

Estudo hidrodinâmico de reatores utilizando-se a análise em fluxo

Hydrodynamic studying of reactors using The flow analysis

Adriano Luiz Tonetti

Engenheiro Químico, Professor Doutor da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo - UNICAMP

Bruno Coraucci Filho

Engenheiro Civil, Professor Titular da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo - UNICAMP

Cintia Elena Nicolau

Tecnóloga em Saneamento, Especialista Ambiental da Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo

José Roberto Guimarães

Químico, Professor Associado da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo - UNICAMP

Julyenne Meneghetti Campos

Aluna do curso de graduação em tecnologia de Saneamento do Centro Superior de Educação Tecnológica - UNICAMP

Pedro Sergio Fadini

Químico, Professor Adjunto do Departamento de Química, UFSCar

Endereço para correspondência:

Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. FEC/UNICAMP; Avenida Albert Einstein, 951; Cidade Universitária "Zeferino Vaz"; Caixa Postal 6021; CEP: 13083-852; Campinas - SP. Telefone: +55 19 3788-2381. E-mail: altonetti@yahoo.com.br

Data de entrada: 23/11/2010 Data de aprovação: 15/06/2011

RESUMO

A UNICAMP e o PROSAB têm desenvolvido diversos métodos de tratamento de esgotos, além de pesquisas que buscam melhorar a operação e o monitoramento dos reatores em atividade. Nesse sentido, avaliou-se o emprego da Análise em Fluxo no estudo hidrodinâmico de filtros anaeróbios, buscando minimizar a intervenção humana e maximizar a confiabilidade da etapa de coleta de dados, evitando que pesquisadores ou operadores de estações de tratamento executem atividades repetitivas que demandem um tempo excessivo de atenção. Essa técnica envolve o monitoramento e registro condutimétrico contínuo da eliminação de um pulso de cloreto de sódio comercial durante a operação de reatores destinados ao tratamento de esgotos. Os dados obtidos demonstraram uma alta frequência de amostragem e uma baixa dispersão dos resultados analíticos, apontando para a aplicabilidade da proposta.

ABSTRACT

The State University of Campinas (UNICAMP) in association with the Basic Sanitation Program (PROSAB) has developed vary methods of wastewater treatment, besides, researches which aim make better the operation and the monitoring of reactor in activity. In this way, the using of flow analysis for the hydrodynamic studying of anaerobic filter, aiming minimizing the human intervention and maximizing the reliability of the data collecting stage, avoiding that researchers or treatment plants operators execute repetitive activities which task an overtime of attention. This technique involves the conductivity monitoring and non – stop register of the elimination of sodium chloride pulse during the operation of reactors destined to wastewater treatment. Results showed the applicability.

Palavras Chave: Análise em fluxo; filtro anaeróbio; hidrodinâmico; monitoramento.

Keywords: Flow Analysis; upflow anaerobic filter; hydrodynamic, monitoring.

INTRODUÇÃO

Buscando contribuir para a resolução do problema de saneamento em cidades e nas áreas rurais, a Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) tem realizado muitas pesquisas com reatores empregados na depuração de águas residuárias. Um dos reatores estudado, em parceria com o Programa de Pesquisas em Saneamento Básico (PROSAB), foi o filtro anaeróbio com recheio de bambu (COUTO e FIGUEIREDO, 1992; CAMARGO e NOUR, 2001 e TONETTI et al., 2010), que, ao ser utilizado no tratamento de esgoto doméstico, possibilitou uma remoção de aproximadamente 70% da matéria orgânica, produzindo uma quantidade reduzida de lodo. O custo para sua construção foi extremamente baixo, apontando para a viabilidade de sua instalação em escala real. No decorrer desse trabalho foram estudadas algumas técnicas que tinham como objetivo facilitar a coleta de dados, permitindo um maior envolvimento dos pesquisadores em atividades efetivas de investigação, ao invés da atuação naquelas que apresentam maior caráter repetitivo e consumidor de tempo. Assim, desenvolveu-se o emprego da Análise em Fluxo no estudo do comportamento hidrodinâmico de reatores, possibilitando a medição e registro de valores de condutividade de forma contínua e em tempo real, sem a presença permanente de um operador (TONETTI et al., 2010). Segundo Ruzicka e Hansen (1988) e Arruda e Collins (2005), a Análise em Fluxo é o nome genérico para todos

METODOLOGIA

os métodos analíticos que são baseados na introdução e processamento de amostras em fluxos, permitindo a execução de processos analíticos difíceis ou inviáveis manualmente, com o uso de dispositivos que podem substituir, refinar, ampliar ou suplementar o esforço humano no desempenho de um dado processo. Embora concebida na Dinamarca, foi no final da década de 70, no Centro de Energia Nuclear na Agricultura da Universidade de São Paulo (CENA-USP), que esse procedimento analítico demonstrou ser uma ferramenta útil, apresentando como vantagens: simplicidade, reprodutibilidade, versatilidade e alta frequência de amostragem, além de garantir uma baixa dispersão dos resultados analíticos (ZAGATTO et al., 1988 e ARRUDA e COLLINS, 2005).

