

## **II-389 - AVALIAÇÃO HIDRODINÂMICA DE UM REATOR ANAERÓBIO COMPARTIMENTADO EM ESCALA DE BANCADA**

**Guilherme Araujo Vuitik<sup>(1)</sup>**

Engenheiro Civil pela Universidade Estadual de Ponta Grossa. Mestre em Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP). Doutorando em Hidráulica e Saneamento na EESC/USP.

**Lucas Tadeu Fuess**

Engenheiro Ambiental pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. Mestre em Geociências e Meio Ambiente pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. Doutorando em Hidráulica e Saneamento na EESC/USP.

**Rodrigo Rodrigues Longo**

Engenheiro Ambiental pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. Mestre em Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP).

**Valéria Del Nery**

Engenheira Química pela Universidade Federal de São Carlos. Mestre e Doutora em Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP). Pós-Doutoranda em Hidráulica e Saneamento na EESC/USP.

**Eduardo Cleto Pires**

Engenheiro Mecânico pela Universidade São Paulo. Mestre em Engenharia Mecânica pela PUC/RJ. Doutor em Hidráulica e Saneamento na EESC/USP. Pós doutorado na Universidade de Oxford, Universidade de Miami e Universidade do Arkansas. Professor Titular no Departamento de Hidráulica e Saneamento na EESC/USP.

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Av. Trabalhador São Carlense, - Centro – São Carlos – SP - CEP: 13566-590 - País - Tel: +55 (16) 3373-9552- Fax: +55 (16) 3373-8269 - e-mail: [guilhermევuitik@usp.br](mailto:guilhermევuitik@usp.br)

### **RESUMO**

Uma das vantagens mais significativas do reator anaeróbio compartimentado (RAC) frente às demais tecnologias de tratamento anaeróbio é a sua capacidade de separar acidogênese e a metanogênese no sentido longitudinal do reator, permitindo que o mesmo se comporte como um sistema de duas fases. Estratégias empregadas para aumentar a eficiência do tratamento em outras configurações de reatores anaeróbios, como a recirculação aplicada em reatores de manto de lodo, podem decorrer em efeitos adversos ao RAC. O objetivo deste trabalho foi elucidar o comportamento hidrodinâmico e avaliar a influência de diferentes taxas de recirculação em um reator anaeróbio compartimentado em escada de bancada. A metodologia do ensaio hidrodinâmico consistiu em instalar, na saída de um RAC submetido a diferentes taxas de recirculação, um vertedor com uma sonda, acoplada a um transdutor, que por sua vez foi acoplado a uma calculadora. Os sinais foram interpretados pela calculadora e geraram as curvas de concentração de traçador na saída do reator ao longo do tempo. Esses dados foram tratados matematicamente para indicar o grau de mistura do reator em diferentes taxas de recirculação. Os resultados indicaram que ao aplicar uma recirculação de 100% o valor de  $N$  é igual a 5, um valor que praticamente coincide com o número de câmaras do reator, o que sugere que empregando-se recirculações menores ou iguais a 100%, a capacidade de especialização da biomassa no interior de cada uma das câmaras poderia ser preservada, embora seriamente comprometida. A partir da recirculação de 100% o reator passa a se comportar praticamente como reator de mistura perfeita ideal. Conclui-se que uma vez que acima de 100% de recirculação o reator compartimentado passa a se comportar praticamente como mistura perfeita ideal, nos casos em que a aplicação de recirculação dessa ordem sejam inevitáveis, uma solução mais indicada seria a de se empregar reatores que, ao contrário do RAC, partem do pressuposto que o escoamento em seu interior é do tipo mistura perfeita.

**PALAVRAS-CHAVE:** Grau de mistura, hidráulica de reatores, reator compartimentado.

### **INTRODUÇÃO**

Os reatores reais são versões imperfeitas de alguns reatores ideais, sendo que existem três modelos básicos utilizados para estimar as variáveis de processo mais importantes de diferentes reatores químicos:

- Batelada: reator descontínuo no qual não há gradientes espaciais em um dado volume de controle;

- Mistura completa: reator contínuo no qual não há gradientes espaciais em um dado volume de controle;
- Reator tubular (escoamento pistão): reator contínuo cujo pressuposto fundamental é que, como um pistão fluindo através do reator, o fluido é perfeitamente misturado na direção radial, mas não na direção axial.

