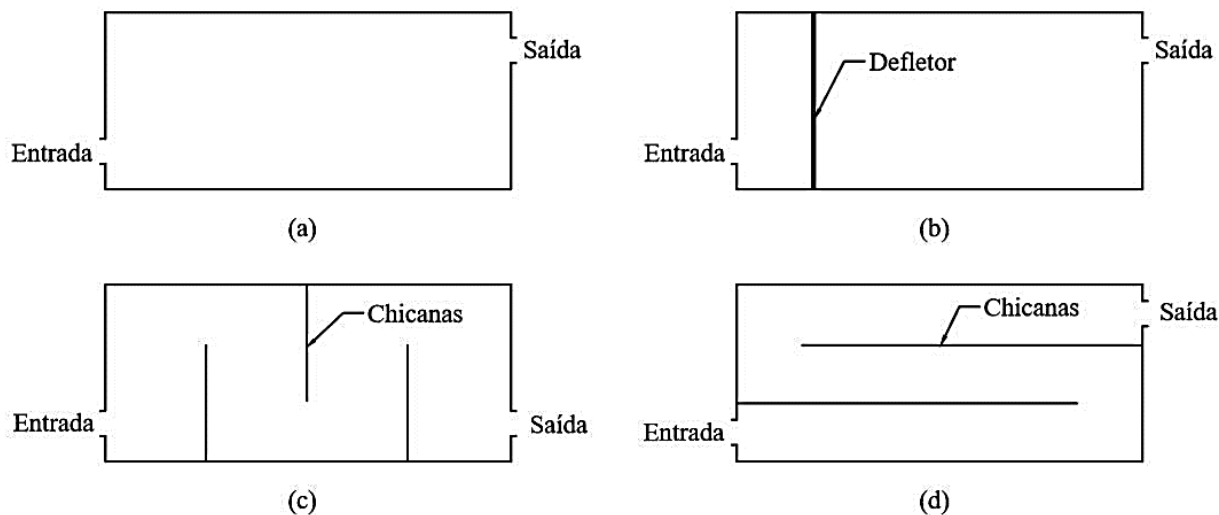


Figura 1. Configurações da unidade de contato. (a) referência; (b) com defletor de escoamento; (c) com chicanas transversais; (d) com chicanas longitudinais.

Fonte: (Autores, 2018)

Um modelo CFD foi utilizado para se realizar uma análise hidráulica e hidrodinâmica da unidade de contato em estudo. As simulações numéricas foram realizadas com o *software* comercial Ansys® CFX 16.0, com utilização do modelo de turbulência SSG, por levar em consideração as características anisotrópicas do escoamento.

A malha utilizada nas simulações consiste em uma malha estruturada, possuindo 5600 divisões de elementos estruturados na seção transversal da geometria por 322 divisões na direção longitudinal. A escolha dessa malha se deu após a realização de um teste de malha, verificando a independência dos resultados (qualitativos e quantitativos) obtidos de campo de escoamento, curvas de passagem e indicadores de eficiência hidráulica em relação ao tamanho e quantidade de elementos de malha. Foi utilizada a configuração de referência nesse teste.

Para se obter os campos de escoamento da unidade foi utilizado a condição de regime permanente nas simulações. Já para determinar as curvas de passagem, foi necessário a utilização de uma abordagem em regime transiente. O critério de convergência adotado em ambas as condições (regime permanente e transiente) foi o valor quadrático médio dos resíduos (RMS) igual a 1×10^{-5} .

A condição de contorno utilizada no topo da unidade foi parede com escorregamento livre (*free slip*). Já o fundo e as paredes laterais da unidade usou-se a condição de parede sem escorregamento (*no slip wall*).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Validação do Modelo Numérico

O modelo CFD utilizado nas simulações foi validado por meio de uma análise comparativa entre os dados experimentais de curva de passagem e indicadores de eficiência hidráulica obtidos por Teixeira e Siqueira (2008) e os resultados encontrados numericamente seguindo os mesmos parâmetros geométricos e operacionais do autor. A Figura (2) mostra um esboço da geometria utilizada, que possui 1,61 m de comprimento, 0,70 m de largura e uma altura de lâmina d'água de 0,20 m. Maiores detalhes dos parâmetros geométricos e operacionais da unidade adotada para a validação do modelo podem ser encontrados em Siqueira (1998).

