

## EFEITOS DAS CONFIGURAÇÕES DE ENTRADA E SAÍDA NO DESEMPENHO DE UNIDADES DE CONTATO DE FLUXO CONTÍNUO

Jordan Deambrosio Cussuol, jordancussuol@live.com<sup>1</sup>

Hédrick Colona, hedrick.colona@gmail.com<sup>1</sup>

Michel de Oliveira dos Santos, michel.santos@ifes.edu.br<sup>1</sup>

Renato do Nascimento Siqueira, renatons@ifes.edu.br<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto Federal do Espírito Santo, Rodovia BR 101 Norte, km 58, Litorâneo, São Mateus, ES, 29932-540, Brasil.

**Resumo:** Diversos processos industriais, assim como sistemas de tratamento de água e efluentes, utilizam unidades de contato de fluxo contínuo para promover a mistura e/ou a separação de constituintes. Bacias de sedimentação, unidades de floculação e desinfecção, tanques de equalização de temperatura e separadores água-óleo na indústria petrolífera, são alguns exemplos. A obtenção de campos de escoamento e distribuição de temperatura e/ou concentração no interior da unidade, auxilia no entendimento do processo, permitindo uma avaliação qualitativa do seu desempenho. A utilização de Distribuições de Tempo de Residência (DTR) também é uma ferramenta qualitativa, mas parâmetros extraídos das DTR, conhecidas como curvas de passagem, permitem uma avaliação quantitativa e podem facilitar a interpretação dos resultados. Utilizando uma abordagem de Dinâmica dos Fluidos Computacional, é feita uma avaliação integrada da eficiência hidráulica e hidrodinâmica de unidades de contato. Neste estudo, uma unidade de contato retangular é utilizada como unidade de referência e 2 configurações distintas de entrada e saída foram avaliadas. Os resultados mostram que a inserção de difusores e vertedores ao longo das seções de entrada e saída, respectivamente, distribuem melhor o fluxo, aumentando a eficiência das unidades.

**Palavras-chave:** unidades de contato, hidrodinâmica de reatores, tratamento de água e efluentes, distribuição de tempo de residência, dinâmica dos fluidos computacional.

### 1. INTRODUÇÃO

A maioria das unidades de tratamento de água e efluentes apresentam eficiência de tratamento abaixo da esperada na fase de projeto, pois, nessa fase, o escoamento na unidade é considerado como ideal, embora os escoamentos reais sejam bem mais complexos, devido a parcelas significativas de curto-circuito e zonas mortas. Além disso, a negligência dos efeitos da configuração da unidade e a ausência de dispositivos de injeção adequados, que permitam uma distribuição uniforme dos constituintes na seção de entrada, corroboram para este cenário (Siqueira *et al.*, 1996).

Teixeira e Siqueira (2008) mostram a importância da hidrodinâmica de reatores no diagnóstico de desempenho e no projeto de novas unidades. De acordo com os autores, quanto maior a eficiência hidráulica de uma unidade, melhor o desempenho do processo.

Vários estudos comprovam a relação existente entre a eficiência hidráulica da unidade e a eficiência do processo (Sanchez, Viedma e Kaiser, 2016; Gualtieri *et al.*, 2017). Porém, somente a avaliação da eficiência hidráulica não fornece detalhes do comportamento hidrodinâmico do escoamento no interior da unidade, o que permite um diagnóstico mais preciso. A modelagem numérica vem como ferramenta de auxílio para este entendimento, visto que a medição de campos de velocidade no interior da unidade, além de onerosa, nem sempre é possível.

Segundo Teixeira e Salgado (2007), a aplicação da modelagem numérica em estudos relacionados à desinfecção de água (hidrodinâmica e processo de tratamento) dá origem a uma nova forma de adquirir conhecimento a respeito de processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem no interior das unidades.

Zhang (2017) mostra, através da aplicação da modelagem numérica, que uma pequena modificação na localização da entrada e da saída de uma unidade de contato aumenta consideravelmente sua eficiência de desinfecção hidráulica.

Neste trabalho, com auxílio da Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD), uma abordagem integrada (hidráulica e hidrodinâmica) é utilizada para se avaliar o efeito das configurações de entrada e saída no desempenho de uma unidade de contato de fluxo contínuo, visando a melhoria de unidades existentes, além do projeto mais racional de novas unidades.