Na área da engenharia sanitária, tanto em pesquisas realizadas nas universidades como nas estações de tratamento de esgotos, na imensa maioria das vezes em que se necessita da caracterização de reatores, no tocante ao seu comportamento hidráulico, faz-se uso da coleta de amostras discretas e avaliação de sua condutividade, utilizando procedimentos manuais desprovidos de qualquer automatização. Muitas vezes esse processo de coleta e análise repete-se a cada 30 minutos ou em períodos inferiores. Como os reatores empregados no tratamento de esgotos apresentam tempos de detenção hidráulica normalmente superiores a seis horas, sua adequada caracterização hidrodinâmica acaba exigindo a presença de um pesquisador ou operador ao longo de todo o período analítico, que, em sua totalidade, muitas vezes pode estender-se por mais de um dia. Tal fato dificulta a dedicação desse profissional a outras atividades para as quais a sua capacitação seja de fato exigida com maior intensidade.

Desse modo, o presente artigo tem como objetivo principal apresentar os resultados obtidos no estudo do comportamento hidrodinâmico de três filtros anaeróbios empregando-se a Análise em Fluxo na coleta contínua de dados de condutividade do efluente, buscando demonstrar a viabilidade dessa técnica na caracterização de reatores em escala laboratorial, piloto ou real.

Este projeto foi instalado numa área do Laboratório de Protótipos Aplicados ao Tratamento de Águas e Efluentes da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da UNICAMP. Para seu desenvolvimento foram construídos três filtros anaeróbios em aço inox (FB1, FB2 e FB3), todos com formato cilíndrico e volume total de 500 L. O fundo era cônico e separado da região ocupada pelo meio suporte por uma grade de bambu. Na Figura 1 está mostrado um esquema e fotos de um destes reatores.

O meio suporte era constituído de anéis de bambu da espécie *Bambusa tuldoides*, tendo diâmetro de 0,03 m e cortados em tamanho de aproximadamente 0,05 m de comprimento (CAMARGO e NOUR, 2001 e TONETTI et al., 2010). Após o preenchimento dos reatores com este material, uma média de $74,8 \pm 0,3\%$ do volume interno era de vazios.

No filtro anaeróbio FB1 empregou-se cavacos de bambu que haviam sido utilizados por cinco anos em um mesmo tipo de sistema de tratamento de esgoto doméstico. No FB3, adotaram-se pedaços de bambu que foram cortados pouco antes de sua colocação no interior do reator, enquanto que no FB2 havia uma mistura de material novo e antigo. No entanto, este material antigo não possuía uma cultura biológica sobre sua superfície, visto que estava fora de operação havia três anos.

Metodologia analítica

As características hidrodinâmicas dos filtros anaeróbios com recheio de bambu foram avaliadas pela injeção de 2,0 litros de solução saturada de cloreto de sódio, com uma concentração de $384,0 \text{ g.L}^{-1}$. A adição da solução ocorreu empregando-se um tubo que ligava o frasco da solução com a tubulação de entrada do afluente dos filtros anaeróbios, conforme pode ser visualizado por meio da Figura 2. O frasco com o cloreto de sódio encontrava-se a 3,5 m de altura, propiciando que a solução fosse totalmente injetada em aproximadamente 10 segundos no fluxo de água afluente, na forma de um pulso salino, somente pela ação da gravidade e sem o uso de bombas.