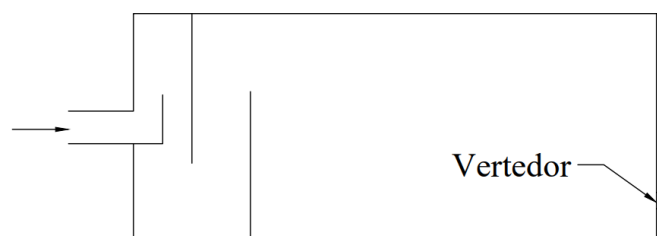


Figura 2. Representação da geometria utilizada para a validação do modelo numérico.

Fonte: (Adaptado de Teixeira e Siqueira, 2008)

Ao comparar a curva de passagem (Fig. 3) e os indicadores de eficiência hidráulica (Tab. 1) obtidos pelo modelo CFD com os dados experimentais de Teixeira e Siqueira (2008), é possível verificar uma boa concordância dos resultados, o que demonstra que o modelo está representando adequadamente o comportamento real da unidade. As linhas tracejadas apresentadas na Fig. (3) representam os valores mínimos e máximos encontrados pelos autores durante os testes de reprodutibilidade das curvas de passagem, que foram digitalizados a fim de permitir a análise comparativa.

Tabela 1. Comparação dos indicadores de eficiência hidráulica obtidos pelo modelo numérico com os resultados experimentais.

Indicadores de Eficiência Hidráulica	Teixeira e Siqueira (2008)	Modelo numérico
t_i	0,29	0,25
t_{10}	0,38	0,35
σ^2	0,58	0,65
Mo	5,79	5,74

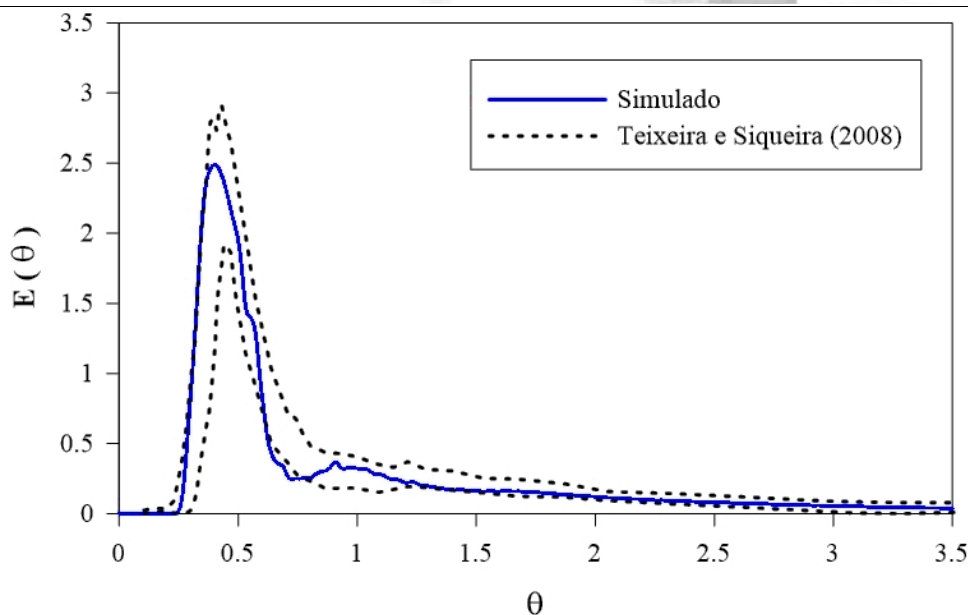


Figura 3. Comparação da curva de passagem obtida pelo modelo numérico com os resultados experimentais.

Fonte: (Autores, 2018)

4.2 Campos de Escoamento

As Figuras 4 a 7 mostram os campos de velocidade obtidos nas simulações com o modelo CFD das configurações estudadas, apresentados em um plano localizado a uma altura de 0,16 m do fundo da unidade. Nota-se na configuração de referência (Fig. 4), que devido a vazão de escoamento utilizada, para se ter o tempo teórico de detenção na unidade de 226 s, ocorreu a formação de um jato de água na entrada, provocando um alto grau de curto-circuito (caminhos preferenciais). Esse jato d'água de entrada atingiu a parede da unidade, gerando regiões de recirculações e zonas mortas, tornando o padrão de escoamento distante do ideal esperado (tipo pistão).

