

II-396 – DETERMINAÇÃO DE VARIÁVEIS HIDRODINÂMICAS EM REATOR UASB COM NOVA PROPOSTA DE CONFIGURAÇÃO DO SEPARADOR DE FASES**Fabio Moreira Spinola de Castro⁽¹⁾**

Engenheiro Ambiental pela Universidade Federal do Tocantins. Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH/UFRGS). Engenheiro da Companhia de Saneamento do Tocantins (SANEATINS).

Edith Beatriz Camano Schettini

Graduação em Engenharia em Recursos Hídricos pela Universidad Nacional Del Litoral (1983), Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (1991) e Doutorado em Engenharia Mecânica - Institut National Polytechnique de Grenoble (1996). Professor Associado II no Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Antônio Domingues Benetti

Engenheiro Civil, Mestre em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Doutor em Environmental Engineering por Cornell University. Professor Associado II no Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Endereço⁽¹⁾: Quadra 307 S, Rua 04, QI 24, Lote 08, - Palmas - TO - CEP: 77015-470 - Brasil - Tel: (63) 8402-5463 - e-mail: fabio.moreira@saneatins.com.br

RESUMO

Com a crescente aplicação de reatores UASB no tratamento de efluentes, tornou-se necessário o melhor entendimento dos aspectos hidrodinâmicos, visto que a maioria dos estudos aborda somente a eficiência de remoção de matéria orgânica, sólidos e outros parâmetros, sendo escassas as informações sobre as características de fluxo deste sistema. Este trabalho apresenta os ensaios hidrodinâmicos e a análise dos parâmetros físico-químicos realizados na partida de um protótipo de reator UASB circular, que apresenta uma proposta de configuração interna, em relação aos separadores de fase, que busca uma melhor eficiência na remoção de sólidos. A proposta de projeto para a configuração interna consiste em adotar uma maior área de abertura de passagem da câmara de decantação, a fim de se obter menores velocidades de passagem. O protótipo apresenta quatro aberturas para a câmara de decantação. Na etapa I do estudo, operando com água limpa, foi usado um traçador salino para determinar as velocidades de fluxo internas à câmara de decantação. Para isso, utilizaram-se duas sondas de condutividade dispostas a uma distância conhecida. Mediram-se velocidades ascensionais médias de 1,33 m/h, 1,36 m/h e 1,23 m/h e velocidades de entrada na decantação de 1,99 m/h, 0,52 m/h, 0,36 m/h e 0,09 m/h para as aberturas 1, 2, 3 e 4, respectivamente. Já na etapa II, com a partida do reator, foram realizados ensaios de estímulo-resposta para obter as curvas de distribuição do tempo de residência (DTR), e a partir destas, o tempo de residência médio, cujo valor obtido foi de 10,48 h. Também foi determinado o coeficiente de mistura, igual a $d = 0,124$, caracterizando um sistema de fluxo disperso. Também nesta etapa, foram realizadas análises físico-químicas do reator ao longo de 100 dias iniciais de operação; cujos resultados médios de eficiência, considerando-se o período de estabilidade, foram 65,7% e 70,3%, para DQO e SST.

PALAVRAS-CHAVE: UASB, separador gás-líquido-sólido, configuração interna, estudo hidrodinâmico.

INTRODUÇÃO

No Brasil, o tratamento anaeróbico vem sendo difundido em vários estados, principalmente por meio dos reatores tipo UASB (do inglês, *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*), reatores anaeróbicos de fluxo ascendente e manta de lodo.

A crescente aceitação dos processos anaeróbios como principal unidade de tratamento biológico de esgoto deve-se, principalmente, à constatação de que uma parte considerável do material orgânico (aproximadamente 70%) pode ser removida nessa unidade, utilizando-se tecnologia simples e de baixo custo, com reduzido consumo de energia, sem necessidade da adição de produtos químicos e com pequena produção de lodo estabilizado.

Com a crescente aplicação deste sistema, tornou-se necessário um melhor entendimento dos aspectos hidrodinâmicos dos reatores utilizados, uma vez que a maioria dos trabalhos realizados aborda somente o problema sob o ponto de vista da eficiência de remoção de matéria orgânica, sólidos e outros parâmetros, sendo escassas as informações sobre as características hidrodinâmicas do sistema (Pires e Ribeiro, 1992). Assim, estudos hidrodinâmicos são necessários para a otimização da geometria dos reatores biológicos.