## 2. CARACTERIZAÇÃO DO REGIME DE ESCOAMENTO

A caracterização de regimes de escoamento no interior de unidades de contato é de fundamental importância na análise do seu desempenho, por permitir o conhecimento do grau de existência de curtos-circuitos, zonas mortas e recirculações no interior da unidade. A análise dos campos de escoamento permite identificar, de forma qualitativa, as condições de escoamento que mais se aproximam do tipo ideal (tipo pistão ou mistura completa).

### 2.1. Indicadores de Eficiência Hidráulica

Encontram-se na literatura diversos indicadores que avaliam a eficiência hidráulica de uma unidade de contato. Para o melhor entendimento do comportamento do escoamento no interior da unidade, os indicadores de eficiência hidráulica são divididos em duas categorias: indicadores de curto-circuito e indicadores de mistura. Teixeira e Siqueira (2008) determinaram que os indicadores que melhor representam o fenômeno físico de curto-circuito e mistura, respectivamente, são: tempo inicial de passagem ( $t_i$ ), tempo de chegada de 10% da massa de traçador ( $t_{10}$ ), índice de dispersão ( $\sigma^2$ ) e índice de Morril ( $M_o$ ).

#### 2.1.1 Indicadores de Curto-circuito

Tempo inicial de passagem ( $t_i$ ) é o tempo decorrido desde o momento da injeção do traçador na região de entrada até a sua detecção inicial na saída da unidade. Tempo de chegada de 10% da massa de traçador ( $t_{10}$ ) é o tempo decorrido para que 10% da massa do traçador injetada 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 seção de entrada ( $M_o = t_{90} / t_{10}$ ). O índice de dispersão ( $\sigma^2$ ) é dado pela razão entre a variância da curva de passagem ( $\sigma_t^2$ ) e o tempo médio de detenção ( $t_g$ ), conforme mostrado na Eq. 1.

$$S^2 = \frac{S_t^2}{t_g^2} \quad (1)$$

A variância da curva de passagem é dada por:

$$S_t^2 = \frac{T^2 \int_0^\infty q^2 \cdot E(q) \cdot dq}{\int_0^\infty E(q) \cdot dq} - t_g^2 \quad (2)$$

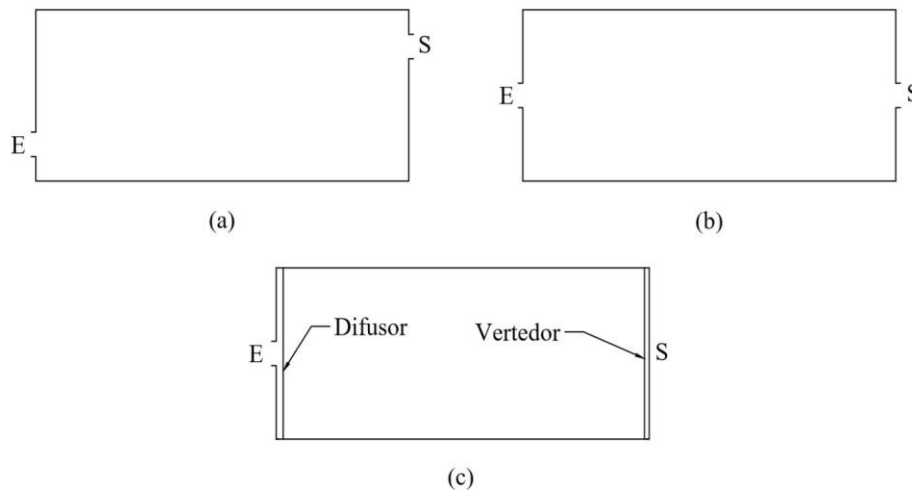
E o tempo médio de detenção, que corresponde ao centroide da área sob a curva de passagem é dado por:

$$t_g = \frac{T \int_0^\infty q \cdot E(q) \cdot dq}{\int_0^\infty E(q) \cdot dq} \quad (3)$$

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

## 3. METODOLOGIA

A unidade de experimentação é constituída de um tanque retangular de 1,61 m de comprimento por 0,70 m de largura e uma altura de lâmina d'água de 0,2 m. Foram avaliadas três configurações de entrada e saída, conforme mostrado na Fig. 1. A vazão utilizada foi de 1,0 l/s. Os canais de entrada e saída da unidade para as configurações de referência e entrada e saída central possuíam 0,1 m de largura e para a configuração de referência (Fig. 1a) estavam posicionados à 0,1 m da lateral. O difusor utilizado (Fig. 1c) consistia em 10 entradas de 0,01 m de largura igualmente distribuídas por toda a seção transversal da unidade.