Visando a redução da energia cinética do jato de entrada, instalou-se chicanas transversais na unidade, como apresentado na Fig. (5). Verifica-se ainda que o jato de entrada provoca a formação de caminhos preferenciais na unidade, ou seja, gera curto-circuito. Entretanto, com a instalação dessa configuração de chicanas, é possível identificar qualitativamente que ocorre uma pequena redução de intensidade desse curto-circuito formado em comparação com a unidade de referência. O jato ao atingir as paredes das chicanas, também acarreta na formação de várias regiões de zonas mortas e de recirculação de fluido, distanciando assim do escoamento ideal.

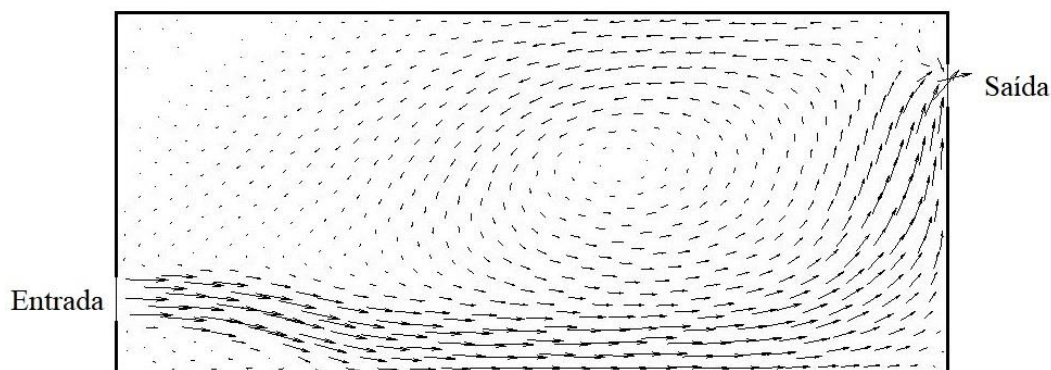


Figura 4. Comportamento hidrodinâmico da unidade de contato de referência.

Fonte: (Autores, 2018)

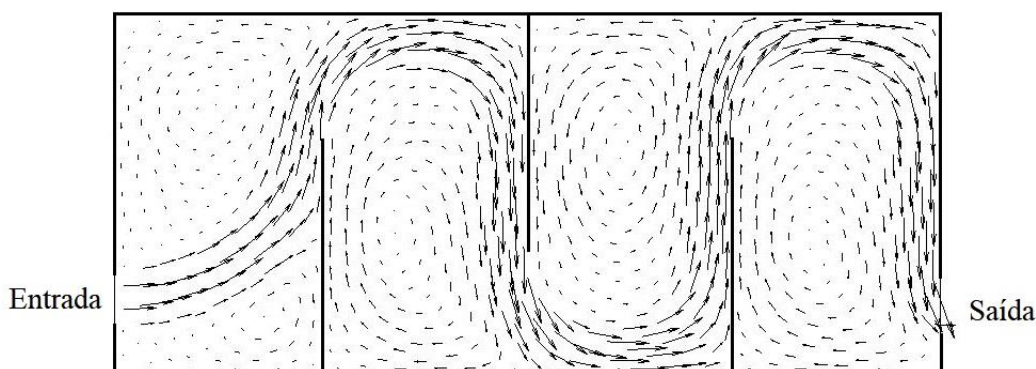


Figura 5. Comportamento hidrodinâmico da unidade de contato com chicanas transversais.

Fonte: (Autores, 2018)

Inserindo o defletor de escoamento na unidade, conforme Fig. (6), pode-se perceber que o jato de entrada incide sobre a parede do defletor, perdendo energia cinética e criando regiões de recirculação. O fluido escoar por baixo do defletor e se direciona à saída da unidade em menor velocidade, fato esse que justifica a redução de tamanho dos vetores de velocidade. Esse comportamento do escoamento minimiza ainda mais o fenômeno de curto-circuito quando comparado com o uso de chicanas transversais e à configuração de referência, fazendo com que o escoamento seja relativamente mais uniforme na unidade, aproximando-se assim do ideal tipo pistão.