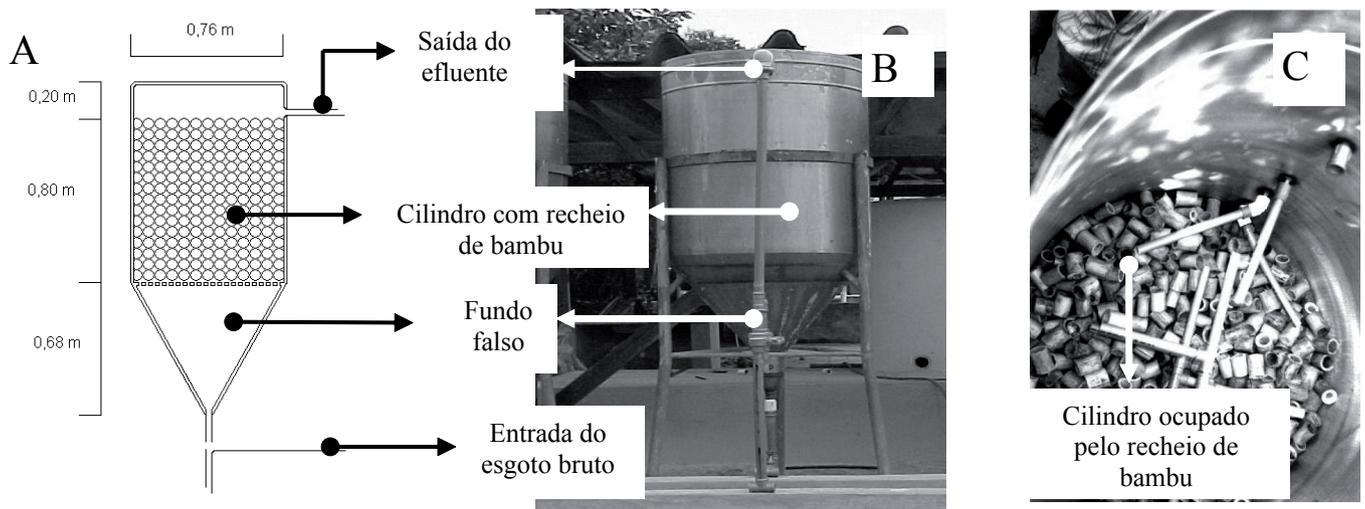


Figura 1. Esquema de um filtro anaeróbio com recheio de bambu (A) e vistas externa (B) e interna (C)

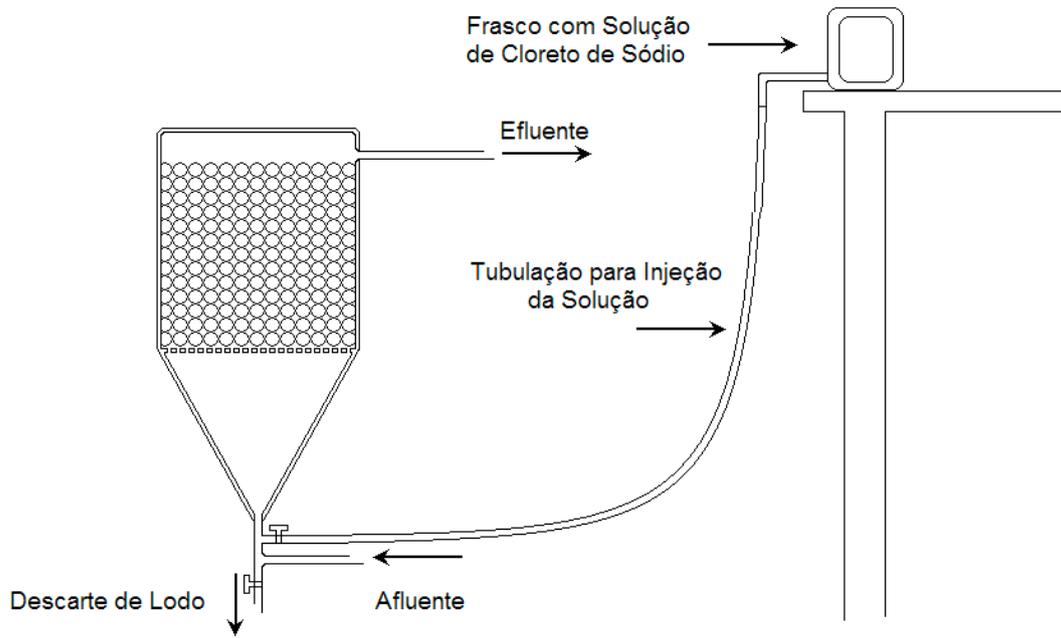


Figura 2. Representação esquemática do sistema para a injeção da solução de cloreto de sódio no fluxo de água afluente ao filtro anaeróbio

Esta solução saturada de sal foi preparada utilizando-se o produto comercial destinado ao consumo humano e a própria água que circulava nos reatores, originária do sistema de abastecimento da UNICAMP. Durante as 24 horas que antecederam o início do teste, manteve-se a vazão de água que adentrava os reatores no valor de $11,6 \text{ mL}\cdot\text{s}^{-1}$, correspondendo a um tempo de detenção hidráulica nominal de 9 horas.

Conforme pode ser visualizado por meio da Figura 3, a leitura dos valores de condutividade foi feita com o emprego da Análise em Fluxo, numa montagem onde uma bomba

peristáltica captava uma pequena parcela do líquido que deixava os filtros anaeróbios e a enviava até uma cela de medição instantânea e contínua da condutividade. Os dados gerados eram imediatamente impressos por um registrador gráfico. A concepção do sistema foi uma adaptação fundamentada no trabalho de Faria e Pasquini (1991), originalmente concebido para a determinação condutimétrica de espécies nitrogenadas em amostras aquosas.

