

# ENSAIOS DE AVALIAÇÃO HIDRODINÂMICA DE REATOR AERÓBIO COMO PÓS-TRATAMENTO DE FILTRO ANAERÓBIO

Rodrigo da Silva Prado (UEPG) rodrigoprado94@gmail.com  
Ana Carolina Barbosa Kummer (UEPG) ackummer@hotmail.com  
Marcos Rogério Széliga (UEPG) marcosrs@uepg.br  
Maria Magdalena Ribas Döll (UEPG) mmdoll@uepg.br

**Resumo:** O presente estudo teve como objetivo avaliar o comportamento hidrodinâmico de um reator aeróbio em escala piloto, tendo como variáveis: material suporte para imobilização da biomassa, aeração, vazão afluente, tempo de detenção hidráulica (TDH), traçador e tipo de aplicação do traçador. O reator foi projetado como pós-tratamento de um filtro anaeróbio. Os ensaios foram realizados com traçador azul de metileno (1%) aplicado diluído (em solução de 0,5 mL L<sup>-1</sup> com vazão contínua) e concentrado (aplicado senoidalmente tipo pulso). Outro traçador avaliado foi o cloreto de sódio diluído em solução 0,5 g L<sup>-1</sup> aplicado de forma contínua. Os ensaios foram monitorados pelo acompanhamento de observações visuais documentadas por fotografias de absorvância para o traçador de cor, azul de metileno, e condutividade elétrica para o traçador químico, cloreto de sódio. As fotos foram retiradas em intervalos constantes. Os dados foram trabalhados em um programa computacional (MATLAB®) para tabulação, geração de gráficos e avaliação de imagens. Os resultados dos ensaios com azul de metileno ajudaram a entender a hidrodinâmica do reator aeróbio estudado. A presença de biomassa dentro do reator não prejudicou a mistura do licor, se este for submetido à aeração, demonstrando que, pelo aspecto hidrodinâmico, o reator pode ser usado como pós-tratamento de um filtro anaeróbio no tratamento de água residuária orgânica, finalidade para a qual foi projetado.

**Palavras-chave:** Comportamento hidrodinâmico, traçador, azul de metileno, cloreto de sódio.

## HYDRODYNAMIC OF AN AEROBIC REACTOR AS POST-TREATMENT OF AN ANAEROBIC FILTER

**Abstract:** The objective of this study was to evaluate the hydrodynamic behavior of an aerobic reactor in pilot scale, with the variables: filling, aeration, flow rate, hydraulic retention time (HRT), and type of tracer application. The reactor was designed to be used as a post-treatment of an anaerobic filter. Assays were performed with methylene blue tracer (1%) diluted applied (in 0,5 mL L<sup>-1</sup> solution to continuous flow) and concentrated (applied sinusoidal pulse type). Sodium chloride in solution 0,5 g L<sup>-1</sup> was also used. The results were analyzed by absorbance monitoring and electrical conductivity. As well as the hydrodynamic studies, visual observations of the mixture with methylene blue were accompanied by photographs taken at constant periods. The data were worked in a computer program (MATLAB®) for tabulation, charting and evaluation of images. The results of tests with methylene blue helped to understand the hydrodynamics of the studied aerobic reactor. The presence of biomass in the reactor did not affect the mixing of licor if the latter is subjected to aeration, demonstrating that, by the hydrodynamic aspect, the reactor can be used as post-treatment of an anaerobic filter for treating organic waste water, the purpose for which it was designed.

**Keywords:** hydrodynamic behavior, tracer, methylene blue, sodium chloride.

### 1. INTRODUÇÃO

Os processos biológicos anaeróbios de tratamento de águas residuárias destacam-se entre os processos biológicos de tratamento, principalmente pelo baixo consumo de energia e a pequena quantidade de lodo de descarte, sendo necessários estudos a respeito da viabilidade técnica e ambiental (LAPA, 2006). Nesse sentido, o estudo do comportamento hidrodinâmico de reatores contribui para o aumento da eficiência desses sistemas e segundo Salgado (2008), conhecer esse comportamento permite obter equações de desempenho e modelos mais satisfatórios.

A hidrodinâmica dos reatores anaeróbios tem papel importante porque pode influenciar a velocidade das reações biológicas, por meio de alterações na taxa de

transferência de massa e a distribuição das reações ao longo do reator. Como consequência da distribuição da biomassa e do encadeamento das reações bioquímicas, diferentes regiões do reator apresentam composições diferentes, em função do tipo de escoamento imposto. Além disso, curtos-circuitos hidráulicos, caminhos preferenciais e zonas mortas (sem presença de substrato na alimentação) podem prejudicar a eficiência dos reatores no tratamento de águas residuárias devido à diminuição do volume útil e do tempo de detenção hidráulica dos reatores (CARVALHO et al., 2008).