Os separadores trifásicos (gases, sólidos e líquidos) representam dispositivos internos cruciais para o funcionamento do UASB, pois são responsáveis pela manutenção do lodo anaeróbio no interior da câmara de digestão, fornecendo um maior tempo de retenção do sólido e a clarificação do efluente na câmara de decantação. A avaliação da hidrodinâmica de reatores UASB pode ser de grande relevância, visto que diferentes velocidades internas nas câmaras de digestão e decantação podem influenciar a eficiência das reações biológicas e a qualidade do efluente final.

Devido às limitações descritas anteriormente e do custo de manutenção dos reatores UASB convencionais, foi desenvolvida uma nova proposta de configuração interna, que consiste, principalmente, na alteração da forma, quantidade e posicionamento dos separadores trifásicos que direcionam os gases gerados na câmara de digestão para a câmara de gás. Estas alterações permitem o direcionamento dos gases para a lateral do reator e definem a câmara de decantação no centro. Além disso, possibilitam uma redução significativa na área de contato da câmara de gás, que é passível de corrosão. Outra vantagem hipotética fornecida por tais modificações é a redução das velocidades de entrada na câmara de decantação, que permitem o retorno do sólido suspenso para a câmara de digestão, aumentando seu tempo de retenção.

Neste contexto, foi projetado, construído e implantado um reator UASB com a configuração proposta. Foram realizados testes hidrodinâmicos e acompanhamento através de análises de DQO e SST na partida do reator. Este trabalho descreve as etapas desenvolvidas, coleta e análise de dados e conclusões.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para avaliar a proposta de configuração do separador trifásico, foi projetado e construído um protótipo de 5,5 m de altura e 1,9 m de diâmetro. Este protótipo foi executado em chapa metálica e internamente recebeu tratamento com pintura anti-corrosiva. A entrada de afluente era feita pela base através de uma malha de tubulação DN 60 mm, perfurada. A saída do reator se dava através de uma calha coletora no centro do reator, dentro da câmara de decantação.

Quanto à característica interna, tem-se o primeiro separador em forma de cone com saída do biogás através de tubulação direcionando para a câmara de captação na lateral. Já os outros separadores, em um total de três, são em forma de tronco de cone invertidos que defletem os gases para a lateral do reator. Em resumo, as principais características do reator são:

- Câmara de digestão: altura de 3,0 m
- Câmara de decantação: altura de 2,2 m
- Borda livre superior: altura de 0,30 m
- Separadores trifásicos: 4 unidades, sendo um na forma de cone e três em forma de tronco de cone invertido
- Volume do Reator : (aprox.) 15.000 L
- Abertura para a decantação: 4 unidades.

A tabela 1 apresenta um resumo dos parâmetros principais utilizados no dimensionamento do protótipo de reator UASB. Nas figuras 1 e 2 estão apresentadas a configuração do reator e seus dimensionais, respectivamente.

O protótipo de UASB foi instalado na estação de tratamento de efluentes da Saneatins – ETE Vila União, em Palmas/TO. Para observação e operação deste reator foi executada uma estrutura em madeira com um patamar de acesso às janelas laterais, conforme ilustrado na Figura 3.

Tabela 1: Resumo dos parâmetros hidráulicos do protótipo.

Critério/Parâmetro	Q _{méd}	Q _{máx}	Q _{pico}
Vazões de projeto (L/s)	0,50	0,75	0,90
Carga hidráulica volumétrica (m ³ /m ³ ·d)	2,8	4,3	5,1
Tempo de detenção hidráulica (h)	8,3	5,6	4,7
Velocidade superficial do fluxo (m/h)	0,63	0,95	1,14
Tempo de detenção hidráulica no decantador (h)	1,42	0,94	0,79