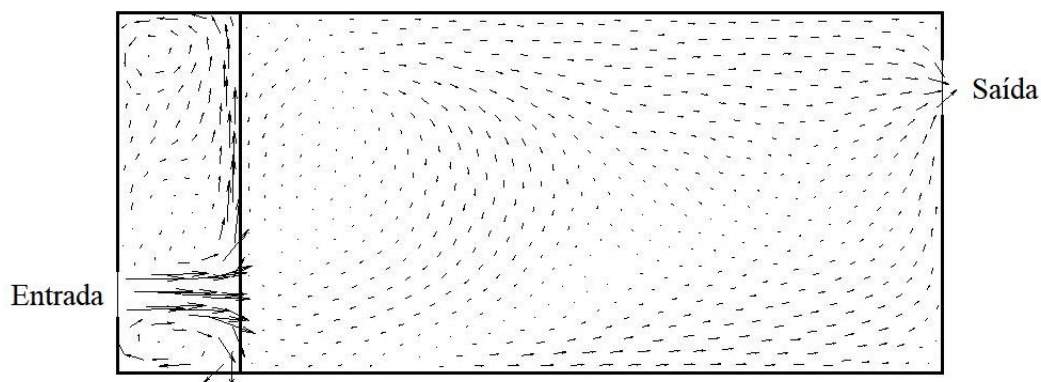


Figura 6. Comportamento hidrodinâmico da unidade de contato com defletor de escoamento.

Fonte: (Autores, 2018)

Com a utilização das chicanas longitudinais na unidade (Fig. 7), em comparação com o uso dos outros modificadores de escoamento (chicanas transversais e defletor), constata-se uma maior redução do fenômeno de curto-circuito que é presente na unidade de referência, fato esse que é proporcionado pelo aumento da relação comprimento/largura da unidade. Porém, devido à alta energia cinética do jato de entrada, ainda ocorre a formação de regiões de zonas mortas na unidade em questão, principalmente atrás das chicanas, o que pode prejudicar a sua eficiência. Em vista disso, é possível verificar, qualitativamente, por meio de uma análise hidrodinâmica com os campos de escoamento, que a configuração com chicanas longitudinais é a que apresenta um maior desempenho do processo em comparação com as outras unidades em estudo.

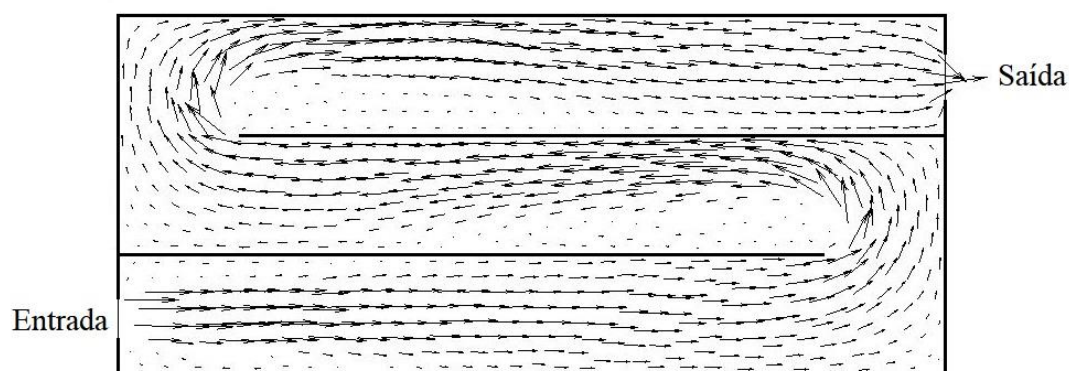


Figura 7. Comportamento hidrodinâmico da unidade de contato com chicanas longitudinais.

Fonte: (Autores, 2018)

4.3 Distribuição de Tempo de Residência e Indicadores de Eficiência Hidráulica

As curvas de passagem obtidas pelo modelo CFD para as unidades com modificadores de escoamento e a de referência são mostradas na Fig. (8), juntamente com as curvas ideais para os escoamentos do tipo pistão e mistura completa. Os indicadores de eficiência hidráulica das unidades analisadas, juntamente com os indicadores dos escoamentos ideais são apresentados nas Tab. (2).