Dantas et al. (2000) utilizaram cloreto de sódio como traçador para avaliar as características hidrodinâmicas (tempo de residência médio e intensidade da dispersão) de quatro filtros anaeróbios descendentes afogados com diferentes enchimentos. Através dos resultados obtidos os autores contataram escoamento do tipo mistura em todos os reatores estudados bem como a identificação de regiões de estagnação e recirculação interna.

Carvalho et al. (2008) estudando a hidrodinâmica de um reator UASB submetido à variação cíclica de vazão, concluíram que o reator apresentou comportamento similar ao de reator de mistura completa para vazão média afluyente constante e similar ao reator de fluxo pistonado com a aplicação das variações senoidais cíclicas.

O estudo hidrodinâmico de reatores pode ser realizado através de um método denominado estímulo-resposta, no qual se utiliza um traçador de concentração conhecida, possibilitando a obtenção da distribuição do tempo de residência do fluido. Vale mencionar que o traçador não deve interferir nos processos físico-químicos e biológicos os quais podem alterar a hidrodinâmica desse fluido dentro do reator (BELINI et al., 2012; VILAR, et al., 2012).

Na literatura científica encontram-se muitos trabalhos onde se investigaram o comportamento hidrodinâmico de reatores (CARVALHO, 2006; CARVALHO et al., 2008; BELINI et al., 2012; VILAR et al., 2012; CASTRO, 2010; FREITAS, 2013), e para Dantas et al. (2000) o estudo desse comportamento é de grande importância de maneira que se possa estabelecer os regimes de fluxo (fluxo pistão, fluxo mistura completa ou ambos) bem como detectar a presença de anomalias do fluxo no aparato do processo, ou seja, detecção de canais preferenciais e zonas mortas que podem reduzir a eficiência do reator.

Assim, o protótipo modificado apresentado por Rufato et al. (2004), foi proposto e dimensionado como pós tratamento de um filtro anaeróbio, constituído por um reator aeróbio com adaptações, com o objetivo de avaliar o comportamento hidrodinâmico desse reator com e sem material de preenchimento para suporte da biomassa aeróbia tendo como traçadores azul de metileno e cloreto de sódio aplicados em pulso e contínuo.

## **2. MATERIAIS E MÉTODOS**

### **2.1 Reator**

O reator em escala piloto, utilizado para os ensaios de estímulo-resposta tipo pulso e contínuo, foi confeccionado em acrílico com um tubo concêntrico e volume total de 3,302 L, conforme Figura 1. O tubo maior era caracterizado por 0,42 m de altura, 0,10 m de diâmetro e fundo cônico (altura de 0,045 m) como um decantador de biomassa quando suspensa. No topo do reator, com diâmetro de 0,15 m, foram instalados defletores de 45° a 60°. Uma saída de ar e do efluente foi prevista na parte superior do reator (Figura 1).

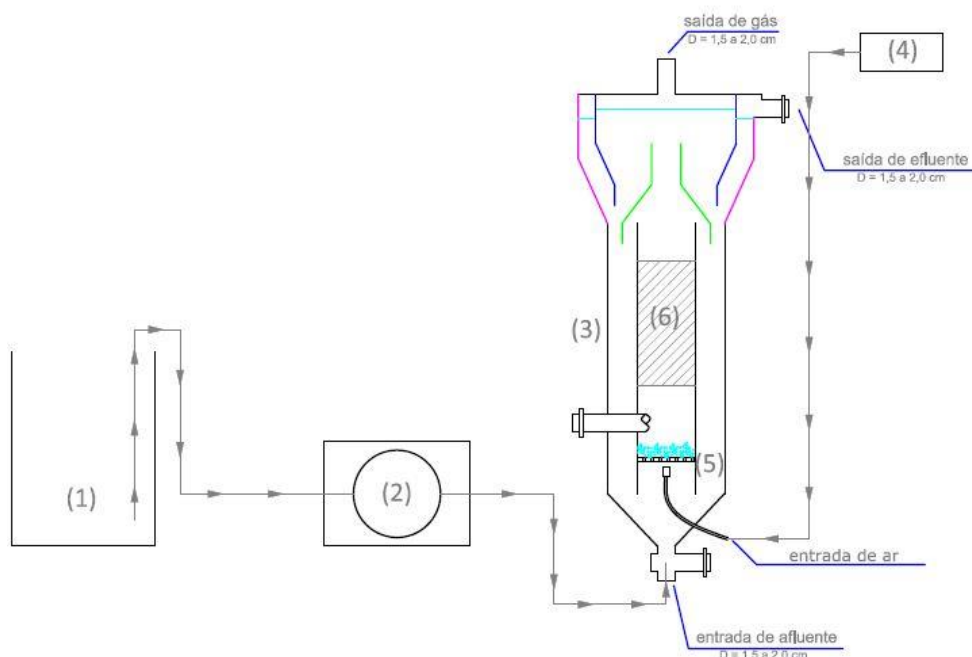


Figura 1 – Esquema do reator aeróbio em escala piloto - (1) Afluente, (2) Bomba peristáltica, (3) Reator aeróbio, (4) Bomba de ar, (5) Placa difusora de ar e (6) Região de análise de imagens.