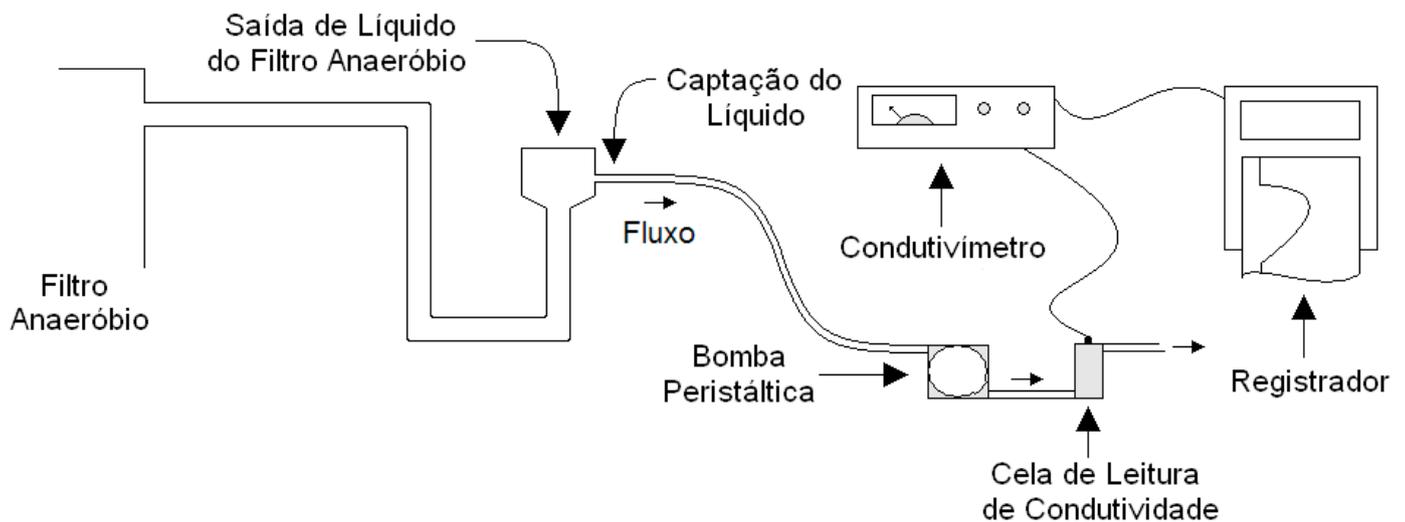


Figura 3. Esquema da leitura dos dados de condutividade do líquido que deixava os filtros anaeróbios por meio da Análise em Fluxo

A tubulação empregada na captação de uma pequena parcela do efluente que deixava o filtro anaeróbio tinha um diâmetro interno de 1,14 mm. A vazão empregada era de $1 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$, sendo mantida constante ao longo do tempo com o uso de uma bomba peristáltica da marca Ismatec, modelo Reglo Digital MS-2/6. Este fluxo era encaminhado a uma cela de leitura de condutividade, que enviava o sinal obtido a um condutivímetro da marca Micronal, modelo B330. Os dados de condutividade eram transmitidos a um registrador da marca ECB, modelo RB200, dotado de papel e pena. Na Figura 4 são apresentadas algumas imagens da instalação em estudo. Especificamente quanto a cela de leitura de condutividade, apresentada na Figura 5, esta possuía 5 cm de