**Figura 1. Configurações de entrada e saída avaliadas. (a) referência; (b) entrada e saída central; (c) difusor e vertedor.**

Uma malha estruturada foi utilizada nas simulações. A estrutura da malha consiste em 5600 elementos na seção transversal com 322 divisões na direção longitudinal. A escolha da malha se deu após a realização de um teste de malha, verificando a independência dos resultados obtidos em relação ao tamanho dos elementos da malha.

As simulações foram realizadas com o *software* Ansys® CFX 16.0, com utilização do modelo SSG para simular o escoamento turbulento, por levar em consideração as características anisotrópicas do escoamento.

Para a obtenção dos campos de escoamento na unidade foi utilizado a condição de regime permanente, e para determinar as curvas de passagem realizou-se simulações em regime transiente. O critério de convergência adotado foi o valor quadrático médio dos resíduos (RMS) igual a  $1 \times 10^{-5}$ .

A condição de contorno utilizada no topo da unidade foi parede com escorregamento livre (*free slip*).

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

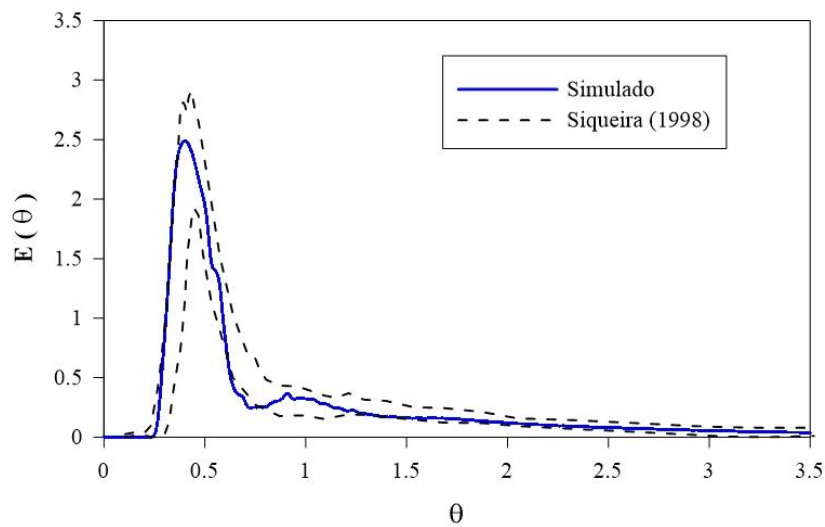
### 4.1. Validação do Modelo Numérico

O modelo CFD utilizado nas simulações foi validado através de uma análise comparativa entre os dados experimentais obtidos por Siqueira (1998) e os resultados encontrados numericamente, tendo como base os mesmos parâmetros e a mesma geometria do autor. A Figura 2 apresenta um esboço da geometria usada, a qual possuía 1,61 m de comprimento por 0,70 m de largura e uma altura de lâmina d'água de 0,20 m. Maiores detalhes das suas dimensões, bem como das condições utilizadas, podem ser encontradas em Siqueira (1998).



**Figura 2. Geometria utilizada para a validação do modelo numérico inspirada no tanque retangular de configuração 3 de Siqueira (1998).**

Comparando a curva de passagem e os indicadores de eficiência hidráulica encontrados no modelo computacional com os resultados experimentais de Siqueira (1998), verificou-se uma boa concordância dos dados, garantindo a boa representatividade do modelo, como pode ser observado na Fig. 3 e na Tab. 1. As linhas tracejadas representam os valores mínimos e máximos encontrados pelo autor durante os testes de reprodutibilidade, que foram digitalizados para permitir a comparação. O erro relativo entre os dados experimentais dos indicadores de eficiência hidráulica apresentados pelo autor e os resultados obtidos pelo modelo neste trabalho é, em média, de 8,5%.