## 2.2 Material de preenchimento

Foram testados dois meios suportes de biomassa, caracterizados por: a) anéis de polietireno expandido (PE) com 30 mm de diâmetro externo, 25 mm de diâmetro interno e 5 mm de espessura; e b) cubos de espuma de poliuretano (EP) de 13x13x13 mm. A Figura 2 apresenta as diferentes fases de preenchimento do reator aeróbio.

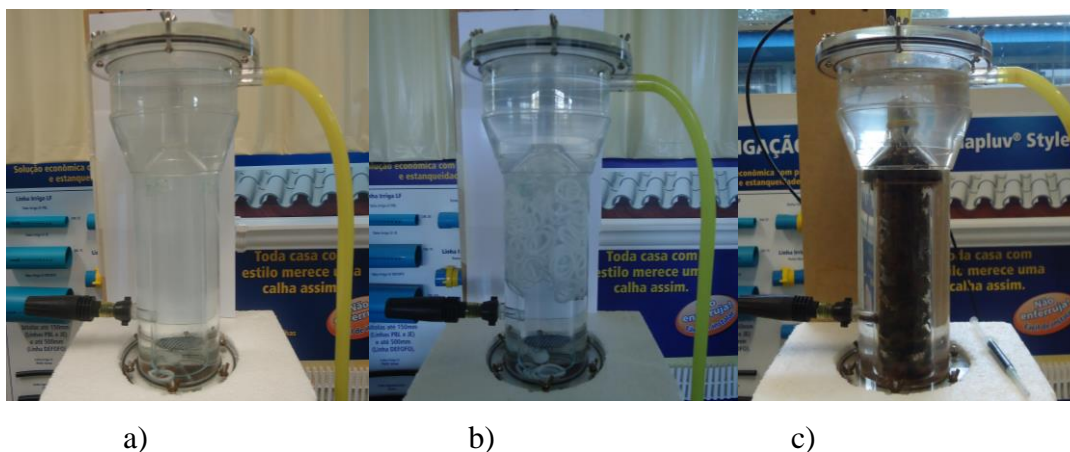


Figura 2 – Fases de preenchimento do reator aeróbio: a) Reator preenchido somente com água potável; b) Reator preenchido com água potável e anéis de polietireno expandido e c) Reator preenchido com água potável, biomassa e espuma de poliuretano.

## 2.3 Operação do reator e ensaios hidrodinâmicos

O reator foi alimentado com água potável em diferentes condições operacionais, com variação de preenchimento, aeração, vazão afluente, tempo de detenção hidráulica (TDH), traçador e tipo de aplicação do traçador, conforme a Tabela 1.

Tabela 1 - Condições operacionais do reator aeróbio para os ensaios estímulo-resposta.

Ensaio	Preenchimento <sup>1</sup>	Q <sub>af.</sub> <sup>2</sup> (L h <sup>-1</sup> )	TDH <sup>3</sup> (h)	Aeração	Traçador	Aplicação
1	-	0,48	6,30	Não	Azul de Metileno	Pulso
2	Anéis de PE <sup>4</sup>	0,33	8,50	Não	Azul de Metileno	Contínuo
3	Anéis de PE	0,33	8,50	Não	NaCl <sup>5</sup>	Contínuo
4	Biomassa e cubos de EP <sup>6</sup>	0,74	2,77	Sim	Azul de Metileno	Pulso
5	Biomassa e cubos de EP	0,74	2,77	Sim	NaCl	Contínuo
6	-	0,74	4,00	Sim	Azul de Metileno	Pulso

<sup>2</sup>Vazão de entrada (afluente); <sup>3</sup>Tempo de detenção hidráulica; <sup>4</sup>Anéis de polietireno expandido;

<sup>5</sup>Cloreto de sódio; <sup>6</sup>Cubos de espuma de poliuretano.

Os ensaios 1 e 6 foram realizados com o reator preenchido somente com água potável, sem meio suporte e/ou biomassa. Nos ensaios 2 e 3 utilizaram-se água mais o meio suporte (anéis de espuma de polietireno) como preenchimento, enquanto que nos ensaios 4 e 5, o meio suporte eram cubos de espuma de poliuretano colonizados por biomassa, proveniente de um RALF de uma estação de tratamento de esgotos que foi adicionado às espuma na proporção de 10% (v/v).