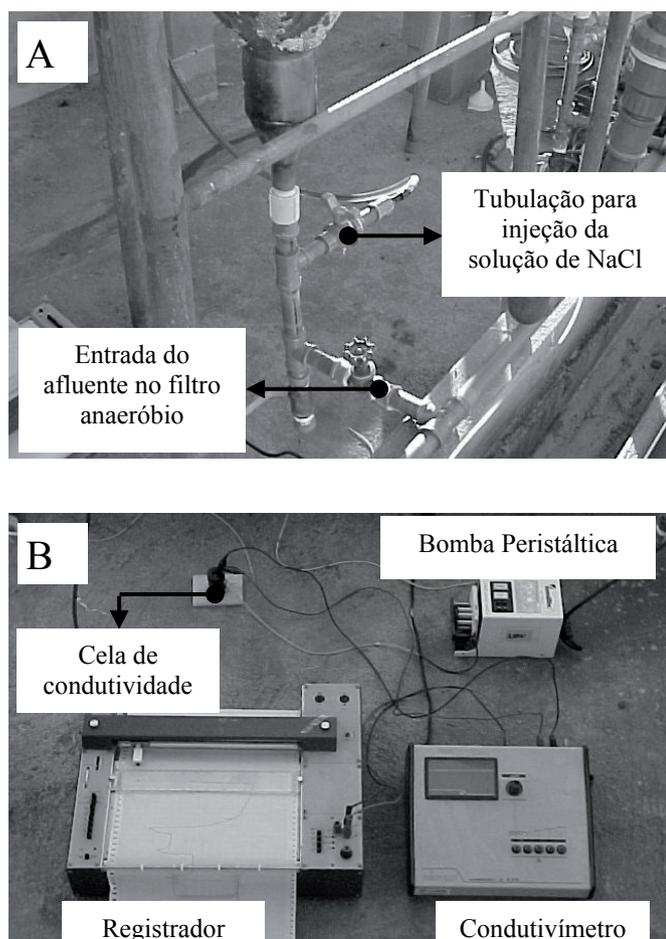


Figura 4. Vista da entrada de afluente e da solução de cloreto de sódio no filtro anaeróbio (A) e dos equipamentos envolvidos na análise em fluxo (B)

altura e 3 cm de diâmetro, sendo constituída por um cilindro de nylon. Em seu interior estava acoplada uma câmara de aço inoxidável com formato cilíndrico, que possuía 30 mm de altura e um diâmetro interno de 3 mm, onde o líquido fluía em sentido ascendente, possibilitando a avaliação da diferença de potencial de forma contínua.

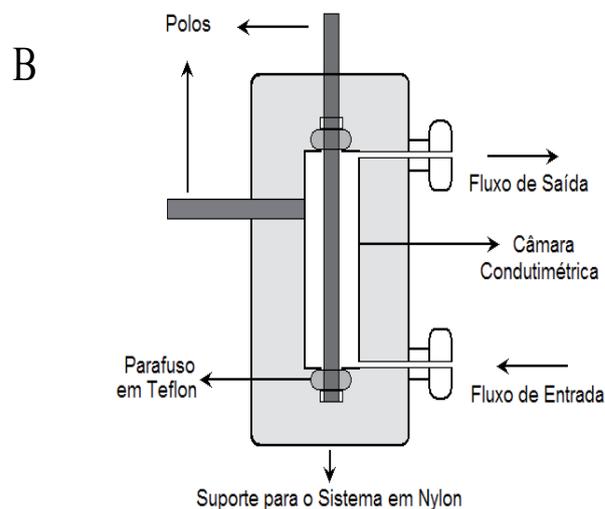
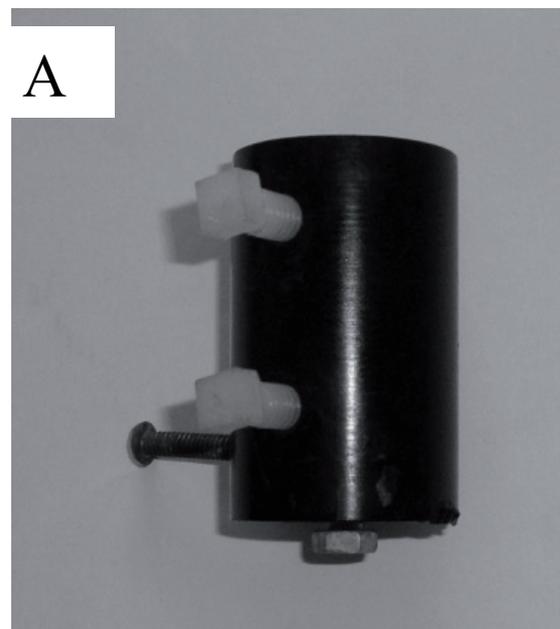


Figura 5. Vista (A) e esquema (B) da cela de leitura de condutividade

RESULTADOS

Determinação da curva analítica de calibração

Inicialmente, buscou-se encontrar a curva analítica de calibração que propiciasse a correta correlação entre as intensidades dos sinais registrados e a respectiva concentração de cloreto de sódio. Para isso, no princípio da execução do teste, ao invés de permitir a entrada de água proveniente da saída dos filtros anaeróbios, fez-se com que o sistema analítico somente sugasse de forma individualizada cada uma das soluções padrões de cloreto de sódio, com concentrações exatamente conhecidas e iguais a 0, 100, 200, 350, 500 e $800 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,

as quais adentravam a tubulação e eram encaminhadas até a cela de análise condutimétrica, impulsionadas pela bomba peristáltica (Figura 3).

Ao chegar a cela analítica, os resultados de condutividade gerados eram transformados em patamares nos gráficos produzidos pelo registrador, conforme pode ser visualizado por meio da Figura 6. Havia a formação de patamares porque a bomba peristáltica era mantida aspirando a solução padrão por tempos de 5 minutos, permitindo avaliar a estabilidade e reprodutibilidade do registro dos valores de condutividade. Após a passagem de cada uma das soluções com concentração definida, permitia-se que novamente adentrasse o líquido que saía do filtro anaeróbio em estudo, de modo a ter restabelecida a linha base e eliminando o possível “efeito memória”.