O tempo de residência ou tempo de detenção hidráulica ou ainda tempo de retenção hidráulica é a medida natural de desempenho dos reatores contínuos. Ele é definido como a razão entre o volume do reator ( $V$ ) e a vazão volumétrica de alimentação ( $Q$ ), como:

$$\theta_h = \frac{V}{Q} \quad \text{Eq.(1)}$$

O balanço de massa para o reator de mistura perfeita é obtido através da expressão geral do balanço de massa. Como a composição é uniforme dentro do reator, característica garantida pela mistura perfeita, o balanço pode ser feito considerando todo o reator como elemento de volume.

O balanço de massa em reator de mistura perfeita, isotérmico, com volume constante e em regime permanente resulta em:

$$\theta_h = \frac{C_{Ao} - C_A}{(-r_A)} = \frac{C_{Ao} X_A}{(-r_A)} \quad \text{Eq.(2)}$$

Em muitos casos, reatores podem ser conectados em série ou em paralelo. Estas combinações podem ter um objetivo específico relacionado à obtenção de um produto de interesse ou, muitas vezes, apenas representam a ampliação de uma planta.

Considerando um sistema de  $N$  reatores de mistura perfeita, com mesma capacidade e conectados em série, embora a concentração seja uniforme em cada reator, há uma variação na concentração conforme o fluido se move de um reator a outro. A diminuição gradual da concentração sugere que quanto maior for o número de unidades em série, mais o sistema se comporta como escoamento pistonado.

Se houver combinação de múltiplos reatores de mistura perfeita e com mesma capacidade em série, a concentração do reagente decrescerá progressivamente ao longo do sistema combinado como ocorre em um reator tubular ideal. A diminuição gradual da concentração sugere que quanto maior for o número de unidades em série, mais o sistema se comporta como escoamento pistonado.

Desenvolvendo o balanço de massa para um reagente “A” em um dado reator “ $i$ ” com volume constante, em um conjunto de  $N$  reatores de mistura perfeita em série, é obtida a seguinte expressão:

$$\theta_{hi} = \frac{C_{A(i-1)} - C_{A(i)}}{(-r_{Ai})} \quad \text{Eq.(3)}$$

Para uma cinética de primeira ordem, a Equação 3 assume a seguinte forma:

$$\frac{C_{A(i-1)}}{C_{A(i)}} = 1 + k_1 \cdot \theta_{hi} \quad \text{Eq.(4)}$$

Uma vez que o tempo de detenção hidráulica é igual em todos os reatores de igual volume ( $V_i$ ):

$$\frac{C_{Ao}}{C_{AN}} = (1 + k_1 \cdot \theta_{hi})^N \quad \text{Eq.(5)}$$

É obtida equação para o sistema total, pelo rearranjo da Equação 3:

$$\theta_{hT} = N.\theta_{hi} = \frac{N}{k_1} \left[ \left( \frac{C_{Ao}}{C_{AN}} \right)^{\frac{1}{N}} - 1 \right] \quad \text{Eq.(6)}$$

Na Equação 6,  $\theta_{hT}$  é o tempo de residência total do sistema,  $\theta_{hi}$  é o tempo de residência em cada reator,  $N$  é o número de reatores em série,  $C_{Ao}$  é a concentração do reagente “A” na entrada do primeiro reator e  $C_{AN}$  é a concentração do reagente “A” na saída do último reator, ou seja, na saída do sistema.

O reator anaeróbio compartimentado (RAC) é constituído por um sistema de tanques em série e de fluxo ascendente. Este sistema é projetado para que o fluido seja alimentado no primeiro compartimento, percorrendo-o de forma ascendente, e deixando-o por meio de um tubo que é introduzido no fundo do próximo compartimento. O mesmo conceito é válido para os compartimentos subsequentes.

Os sólidos são mantidos no interior do reator em função da própria configuração do mesmo. As bactérias crescem lentamente e sedimentam devido às características do escoamento e produção de gás. A parcela mais significativa de sólidos permanece no primeiro compartimento, sendo os demais responsáveis pelo polimento do efluente. Naturalmente ocorrem perdas de sólidos, uma vez que o sistema é desprovido de um sistema de separação trifásico, no entanto as perdas ocorrem com velocidade reduzida (Sarathai et al., 2010; Wang et al., 2004).

Além de sua capacidade de desenvolver lodo granular, o RAC apresenta inúmeros outros benefícios que o tornam um dos sistemas anaeróbios mais estáveis para o tratamento de águas residuárias (Uyanik et al., 2002).