Testaram-se duas condições de aeração (presença e ausência), a qual foi efetuada por um compressor de ar com capacidade de 210 L h<sup>-1</sup>. Com auxílio de um temporizador. A aeração no reator era acionada em intervalos de 15 minutos com duração de 15 minutos, até completar o tempo de detenção hidráulica de cada ensaio.

Nos ensaios houve variação tanto da vazão afluente (0,33, 0,478 e 0,742 L h<sup>-1</sup>) quanto do tempo de detenção hidráulica (2,77, 4,00, 6,30 e 8,5).

Os traçadores e a forma de aplicação variaram entre pulso e contínuo, tanto para o azul de metileno 1%, quanto para o cloreto de sódio (Tabela 1).

Para aplicação contínua, os traçadores foram diluídos em água nas concentrações 0,5 mL L<sup>-1</sup> de azul de metileno e 0,5g L<sup>-1</sup> de cloreto de sódio. A injeção foi realizada na tubulação de silicone de alimentação do reator a cerca de 10 cm da entrada do afluente. A aplicação do traçador azul de metileno quando em pulso, nos ensaios 1, 4 e 6, foi realizada com uma seringa (volume útil de 5 mL), utilizando-se 2 mL do traçador com tempo de injeção de aproximadamente 5 segundos.

## 2.4 Análises

Em todos os ensaios coletaram-se amostras na saída de efluente do reator no decorrer do TDH. Nos ensaios 1, 2, 4 e 6, em que se utilizou o azul de metileno como traçador, as amostras foram submetidas à leitura de absorvância para determinação da concentração do traçador. As leituras foram realizadas em espectrofotômetro no comprimento de onda de 650 nm. A conversão das leituras para concentração em massa por unidade de volume se deu por um modelo de regressão, o qual foi gerado a partir de leituras em absorvância (650 nm) de amostras contendo uma concentração conhecida de azul de metileno em doses crescentes. O modelo que rege esse comportamento é dado pela equação 1:

$$y = 8,7841x + 0,1484 \quad \text{equação (1)}$$

Onde:  $y$  = concentração em massa por unidade de volume,  $\text{mg L}^{-1}$ ;  
 $x$  = leitura em absorvância (650 nm)

Para os ensaios com NaCl foram determinadas as condutividades elétricas das amostras. As leituras foram realizadas em condutivímetro de bancada, à temperatura ambiente de 22°C.

No ensaio 1, observações visuais da mistura com azul de metileno foram acompanhadas por fotos retiradas em intervalos constantes. Os dados foram trabalhados em um programa computacional (MATLAB®) para tabulação, geração de gráficos e avaliação de imagens, permitindo uma melhor visualização do escoamento bem como a identificação de regiões de estagnação e caminhos preferenciais.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 2 são apresentados os pontos máximos observados de concentração e condutividade elétrica, bem como seus respectivos tempos de alcance, obtidos a partir da aplicação dos traçadores azul de metileno e cloreto de sódio (NaCl) em condições operacionais distintas. As curvas representativas dos resultados dos ensaios de estímulo-resposta utilizando o azul de metileno e o cloreto de sódio como traçadores são apresentados nas Figuras 2 e 3, respectivamente.

Tabela 2 – Concentração máxima do traçador azul de metileno e condutividade elétrica máxima com uso de cloreto de sódio (NaCl) para os ensaios estímulo-resposta, em diferentes condições operacionais

Ensaio	Preenchimento	$Q_{\text{af.}}$ <sup>1</sup> ( $\text{L h}^{-1}$ )	TDH <sup>2</sup> (h)	Aeração	Aplicação	Concentração Máxima <sup>3</sup> ( $\text{mg L}^{-1}$ )	CE Máxima <sup>4</sup> ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ )	Tempo <sup>5</sup> (min)
1	-	0,48	6,30	Não	Pulso	3,87	-	60
2	Anéis de PE <sup>6</sup>	0,33	8,50	Não	Contínuo	2,53	-	510
3	Anéis de PE	0,33	8,50	Não	Contínuo	-	1.130	495
4	Biomassa e cubos de EP <sup>7</sup>	0,74	2,77	Sim	Pulso	6,84	-	45
5	Biomassa e cubos de EP	0,74	2,77	Sim	Contínuo	-	680,4	180
6	-	0,74	4,00	Sim	Pulso	6,34	-	60

<sup>1</sup>Vazão de entrada (afluente); <sup>2</sup>Tempo de detenção hidráulica; <sup>3</sup>Concentração máxima atingida do traçador;

<sup>4</sup>Condutividade elétrica máxima atingida <sup>5</sup>Tempo de alcance, em minutos, da concentração e condutividade elétrica máximas; <sup>6</sup>Anéis de polietireno expandido; <sup>7</sup>Cubos de espuma de poliuretano.