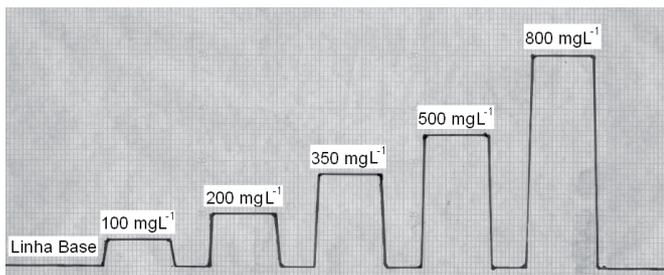


Figura 6. Registro gerado a partir da injeção das soluções padrão de cloreto de sódio no sistema de análise em fluxo

A medição da altura desses patamares permitiu a elaboração da curva analítica de calibração apresentada na Figura 7.

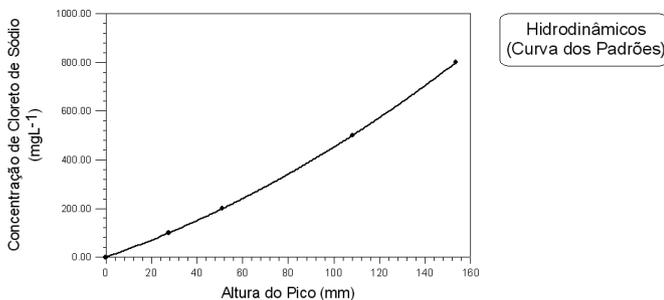


Figura 7. Curva analítica de calibração, mostrando a altura dos diferentes sinais obtidos para as soluções padrão de NaCl, com concentrações de 0, 100, 200, 350, 500 e 800 mg.L⁻¹

Aplicação da Análise em Fluxo na caracterização hidrodinâmica de reatores

Tendo-se em vista avaliar a aplicação da Análise em Fluxo na caracterização hidrodinâmica de reatores, após a determinação da curva analítica de calibração, reiniciou-se a coleta do efluente que deixava o filtro anaeróbio, monitorando-se continuamente e em tempo real a sua condutividade. Após 30 minutos de medições, que visou constatar a existência de uma linha reta representativa da linha base e de uma condutividade constante, injetou-se, na forma de pulso, 2,0 litros de cloreto de sódio em sua concentração de saturação no fluxo afluente dos reatores, conforme mostrado na Figura 2. No mesmo instante em que foi realizada esta injeção fez-se uma marcação manual no papel do registrador, de modo que este momento fosse adotado como referencial temporal.

Neste estudo, para cada um dos três filtros anaeróbios, coletaram-se dados por um período de 40 horas, até que houvesse em cada um dos reatores o retorno as condições anteriores a injeção da solução de cloreto de sódio, ou seja, após o restabelecimento da linha base no registro gráfico. Neste extenso período, a presença de uma pessoa foi necessária em apenas poucos momentos, objetivando avaliar se a vazão de entrada do filtro anaeróbio era mantida dentro do valor estipulado e se os equipamentos estavam funcionando adequadamente.

A medição da altura do sinal analítico gerado ao longo do tempo pode ser convertida em concentração de cloreto de sódio por meio da calibração anteriormente descrita (Figura 7), permitindo obter o perfil temporal de eliminação do sal adicionado ao fluxo afluente do filtro anaeróbio. A partir destes dados, houve a possibilidade de se calcular quanto este reator se afastou do comportamento de fluxo pistonado ideal, lembrando que em situações ideais, com a injeção de um traçador em pulso, o mesmo seria eliminado após o tempo de detenção teórico ou, também chamado de nominal. Quanto mais distante do ideal estiver o fluxo, mais se aproximará do regime de mistura completa (LEVENSPIEL, 2000).

Para realizar esta estimativa traçou-se uma curva a partir dos dados obtidos para a concentração de cloreto de sódio no efluente do filtro anaeróbio com recheio de bambu FB2 em função do tempo de execução do teste, conforme ilustrado na Figura 8. Por motivo de espaço disponível, somente para este reator serão expostos os diferentes gráficos obtidos.