Provavelmente a vantagem mais significativa do reator anaeróbio compartimentado é a sua capacidade de separar acidogênese e a metanogênese no sentido longitudinal do reator, permitindo que o mesmo se comporte como um sistema de duas fases (Weiland; Rozzi, 1991). A operação em duas fases pode aumentar a atividade acidogênica e metanogênica pelo fato das bactérias acidogênicas se acumularem nas primeiras câmaras (COHEN et al., 1980, 1982), e de que diferentes grupos de bactérias podem se desenvolver em meios que apresentarem condições mais favoráveis. As vantagens da operação em duas fases têm sido amplamente estudadas (POHLAND; GHOSH, 1971; GHOSH et al., 1975; COHEN et al., 1980, 1982).

Recircular o efluente tratado é uma estratégia empregada na operação de reatores anaeróbios de manta de lodo (UASB) que tratam efluentes concentrados. Esse tipo de água residuária naturalmente conduz a uma cinética com inibição por excesso de substrato no reator e a recirculação do efluente tratado é aplicada para diluir a água residuária, fazendo com que o sistema não entre em colapso e opere em um ponto com cinética mais favorável. No entanto, no caso de reatores compartimentados, pouco se sabe a respeito da cinética individual de cada câmara e se todas de fato requerem diluição do afluente, portanto os efeitos da recirculação ainda são apenas parcialmente conhecidos.

Teoricamente, a recirculação deveria ter um efeito negativo na hidrodinâmica uma vez que promove mistura, a qual promove perda de sólidos e rompe microestruturas de bactérias que vivem em relações de simbiose (Henze; Harremoës, 1983) e aumenta a quantidade de espaços mortos (Grobecki; Stuckey, 1992; Nachaiyasit, 1995). A mistura causada pela recirculação também tem sido relatada como uma causa para o retorno ao sistema de uma única fase de digestão, portanto os benefícios da separação entre acidogênese e metanogênese são parcialmente perdidos (Bachmann et al., 1985).

Na sua tese, Nachaiyasit (1995) mostrou que os espaços mortos dobraram quando a razão de recirculação foi aumentada de zero para 2. O autor também verificou uma repentina perda de sólidos quando a razão foi dobrada. A mistura causada pela recirculação também tem sido relatada como uma causa para o retorno ao sistema de uma única fase de digestão, portanto os benefícios da separação entre acidogênese e metanogênese são parcialmente perdidos (ZHU et al., 2008). Bachmann et al. (1985) verificou que a atividade metanogênica foi mais uniformemente distribuída em todo o reator depois que a recirculação foi empregada. Nachaiyasit (1995) verificou uma queda na produção de gás no reator quando a razão de recirculação foi aumentada.

Chynoweth et al. (1980), por sua vez, observaram um positivo efeito causado pela recirculação de 20% do efluente, quando a produção de metano aumentou aproximadamente 30%. A adição de recirculação também aliviou os problemas

de baixo pH causado pelos altos níveis de ácidos voláteis (BACHMANN et al., 1983). Outro benefício da recirculação é a diluição de tóxicos e redução da inibição pelo substrato (CHEN et al., 2008).

Os benefícios da recirculação em reatores compartimentados são incertos, e seu uso dependerá do tipo de água residuária a ser tratada. A recirculação será benéfica caso os problemas devido ao pH sejam relevantes e a água residuária contenha altos níveis de materiais tóxicos ou altas cargas orgânicas. No entanto, as desvantagens da recirculação mostram que ela deve ser empregada com cautela, e apenas quando absolutamente necessária.

## OBJETIVO

O objetivo deste trabalho foi elucidar o comportamento hidrodinâmico e avaliar a influência de diferentes taxas de recirculação em um reator anaeróbio compartimentado em escada de bancada.

## MATERIAIS E MÉTODOS

O reator avaliado foi construído em PVC, com quatro compartimentos com 650 mm de altura e 100 mm de diâmetro (Figura 1), perfazendo um volume reacional de 5 L em cada câmara (volume total igual a 20 L).



**Figura 1: Reator anaeróbio compartimentado**

A metodologia do ensaio hidrodinâmico consistiu em instalar, na saída do reator, um vertedor com uma sonda, acoplada a um transdutor, que por sua vez foi acoplado a uma calculadora. Os sinais foram interpretados pela calculadora e geraram as curvas de concentração de traçador na saída do reator ao longo do tempo, chamada curva C.