Os resultados mostram que, em um mesmo período de tempo (0 a 60 minutos), a concentração do traçador azul de metileno atingiu o seu valor máximo quando aplicado senoidalmente tipo pulso (ensaios 1, 4 e 6 – Tabela 2) enquanto que, no ensaio 2, em que se empregou vazão contínua, observa-se que o valor da concentração aumentou gradativamente em função do tempo (Figura 2).

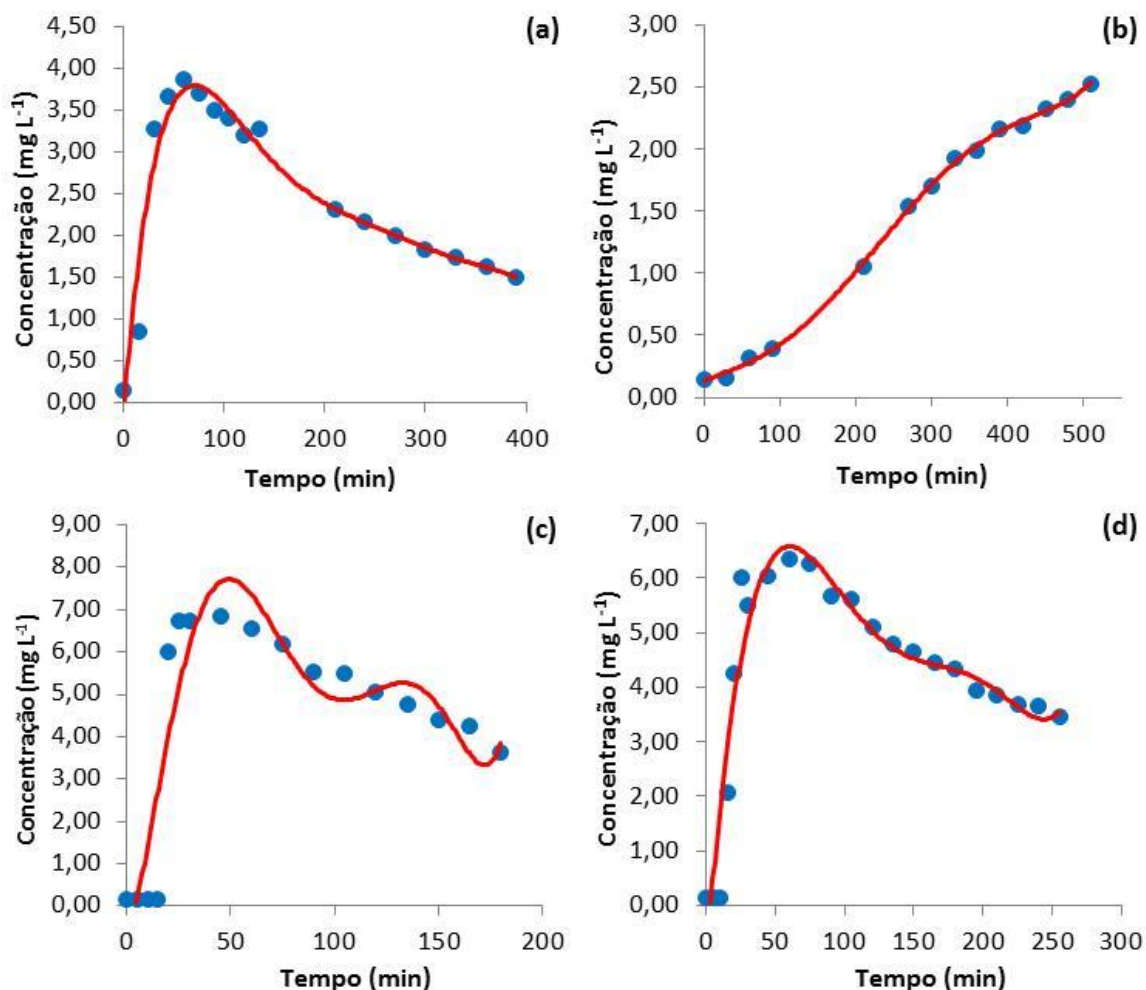


Figura 2 – Curvas de variação da concentração de azul de metileno (1%) ao longo do tempo para os ensaios estímulo-resposta 1 (a), 2 (b), 4 (c) e 6 (d).

Com relação ao preenchimento do reator com biomassa, não foi possível observar que se apresenta como um obstáculo na mistura quando o reator é submetido à aeração (Figuras 2 e 3), uma vez que os ensaios 4 e 6 apresentaram comportamento semelhante.