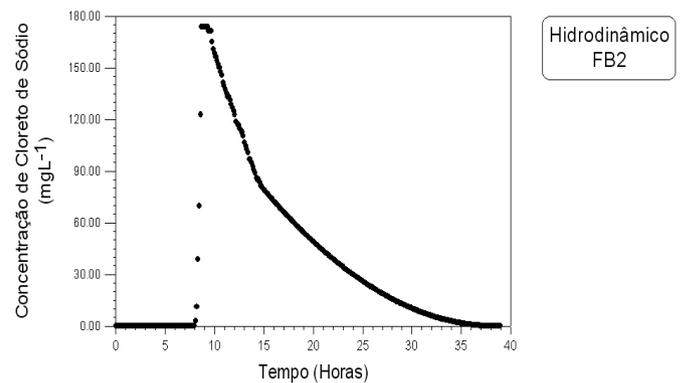


Figura 8. Relação entre o tempo do experimento e a concentração de cloreto de sódio para o efluente do filtro anaeróbio com recheio de bambu FB2

A partir do emprego da Equação 1 pode-se calcular a área sob a curva apresentada na Figura 4, tendo em vista encontrar a quantidade total de traçador que saía do filtro anaeróbio.

$$A = \int_0^{\infty} C dt \cong \sum C_i \Delta t_i \xrightarrow{\Delta_i \text{ Constante}} \sum C \Delta t \quad \text{Equação 1}$$

Sendo: C e C_i a concentração de traçador no tempo t e na iésima medição e t_i o incremento de tempo para medição de C_i. Para determinar o tempo médio de residência utilizou-se a

$$\frac{\int_0^{\infty} t C dt}{\int_0^{\infty} C dt} \cong \frac{\sum t_i C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} \xrightarrow{\Delta t \text{ Constante}} \frac{\sum t_i C_i}{\sum C_i} \quad \text{Equação 2}$$

Sendo: o tempo médio de residência derivado da curva do traçador, t o tempo e t_i o tempo na iésima medição. Por sua vez, para obter a distribuição do tempo que os elementos do fluido levam para passar pelo reator, chamado de função de distribuição da idade de saída do fluido, a área sob a curva deve ter valor unitário. Para isso, cada leitura de concentração foi dividida pela área determinada a partir da Equação 1. Deste modo, encontrou-se o gráfico exposto na Figura 9.

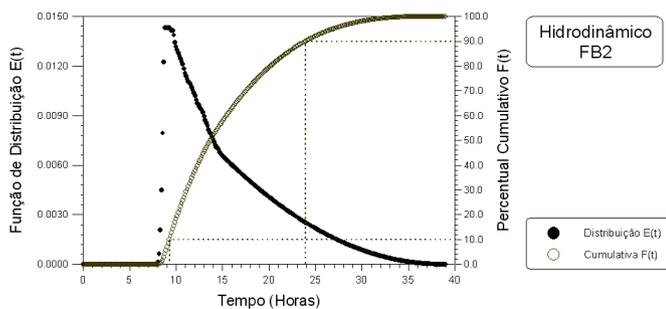


Figura 9. Curva de E(t) e F(t) em função do tempo do experimento

A curva cumulativa de distribuição dos tempos de residência F(t), definida pela Equação 3, expressa a quantidade de

traçador que deixou o reator até um determinado tempo t, permitindo avaliar a distribuição dos tempos de residência, tal como se visualiza por meio da mesma Figura 8.

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

A partir deste conceito, Morrill (1932) sugere que a razão entre os tempos em que 90% e 10% do traçador tenha sido recuperado (T90%/T10%) é uma medida importante para determinar o comportamento hidrodinâmico do reator. O Índice de Dispersão de Morrill (IDM), que considera esta relação, assume o valor de 1,0 para um reator de fluxo pistonado ideal e em torno de 21,9 para o de mistura completa.

Outros parâmetros baseados na curva E(t), propostos por Rebhun e Argaman (1965) são a razão entre o tempo de surgimento do pico de concentração e o tempo de detenção teórico (t_p/θ_H) e entre o tempo médio de residência e o tempo de detenção teórico (t_m/θ_H). O fluxo tende ao pistão quando t_p/θ_H se aproxima de 1,0. Valores menores que 1,0 para t_m/θ_H, indicam presença de zonas mortas no reator. Na Tabela 1 estão apresentados os valores para estes parâmetros encontrados para os três filtros anaeróbios com recheio de bambu em estudo.

Tabela 1. Valores obtidos para os diferentes parâmetros na caracterização dos filtros anaeróbios com recheio de bambu

Parâmetro	Unidade	Filtro Anaeróbio com Recheio de Bambu		
		FB1	FB2	FB3
Volume Útil do Reator (V)	L	374,1	374,1	374,1
TDH Teórico (E _H)	min	540,0	540,0	540,0
Tempo de Pico do Gráfico (t _p)	min	660,8	520,9	484,8
Tempo Médio (t _m)	min	1095,2	919,6	675,9
t _p /θ _H	-	1,2	0,9	0,9
t _m /θ _H	-	2,0	1,7	1,2
Índice de Dispersão de Morrill (IDM)	10%	675,3	557,1	484,8
	90%	1666,6	1425,4	926,2
	IDM	2,4	2,5	1,9