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

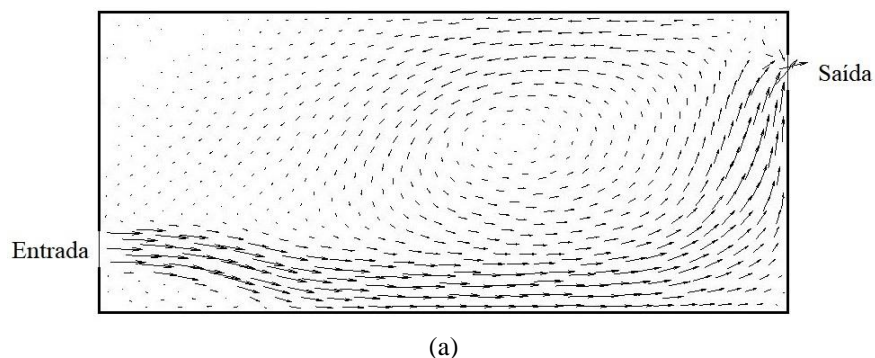
**Tabela 1. Comparação dos indicadores de eficiência hidráulica obtidos pelo modelo numérico com os dados experimentais.**

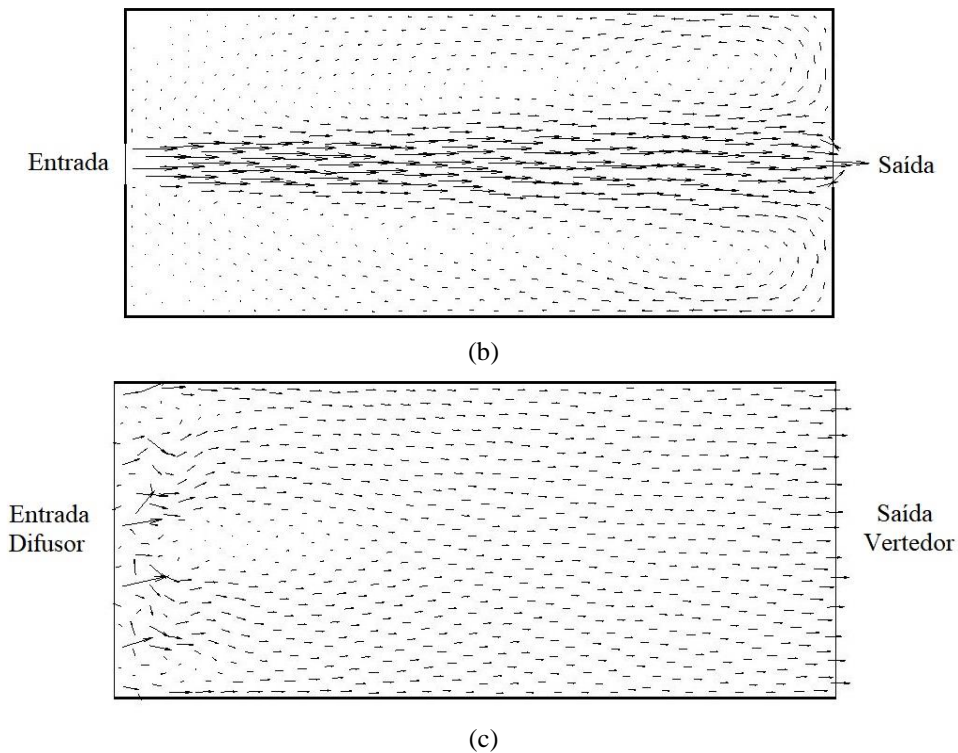
Indicadores de Eficiência Hidráulica	Siqueira (1998)	Modelo numérico
$t_i$	0,29	0,25
$t_{10}$	0,38	0,35
$\sigma^2$	0,58	0,65
$Mo$	5,79	5,80

#### 4.2. Campos de Escoamento

A Figura 4 mostra os campos de velocidade obtidos pelo método computacional para as três configurações de entrada e saída analisadas. É evidente nas Fig. 4a e 4b a existência de curtos-circuitos, regiões de zonas mortas e de recirculações nas configurações de referência e a de entrada e saída centrais, fazendo com que os padrões de escoamento se distanciam do esperado para este tipo de unidade (tipo pistão), reduzindo significativamente o seu desempenho. Percebe-se, qualitativamente, nessas configurações de entrada e saída, principalmente na configuração de entrada e saída centrais, que o grau elevado de curtos-circuitos e zonas mortas fazem com que o volume efetivo da unidade seja reduzido, não atingindo o tempo teórico de detenção especificado no projeto da unidade, além de diminuir sua eficiência hidráulica.