Verificou-se um possível início de efeito de cauda nas amostras do efluente (Figura 2), o que poderia indicar zonas estagnadas dentro do reator. O efeito de cauda corresponde em um atraso na saída de parte do traçador aplicado no sistema em estudo. Este fenômeno ocorre porque o traçador fica retido em zonas mortas ou aprisionado em recirculações internas (Castro, 2010). Possivelmente a cauda seria observada com o prolongamento do TDH e das amostragens (Levenspiel, 2000).

As curvas de variação de concentração de azul de metileno ao longo do tempo (Figura 2) para os ensaios 1, 2 e 4, apresentaram a mesma tendência, mostrando que independentemente do preenchimento, vazão e presença ou não de aeração, o reator apresenta um comportamento senoidal, atingindo a mistura completa em até 60 minutos.

Em relação ao aumento abrupto da condutividade elétrica nas amostras do efluente após 7 horas no ensaio 3 (Figura 3a), pode-se observar que o período em que ocorre tal aumento de condutividade elétrica é compatível com o período em que a concentração de azul de metileno tende ao seu valor máximo no ensaio com traçador diluído e vazão contínua (ensaio 2). Com a presença de biomassa e aeração no reator (ensaio 5), a curva da

condutividade elétrica de acordo com o tempo (Figura 3b) indicou uma tendência linear de aumento, semelhante a curva de concentração do ensaio 2 com azul de metileno (Figura 2b).

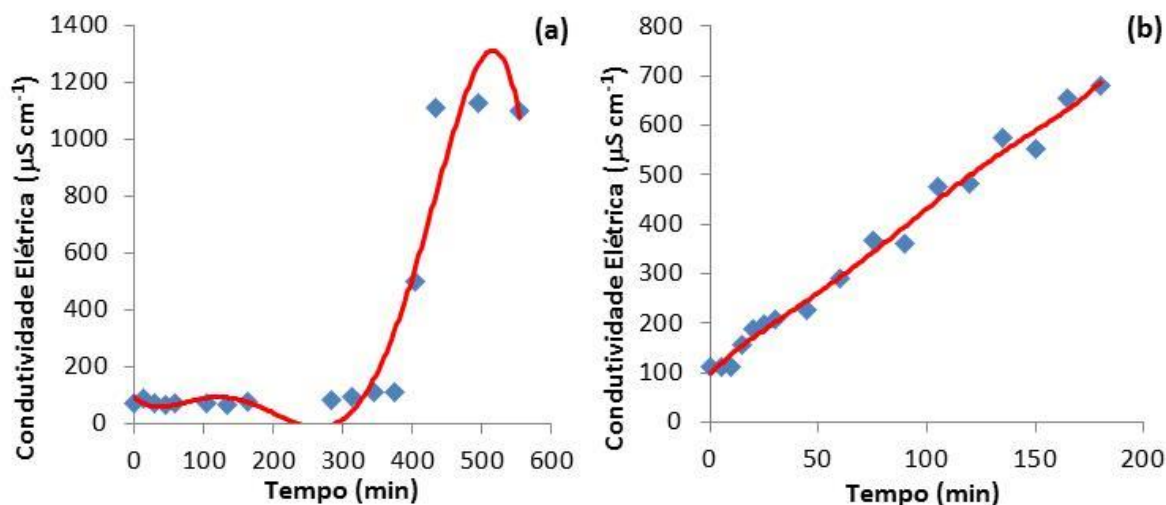


Figura 3 – Curvas de variação da condutividade elétrica ao longo do tempo nas amostras de efluente do reator para os ensaios estímulo-resposta com cloreto de sódio referente aos ensaios 3 (a) e ensaio 5 (b).

Fotos do ensaio 1, utilizando azul de metileno sem material de preenchimento e biomassa, foram tiradas em períodos constantes e as imagens foram analisadas por rotina desenvolvida com o programa MATLAB®. As fotos enquadram a região central do reator (Figura 1, detalhe 6). As imagens são processadas digitalmente através da separação dos canais RGB (*Red, Green, Blue*) e determinação da predominância (intensidade) do canal B sobre os canais R e G. Desta forma obtêm-se um panorama sobre a distribuição do corante no espaço verificando a evolução do escoamento e a sua distribuição ao longo do tempo. Procura-se concluir sobre a dinâmica do escoamento no decorrer do tempo, a propagação do corante, a existência de caminhos preferenciais, regiões de estagnação e ações nos contornos. A Figura 4 ilustra alguns exemplos dos resultados gráficos gerados, mostrando através do modelo *Color Map* (Mapa de cores associado a isosuperfícies) a escala “Intensidade de Distribuição”, a qual se traduz pelo fator em que o canal B se compara à média dos canais R e G. Nestes mapas, intensidades de distribuição próximas de 1 (cor azul escuro) representam escalas semelhantes de fatores R, G, e B, o que caracteriza uma região não atingida pelo corante. Intensidades de distribuição próximas de 2 (cor vermelho escuro) indicam regiões plenamente atingidas pelo corante com fator máximo.