Como se constata pela análise da Tabela 1 os Índices de Dispersão de Morrill dos filtros anaeróbios variaram entre 1,9 e 2,5, ou seja, estiveram mais próximo de 1,0 que de 21,9; indicando tendência ao fluxo pistonado (MORRILL, 1932). O reator FB3 apresentou o menor valor, indicando a menor dispersão axial. Possivelmente este desempenho pode estar associado ao fato deste filtro anaeróbio ter sido o único a ser preenchido exclusivamente com cavacos de bambu novos. No FB1 e FB2, nos quais se empregou um material envelhecido, os IDM foram bastante próximos, sendo 2,4 e 2,5;

respectivamente. Este comportamento pode ser um indicativo de que o próprio material de recheio e o biofilme inativo ainda restante influenciaram o tempo de detenção hidráulica deste reator.

A razão t_p/θ_H, proposta por Rebhun e Argaman (1965) aproximou-se da unidade em todos os três filtros anaeróbios, confirmando que o fluxo foi mais próximo do pistonado. A razão t_m/θ_H, foram maiores que a unidade, indicando que os reatores não contaram com a presença de zonas mortas.

Avaliação da Análise em Fluxo

A excelente qualidade dos resultados deste estudo hidrodinâmico, expostos nas Figuras 8 e 9, demonstra a grande viabilidade do emprego da técnica da Análise em Fluxo para a caracterização de reatores, demandando um conjunto de equipamentos e uma forma construtiva extremamente simplificada, além de evidenciar uma versatili dade e alta freqüência de amostragem, garantindo uma baixa dispersão dos resultados analíticos. Deste modo, não existe a necessidade da presença contínua de um operador que faça uma coleta em intervalos pré-estabelecidos para a determinação da condutividade do líquido que deixa o sistema, diminuindo o custo da análise e aumentando sua confiabilidade. Essa característica permite que na realização do teste em estações de tratamento ou em laboratórios de pesquisa, o executor da atividade possa realizar outras funções durante o período analítico.

Outro aspecto a ser ressaltado é que com os novos condutímetro disponíveis no mercado, não há a necessidade do envio dos dados para um registrador gráfico, pois esta conexão poderá ser feita com o uso de um computador. Tal fato poderá facilitar ainda mais a coleta e análise dos dados gerados.

CONCLUSÕES

A Análise em Fluxo se mostrou como uma importante ferramenta na realização de testes hidrodinâmicos, possibilitando a geração rápida e simplificada de dados, além de não demandar a presença contínua de um operador que realize a coleta e a determinação da condutividade do efluente dos reatores, diminuindo o custo de sua execução e aumentando sua confiabilidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARRUDA, M. A. Z.; COLLINS, C. H. (2005) Informações essenciais para a caracterização de um sistema de análise em fluxo. *Química Nova*, v. 28, n. 4, p. 739-742.

CAMARGO, S. A. R.; NOUR, E. A. A. (2001) Bamboo as an anaerobic medium: effect of filter column height. *Water Science and Technology*, v. 44, n. 4, p. 63-70.

COUTO, L. C. C.; FIGUEIREDO, R. F. (1992) Filtro anaeróbio com bambu para tratamento de esgotos domésticos. In *Congreso Interamericano de Ingenieria Sanitaria y Ambiental*. La Habana, Cuba. AIDIS, p. 329-340.

FARIA, L. C.; PASQUINE, C. (1991) Flow-injection determination of inorganic forms of nitrogen by gas diffusion and conductimetry. *Analytical Chemical Acta*, v. 245, p. 183-190.

LEVENSPIEL, O. (2000) *Engenharia das reações químicas*. 3 ed. Ed. Edgard Blucher Ltda.

MORRILL, A. B. (1932) Sedimentation basin research and design. *Journal American Water Works Association*. v. 24, p. 1442-1463.

REBRUN, M.; ARGMAN, Y. (1965) Evaluation of hydraulic efficiency of sedimentation basin, *ASCE Journal of Sanitary Engineering*. v. 91, n. 5, p. 37-45.

RUZICKA, E. E.; HANSEN, H. (1988) *Flow Injection Analysis*. 2 ed. Nova Iorque. Ed. Wiley.80 p.

TONETTI, A. L.; CORAUCCI FILHO, B.; BERTONCINI, E. I.; OLIVEIRA, R. A.; STEFANUTTI, R. (2010) Avaliação de um sistema simplificado de tratamento de esgotos visando a utilização em áreas rurais. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 14, n. 2, p. 227-234.

ZAGATTO, E. A, JACINTO, A. O., REIS, B. F., KRUG, F. J., BERGAMIN, F., PESSEDA, L. C. R., MORTATTI, J.; GINÉ, M. F. (1988) *Manual de análises de plantas e águas empregando sistemas de injeção em fluxo*. Ed. CENA, USP. 45 p.