Pode-se observar, através da Fig. 4c, que a inserção do difusor na entrada e do vertedor por toda a seção de saída faz com que o escoamento seja mais uniforme, se aproximando do ideal, indicando um aumento no desempenho dessa unidade.

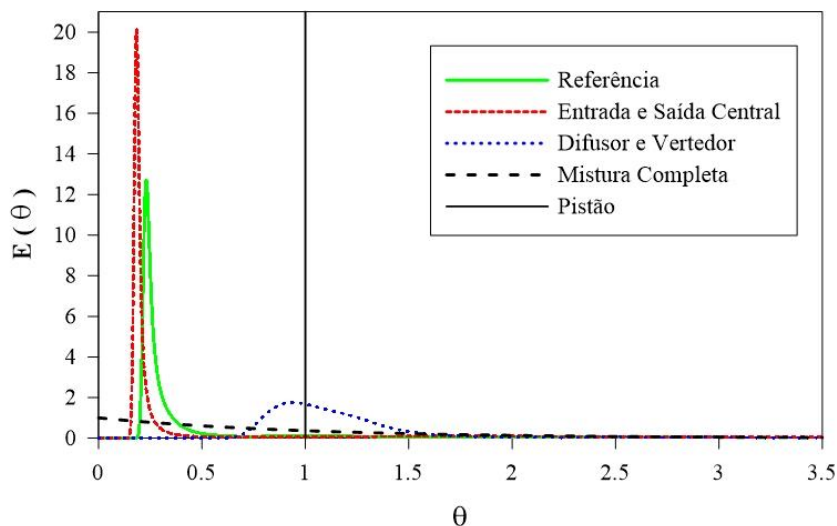




**Figura 4. Influência das configurações de entrada e saída no comportamento hidrodinâmico das unidades de contato. (a) referência; (b) entrada e saída central; (c) difusor e vertedor.**

#### 4.3. Distribuição de Tempo de Residência e Indicadores de Eficiência Hidráulica

As curvas de passagem obtidas para as três unidades são apresentadas na Fig. 5, juntamente com as curvas ideais para os escoamentos do tipo mistura completa e pistão. Os valores dos indicadores de eficiência hidráulica extraídos das curvas de passagem das configurações analisadas são dados na Tab. 2.



**Figura 5. Distribuições de tempo de residência para as diferentes configurações de entrada e saída.**

**Tabela 2. Indicadores de eficiência hidráulica das diferentes configurações de entrada e saída.**

Indicadores de Eficiência Hidráulica	Mistura Completa	Escoamento Pistão	Referência	Entrada e Saída Central	Difusor e Vertedor
$t_i$	0,00	1,00	0,19	0,15	0,63
$t_{10}$	0,11	1,00	0,22	0,17	0,83
$\sigma^2$	1,00	0,00	1,53	2,02	0,15
$Mo$	21,85	1,00	6,68	10,76	1,89

Verifica-se, pela curva de passagem (Fig. 5) e pelos indicadores (Tab. 2), que a configuração de referência possui uma eficiência muito baixa, devido ao fato de apresentar tanto um alto grau de curto-circuito quanto de mistura. Os indicadores de curto-circuito ( $t_i = 0,19$  e  $t_{10} = 0,22$ ) encontrados durante as simulações apresentaram-se distantes do esperado para o caso ideal tipo pistão ( $t_i = 1,00$  e  $t_{10} = 1,00$ ) e relativamente mais próximos do valor para mistura completa. Os indicadores de mistura também indicam uma baixa eficiência da unidade de referência: Índice de Morril (Mo) igual a 6,68 e índice de dispersão igual a 1,53, cujo valores ideais para escoamento tipo pistão são  $Mo = 1,00$  e  $\sigma^2 = 0,00$ .

Analisando a configuração de entrada e saída central, é possível notar que essa configuração apresentou um desempenho menor que o da configuração de referência, mostrando um elevado grau de curto-circuito e mistura, afastando-se significativamente do escoamento ideal tipo pistão. Os indicadores de eficiência hidráulica da Tab. 2 comprovam, quantitativamente, esta análise.