Na Figura 4a observa-se a intrusão do corante no tubo do reator e a região (azul) ainda não afetada. Na Figura 4b a distribuição do corante avança sobre o tubo com uma aparente simetria. Na Figura 4c percebe-se a distribuição em toda a região focada notando-se a tendência de direcionamento para ao lado esquerdo (cor vermelho escuro). Na Figura 4d a tendência se mantém, verificando-se que o escoamento está com um fluxo ligeiramente estagnado à direita do tubo.

Através desta técnica é possível embasar alguns ajustes geométricos que proporcionem um escoamento mais homogêneo na instalação estudada. Para o caso deste reator poderiam ser instaladas algumas hastes direcionais na base do tubo para eliminar a tendência do escoamento, entretanto esta tendência foi considerada relativamente pequena, sem ocorrer um comprometimento das funções do reator.

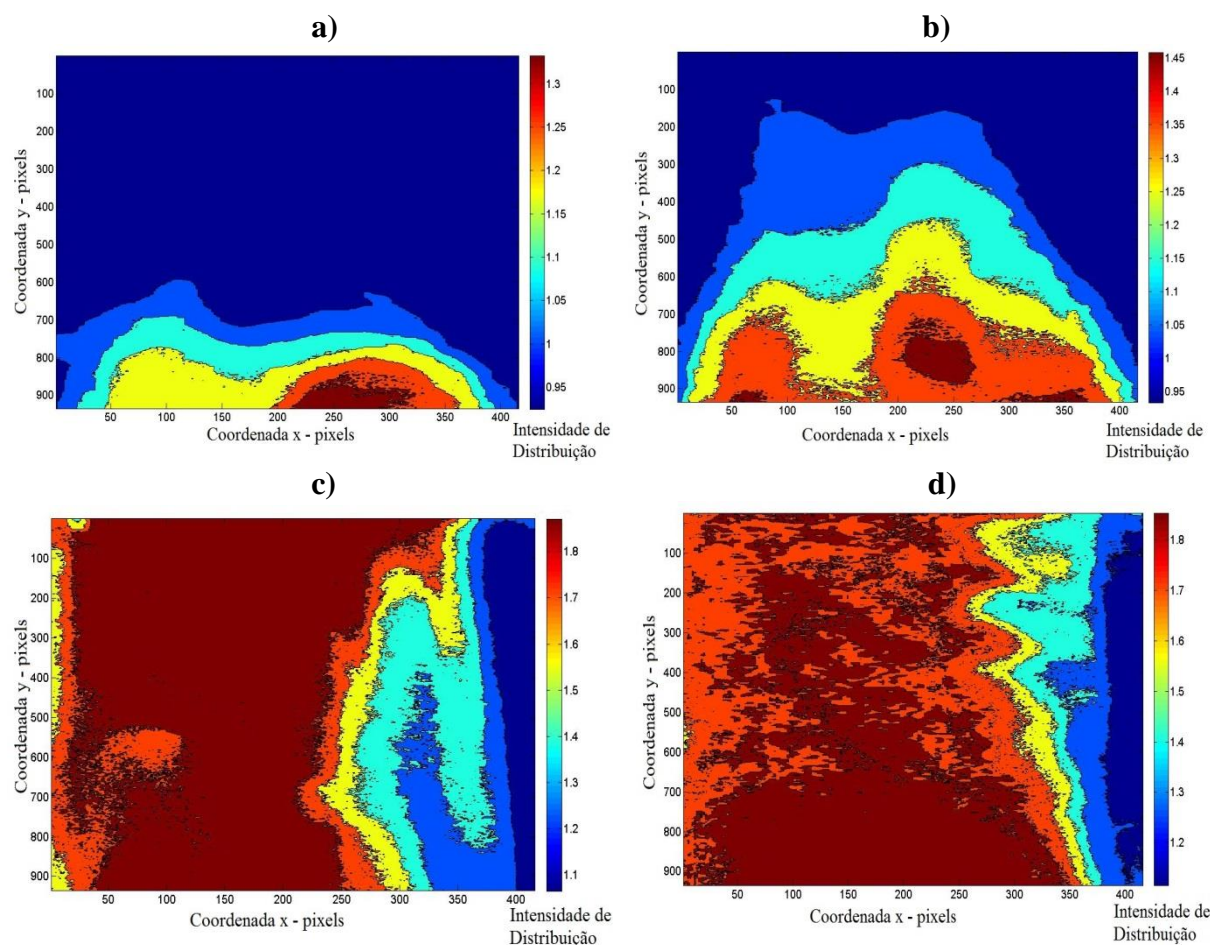


Figura 4 – Imagens geradas pelo programa MATLAB<sup>®</sup> referentes a análise de imagens do ensaio 1 utilizando como traçador o azul de metileno. a) 200 min, b) 225 min, c) 295 min e d) 370 min