Este procedimento foi realizado para o reator sem recirculação (vazão de  $1,82 \text{ L.h}^{-1}$ ), e para as recirculações de 100, 200, 300 e 400% em relação à vazão do reator sem recirculação. Empregou-se NaCl como traçador, o qual foi aplicado ao reator na forma de estímulo degrau ( $10 \text{ g.L}^{-1}$ ).

A curva C é uma ferramenta útil para se avaliar qualitativamente o comportamento hidráulico de um reator, no entanto, lançando-se mão de operações de cálculo é possível extrair informações quantitativas que mensuram a hidráulica do reator, como as curvas de distribuição do tempo de detenção hidráulico (curva E), o tempo de detenção hidráulico real ( $\theta_R$ ) e o modelo do escoamento (tendendo a mistura perfeita ou pistonado).

A primeira operação realizada com os dados foi transformar a curva C na curva F, que se trata da curva C normalizada, obtida através da Equação 7.

$$F = \frac{C}{C_{max}} \quad \text{Eq.(7)}$$

Considerando a vazão de alimentação do reator constante, as curvas E foram obtidas através da Equação (8).

$$E(t) = \frac{dF}{dT} \quad \text{Eq.(8)}$$

O tempo de detenção hidráulico médio pode então ser determinado para cada um dos ensaios, empregando-se a Equação (9).

$$\bar{\theta}_h = \int_0^{\infty} t \cdot E(t) \cdot dt \quad \text{Eq.(9)}$$

A variância ( $\sigma^2$ ) da curva E indica a dispersão da distribuição, quanto maior o valor da variância, maior a dispersão. Ela foi obtida através da Equação 10.

$$\sigma^2 = \int_0^{\infty} (t - \bar{\theta}_h)^2 \cdot E(t) \cdot dt \quad \text{Eq.(10)}$$

Conhecendo-se a variância em cada um dos ensaios, empregando-se a Equação 11, calculou-se as variâncias adimensionais ( $\sigma_{\theta}^2$ ), as quais permitiram o cálculo do número de reator de mistura perfeita em série (N), conforme Equação 12, e o número de dispersão longitudinal (D/uL), considerando o modelo de pequena dispersão (D/uL < 0,01) e o modelo de grande dispersão (D/uL > 0,01), conforme equações 13 e 14. Ambos os parâmetros, N e D/uL, revelam o desvio da idealidade que a hidráulica do reator apresenta, tendendo ou para um reator de mistura perfeita, ou para um reator do tipo pistão.

$$\sigma_{\theta}^2 = \frac{\sigma^2}{\bar{\theta}_h^2} \quad \text{Eq.(11)}$$

$$\sigma_{\theta}^2 = \frac{1}{N} \quad \text{Eq.(12)}$$

$$\sigma_{\theta}^2 = 2 \left( \frac{D}{uL} \right) \quad \text{Eq.(13)}$$

$$\sigma_{\theta}^2 = 2 \left( \frac{D}{uL} \right) + 8 \left( \frac{D}{uL} \right)^2 \quad \text{Eq.(14)}$$

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 2 são apresentadas as curvas F para as diferentes taxas de recirculação aplicadas ao reator.

Fica evidente que embora o reator tenha sido concebido com uma relação comprimento/diâmetro grande, de modo a buscar preservar as características de escoamento pistonado, as aplicações de todas as razões de recirculação apresentaram grande desvio da idealidade, conduzindo a escoamentos do tipo mistura perfeita.