A curva de passagem da configuração de entrada com difusor e saída por vertedor, apresentada na Fig. 5, foi a que mais se aproximou da curva esperada para o escoamento ideal tipo pistão, mostrando que a inserção do difusor e do vertedor por toda a seção de saída na unidade elevam sua eficiência hidráulica. Os indicadores de curto-circuito encontrados foram:  $t_i = 0,63$  e  $t_{10} = 0,83$ , mais próximos do ideal tipo pistão ( $t_i = 1,00$  e  $t_{10} = 1,00$ ), devido ao escoamento mais uniforme na unidade, com baixo grau de curto-circuito. Os indicadores de mistura também se mostram próximos do ideal tipo pistão.

## 5. CONCLUSÃO

Os dispositivos de entrada e saída em unidades de contato de fluxo contínuo são fundamentais para se obter uma boa eficiência nos processos de tratamento de água e efluentes. A inserção de um difusor de entrada e um vertedor por toda a seção de saída da unidade permitiu uma melhoria considerável no desempenho da unidade e a adoção destes dispositivos permitirá o desenvolvimento de projetos mais racionais de novas unidades, além da melhoria do desempenho de unidades já existentes.

## 6. AGRADECIMENTOS

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

## 7. REFERÊNCIAS

- Gualtieri, C., Angeloudis, A., Bombardelli, F., Jha, S., Stoesser, T., 2017, "On the values for the turbulent schmidt number in environmental flows", *Fluids*, Vol. 2, No. 17, pp. 27.
- Mitha, S. A., Mohsen, M. F. N., 1990, "Scale effect on dispersion in chlorine contact chambers", *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 17, pp. 156-165.
- Sanchez, F. S., Viedma, A., 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, Espírito Santo.
- Siqueira, R. N., Almeida, M. M. P., Rigo, D., Teixeira, E. C., 1996, "Melhoria da eficiência hidráulica de uma bacia de sedimentação (usina de pelotização), através de modificadores de escoamento", In: III SIBESA – SIMPÓSIO ÍTALO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA AMBIENTAL, ABES/ANDIS/AIDIS, 1996, Gramado, R.S., Anais do III SIBESA, Gramado.
- Teixeira, E. C., Rauen, W. B., 2014, "Effects of scale and discharge variation on similitude and solute transport in water treatment tanks", *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 140, pp. 30-39.
- Teixeira, E. C., Salgado, A. L., 2007, "Avaliação hidrodinâmica de unidade de floculação chicanada através de modelo numérico tridimensional", In: 24° CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 2007, Belo Horizonte, M.G., Anais do 24° CBESA, Belo Horizonte.
- Teixeira, E. C., Siqueira, R. N., 2008, "Performance assessment of hydraulic efficiency indexes", *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 134, pp. 851-859.
- Zhang, Y., 2017, "Effects of inlet/outlet locations and influent temperature on hydraulic disinfection efficiency in contact tanks", Ph.D. thesis, Colorado State University, Colorado.

## 8. RESPONSABILIDADE AUTURAL

"Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho".

## EFFECTS OF INLET AND OUTLET CONFIGURATIONS IN PERFORMANCE OF CONTINUOUS FLOW CONTACT UNITS

Jordan Deambrosio Cussuol, jordancussuol@live.com<sup>1</sup>

Hédrick Colona, hedrick.colona@gmail.com<sup>1</sup>

Michel de Oliveira dos Santos, michel.santos@ifes.edu.br<sup>1</sup>

Renato do Nascimento Siqueira, renatons@ifes.edu.br<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto Federal do Espírito Santo, Rodovia BR 101, km 58, Litorâneo, São Mateus, ES, 29932-540, Brazil.

**Abstract.** Various industrial processes, as well as water and wastewater treatment systems, use continuous flow contact units to promote mixing and/or separation. Sedimentation basins, flocculation and disinfection units, temperature equalization tanks and water-oil separators in the oil industry are some examples. The velocity fields and distribution of temperature and/or concentration inside the unit assists in the understanding of the process, allowing a qualitative evaluation of its performance. The use of Residence Time Distributions (RTD) is also a qualitative tool, but parameters extracted from the RTD, allow a quantitative evaluation and can facilitate the interpretation of the results. Using a Computational Fluid Dynamics approach, an integrated assessment of the hydraulic and hydrodynamic efficiency of contact units is made. In this study, a rectangular contact unit is used as the reference unit and two different inlet and outlet configurations were evaluated. The results show that the insertion of diffusers and weirs along the inlet and outlet sections, respectively, distributes better the flow, increasing the efficiency of the units.

**Keywords:** contact units, hydrodynamics of reactors, water and effluent treatment, residence time distributions, computational fluid dynamics.