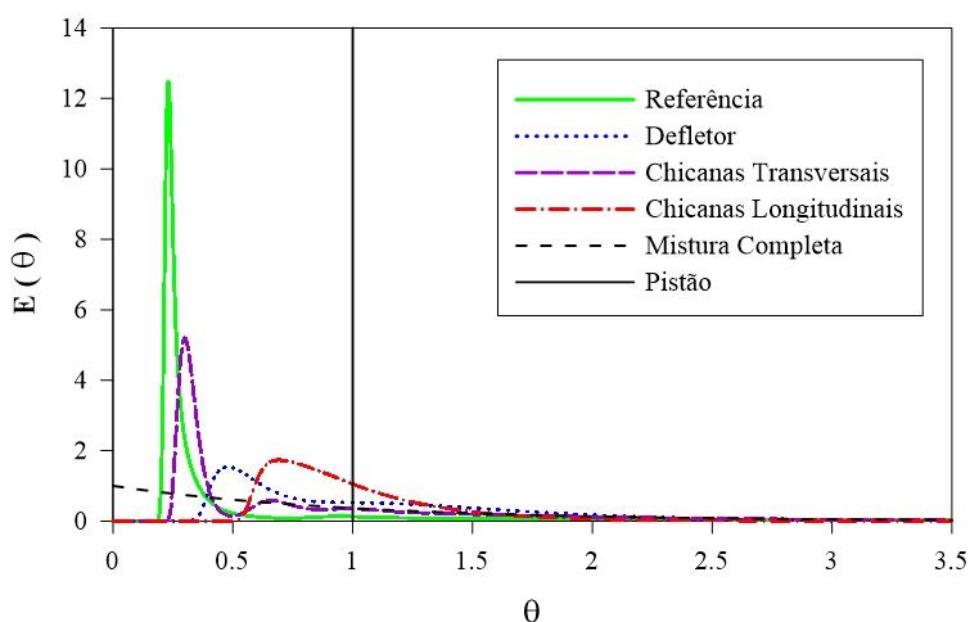


Figura 8. Distribuições de tempo de residência das unidades de contato.

Fonte: (Autores, 2018)

Tabela 2. Indicadores de eficiência hidráulica das unidades de contato.

Indicadores de Eficiência Hidráulica	Mistura Completa	Escoamento Pistão	Referência	Defletor	Chicanas Transversais	Chicanas Longitudinais
t_i	0,00	1,00	0,18	0,33	0,22	0,51
t_{10}	0,11	1,00	0,22	0,46	0,28	0,64
σ^2	1,00	0,00	1,52	0,32	0,75	0,13
Mo	21,85	1,00	6,67	4,13	6,68	2,26

Percebe-se, qualitativamente, pela curva de passagem da configuração de referência, que há um elevado grau de curto-circuito na unidade, afastando-se assim da curva ideal esperada (tipo pistão), o que indica uma baixa eficiência dessa unidade. Uma análise quantitativa pode ser realizada com os indicadores de eficiência hidráulica. Os indicadores de curto-circuito obtidos ($t_i = 0,18$ e $t_{10} = 0,22$) encontram-se distantes dos valores esperados para o caso ideal ($t_i = 1,00$ e $t_{10} = 1,00$) e relativamente muito próximos dos esperados para o caso ideal mistura completa. Já os indicadores de mistura ($\sigma^2 = 1,52$ e $Mo = 6,67$) também se apresentam afastados dos valores ideais para o escoamento pistão: $\sigma^2 = 0,00$ e $Mo = 1,00$. Essas análises, pela curva de passagem e pelos indicadores, comprovam o que foi relatado pela investigação dos campos de escoamento, constatando assim, que a unidade na configuração de referência apresenta baixo desempenho.

A inclusão das chicanas transversais na unidade provocou uma pequena modificação da curva de passagem em comparação com a unidade de referência, deslocando-a ligeiramente para próximo da curva ideal do tipo pistão, indicando uma pequena redução do fenômeno de curto-circuito. Entretanto, o formato da “cauda” apresentada por esta curva indica a existência de zonas mortas e recirculações no interior da unidade. Analisando os indicadores de eficiência hidráulica dessa configuração, percebe-se um pequeno aumento de t_i e t_{10} , comprovando a minimização dos caminhos preferenciais. O índice de dispersão dessa unidade ($\sigma^2 = 0,75$) apresenta-se mais próximo do ideal (escoamento pistão) quando comparado com a referência. Porém, para o outro indicador de mistura (índice de Morril), não houve uma mudança significativa do seu valor, o que não é esperado. Esse fato ocorreu possivelmente devido ao segundo pico apresentado pela curva de passagem dessa configuração, provocado pelas recirculações presentes no interior da unidade. Mostrando que o Mo também é influenciado pelo fenômeno de recirculação.

Ao inserir o defletor de escoamento, é possível notar que a curva de passagem se deslocou ainda mais em direção à curva ideal, minimizando os curtos-circuitos. Os valores dos indicadores de curto-circuito encontrados aumentaram cerca de 100% em relação à unidade de referência, comprovando essa redução. Identifica-se também a redução dos valores dos indicadores de mistura, aproximando do ideal, indicando a significativa melhoria da eficiência dessa unidade quando comparada com as configurações de referência e com chicanas transversais, como mostrado pelo diagnóstico dos campos de velocidade. Entretanto, ainda verifica-se a ocorrência de zonas mortas e regiões de recirculações devido a longa “cauda” apresentada pela DTR.