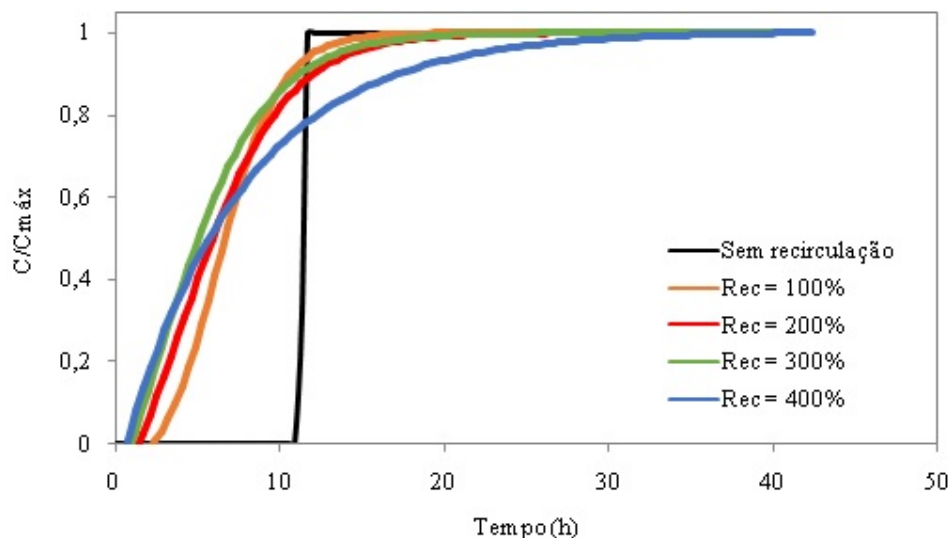


Figura 2: Curvas F para as diferentes recirculações avaliadas

Na Tabela 1 são resumidos os dados de tempo de detenção hidráulico, N e D/uL para todos os ensaios realizados. É possível observar que para uma operação sem recirculação, o modelo hidrodinâmico do reator pode ser considerado o de mistura perfeita ideal, pois  $N \gg 30$  (Levenspiel, 1974).

Tabela 1: Resumo dos dados dos ensaios hidrodinâmicos

Recirculação (%)	$\theta$ (h)	N	D/uL	
			Pequena Dispersão	Grande Dispersão
0	11,4	1694	0,0003	0,0003
100	7,1	5	0,1050	0,0796
200	6,8	2	0,2237	0,1425
300	6,0	2	0,2660	0,1616
400	7,8	1	0,4295	0,2257

Aplicando-se uma recirculação de 100% o valor de N é reduzido drasticamente para 5, um valor que praticamente coincide com o número de câmaras do reator, o que sugere que empregando-se recirculações menores ou iguais a 100%, a capacidade de especialização da biomassa no interior de cada uma das câmaras poderia ser preservada, embora seriamente comprometida. A partir da recirculação de 100% o reator passa a se comportar praticamente como reator de mistura perfeita ideal.

## CONCLUSÃO

O reator anaeróbio compartimentado estudado foi concebido com características que garantem que o escoamento em seu interior é do tipo pistonado desde que não haja recirculação do efluente, conforme atestado por ensaio hidrodinâmico.

O tratamento de efluentes concentrados normalmente requer recirculações acima de 100%. Nessa faixa de operação o reator avaliado não mais se comporta como pistão e passa a apresentar um escoamento do tipo mistura perfeita. Desta forma, o emprego de reatores compartimentados perde o sentido, uma vez que sua concepção se baseia na premissa de que o escoamento será pistonado, preservando a principal vantagem deste tipo de reator: sua capacidade de especializar a biomassa.



Uma vez que acima de 100% de recirculação o reator compartimentado passa a se comportar praticamente como mistura perfeita ideal, nos casos em que a aplicação de recirculação dessa ordem sejam inevitáveis, uma solução mais indicada seria a de se empregar reatores que, ao contrário do RAC, partem do pressuposto que o escoamento em seu interior é do tipo mistura perfeita.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Bachmann, A.; Beard, V. L.; McCarty, P. L. (1985) Performance characteristics of the anaerobic baffled reactor. *Water Resource*, 19, 99-106.
2. Grobicki, A.M.W.; Stuckey, D.C. (1992) Hydrodynamic characteristics of the anaerobic baffled reactor. *Water Resource*, 26, 371-378.
3. Henze, M.; Harremoës, P. (1983) Anaerobic treatment of wastewater in fixed film reactors: a literature review. *Water Science Technology*, 15, 1-101.
4. Levenspiel, O. (1974) *Chemical reaction engineering*. New Delhi, Wiley Eastern Pvt. Ltd.
5. Nachaiyasit, S. (1995) The effect of process parameters on reactor performance in an anaerobic baffled reactor. Tese de doutorado, Departamento de Engenharia Química, Imperial College, London, U.K.
6. Uyanik, S.; Sallis, P.J.; Anderson, G.K. (2002). The effect of polymer addition on granulation in an anaerobic baffled reactor (ABR). Part I: process performance. *Water Resource*, 36, 933-943.
7. Weiland, P.; Rozzi, A. (1991) The start-up, operation and monitoring of high-rate anaerobic treatment systems: discussers report. *Water Science and Technology*, 24, 257-277.