#### 4. CONCLUSÕES

A avaliação hidrodinâmica por imagens gerou resultados que ajudaram na identificação de possíveis zonas mortas, caminhos preferenciais e onde ocorreu mistura completa no reator, evidenciando que é um parâmetro a ser considerado no estudo da hidrodinâmica de reatores e que pode ser realizado em trabalhos futuros.

Os ensaios com cloreto de sódio apresentaram resultados atípicos que foram difíceis de ser interpretados, demonstrando que o traçador pode não ser um bom agente para o estudo da hidrodinâmica nesse tipo de reator.

Diferentemente do cloreto de sódio, os resultados dos ensaios com azul de metileno foram satisfatórios e ajudaram a entender a hidrodinâmica do reator aeróbio estudado.

O tempo de amostragem dos ensaios deveria ser maior que o tempo de detenção hidráulica do afluente para um melhor acompanhamento dos resultados e uma melhor caracterização do comportamento do afluente dentro do reator.

A presença de biomassa dentro do reator não prejudicou a mistura de afluente, se este for submetido a aeração, demonstrando que, pelo aspecto hidrodinâmico, o reator pode ser usado como pós-tratamento de um filtro anaeróbio no tratamento de água residuária orgânica, finalidade para a qual foi projetado.



## REFERÊNCIAS

- BELINI, A. D.; CARVALHO, K. Q.; IKENO, D. S.** *Avaliação do comportamento hidrodinâmico de um reator combinado anaeróbio-aeróbio tratando efluente de abatedouro bovino.* In: XVII Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2012. Disponível em: <http://conferencias.utfpr.edu.br/ocs/index.php/sicite/2012/paper/view/474>. Acesso em 05/08/2015.
- CARVALHO, K. Q.** *Resposta dinâmica de reator UASB em escala piloto submetido a cargas orgânicas e hidráulicas cíclicas: modelos matemáticos e resultados experimentais.* Tese (Doutorado) Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2006.
- CARVALHO, K. Q.; SALGADO, M. T.; PASSIG, F. H.; PIRES, E. C.** *Avaliação hidrodinâmica de reator UASB submetido à variação cíclica de vazão.* *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, v.13, n.2, p.226-235, abr-jun, 2008.
- CASTRO, F. M. S.** *Estudo de Comportamento Hidrodinâmico de Uma Nova Proposta de Configuração Interna para Reator UASB.* Dissertação (Mestrado), UFRGS, Porto Alegre, 2010.
- DANTAS, M. A. R.; MELO, H. N. S.; NETO, C. O. A.** *Aplicação de traçadores em filtros anaeróbios para avaliação das características hidrodinâmicas.* In: Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, Porto Alegre, 2000. *Anais...* Porto Alegre: ABES, 2000 (CD rom).
- FREITAS, D. C.** *Estudo do comportamento hidrodinâmico de reator anaeróbio-aeróbio de leito fixo tratando efluente bovino.* Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Campo Mourão, 2013.
- LAPA, K. R.** *Avaliação da recirculação da fase líquida e do regime de alimentação em reator anaeróbio, em escala piloto, operado em bateladas sequenciais, contendo biomassa imobilizada (ASBBR), aplicado ao tratamento de esgoto sanitário.* Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2006.
- LEVENSPIEL, O.** *Engenharia das Reações Químicas*, 3ª ed., São Paulo: Edgard Blücher, 2000.
- RUFATO, F. H.; GEBARA, D.; RUGGERI JR, H. C.; MARTINS JR, W. N.; DALL'AGLIO SOBRINHO, M.** *Caracterização hidrodinâmica de reator aeróbio de leito fluidizado com circulação em tubos concêntricos.* In: Congresso Latino-americano de Hidráulica. *Anais...*21, São Pedro, São Paulo, Brasil. 2004.
- SALGADO, M. T.** *Modelo matemático para avaliação hidrodinâmica em reatores tubulares operando em regime não-permanente.* Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.
- VILAR, F. M. D.; CARVALHO, K. Q.; HATTORI, A.** *Características hidrodinâmicas de um reator abiótico submetido a aeração.* In: XVII Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2012. Disponível em: <http://conferencias.utfpr.edu.br/ocs/index.php/sicite/2012/paper/view/1016>. Acesso em 06/08/2015.