A distribuição de tempo de residência que mais aproximou-se da curva ideal tipo pistão foi obtida utilizando a configuração com as chicanas longitudinais, mostrando que esse modificador de escoamento melhora significativamente a eficiência hidráulica da unidade e do processo. Analisando a curva de passagem, percebe-se que essa também apresenta uma “cauda”, evidenciando a existência de regiões de zonas mortas, conforme mostrado pela investigação do campo de velocidade dessa unidade.

As análises qualitativas, usando a curva de passagem e os campos de escoamento, da configuração com chicanas longitudinais são comprovadas quantitativamente pelos indicadores: $t_i = 0,51$ e $t_{10} = 0,64$; $\sigma^2 = 0,13$ e $Mo = 2,26$. Valores estes mais próximos do



esperado (tipo pistão) encontrados no diagnóstico das configurações estudadas, comprovando o incremento do desempenho da unidade e a vantagem da inserção deste modificador de escoamento.

5 CONCLUSÃO

Os dispositivos modificadores de escoamento desempenham um papel de suma importância em unidades de contato de fluxo contínuo, alterando significativamente seu comportamento hidrodinâmico e, portanto, sua eficiência nos processos em que essas unidades estão operando. Verificou-se que a configuração de referência estudada apresenta uma eficiência bem abaixo da esperada na fase de projeto, o que prejudica consideravelmente o desempenho do processo que está sendo efetuado nessa unidade. A inserção de chicanas longitudinais e do defletor de escoamento propiciou uma melhoria considerável no desempenho da unidade e a adoção desses dispositivos pode permitir o desenvolvimento de projetos mais racionais de novas unidades, além de uma possível melhoria de unidades já existentes.

PERMISSÃO

“Os autores são responsáveis por todo o conteúdo publicado no artigo”.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto Federal do Espírito Santo Campus São Mateus pela estrutura e apoio durante o desenvolvimento deste trabalho.



REFERÊNCIAS

- Almeida, M.M.P., 1997. Estudo do efeito de defletor de escoamento e da relação comprimento/largura efetiva do escoamento na eficiência hidráulica de bacia de sedimentação. Dissertação de mestrado, UFES.
- Angeloudis, A., Stoesser, T., Falconer, R.A. and Kim, D., 2015. Flow, transport and disinfection performance in small- and full-scale contact tanks. *Journal of Hydro-environment Research*, vol. 9, pp. 15-27.
- Gualtieri, C., Angeloudis, A., Bombardelli, F., Jha, S. and Stoesser, T., 2017. Review: On the values for the turbulent Schmidt number in environmental flows. *Fluids*, vol. 2, n. 17, pp. 27.
- Rauen, W.B., Angeloudis, A. and Falconer, R.A., 2012. Appraisal of chlorine contact tank modeling practices. *Water Research*, vol. 46, pp. 5834-5847.
- Sanchez, F.S., Viedma, A. and Kaiser, A.S., 2016. Hydraulic characterization of an activated sludge reactor with recycling system by tracer experiment and analytical models. *Water Research*, vol. 101, pp. 382-392.
- Siqueira, R. N., 1998. Desenvolvimento e aperfeiçoamento de critérios de avaliação da eficiência hidráulica e do cálculo do coeficiente de mistura em unidades de tratamento de água e efluentes. Dissertação de mestrado, UFES.
- Siqueira, R.N., Almeida, M.M.P., Rigo, D. and Teixeira, E.C., 1996. Melhoria da eficiência hidráulica de uma bacia de sedimentação (usina de pelotização), através de modificadores de escoamento. In Proceedings of the III SIBESA – SIMPÓSIO ÍTALO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, ABES/ANDIS/AIDIS. Gramado, Rio Grande do Sul, Brasil.
- Teixeira, E.C. e Siqueira, R.N., 2008. Performance assessment of hydraulic efficiency indexes. *Journal of Environmental Engineering*, vol. 134, pp. 851-859.
- Wilson, J. and Venayagamoorth, S., 2010. Evaluation of hydraulic efficiency of disinfection systems based on residence time distribution curves. *Environmental Science & Technology*, vol. 44, pp. 9377-9382.