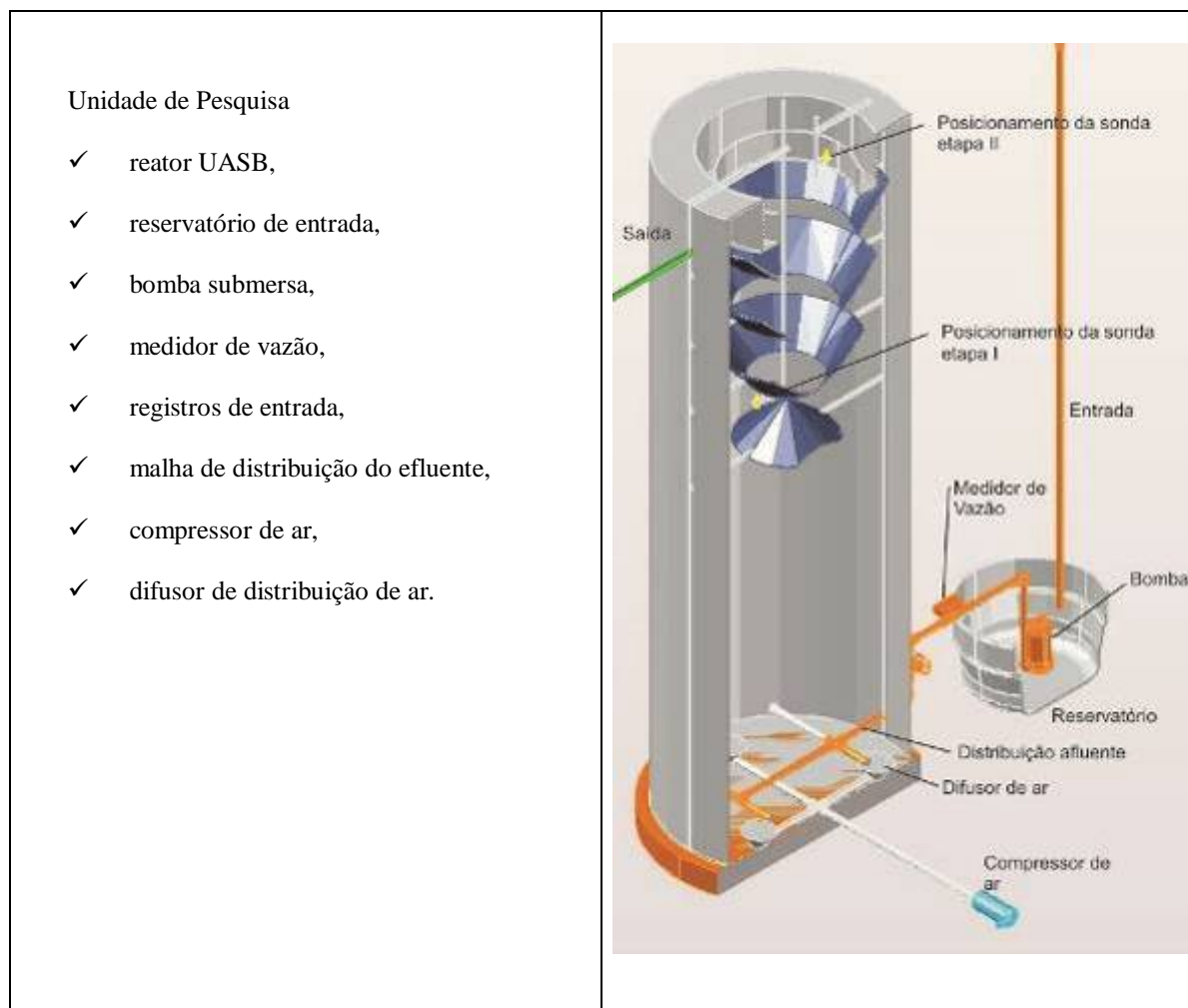


Figura 1: Configuração do reator UASB.

Etapas de estudo

O trabalho foi dividido em duas etapas de estudo, detalhados a seguir.

Etapas I

Na primeira etapa foram realizados testes hidrodinâmicos para determinação das velocidades internas da câmara de decantação, através do uso de traçador salino (300 g/L) e sondas de condutividade. Os testes foram realizados com água limpa, havendo ajuste periódico da vazão em 0,5 l/s e TDH de 8,3 h. A entrada de biogás foi simulada através da introdução de ar por difusor localizado na base do reator. A vazão de ar aplicada foi definida através de cálculos teóricos, considerando a vazão aplicada e a eficiência esperada do sistema.

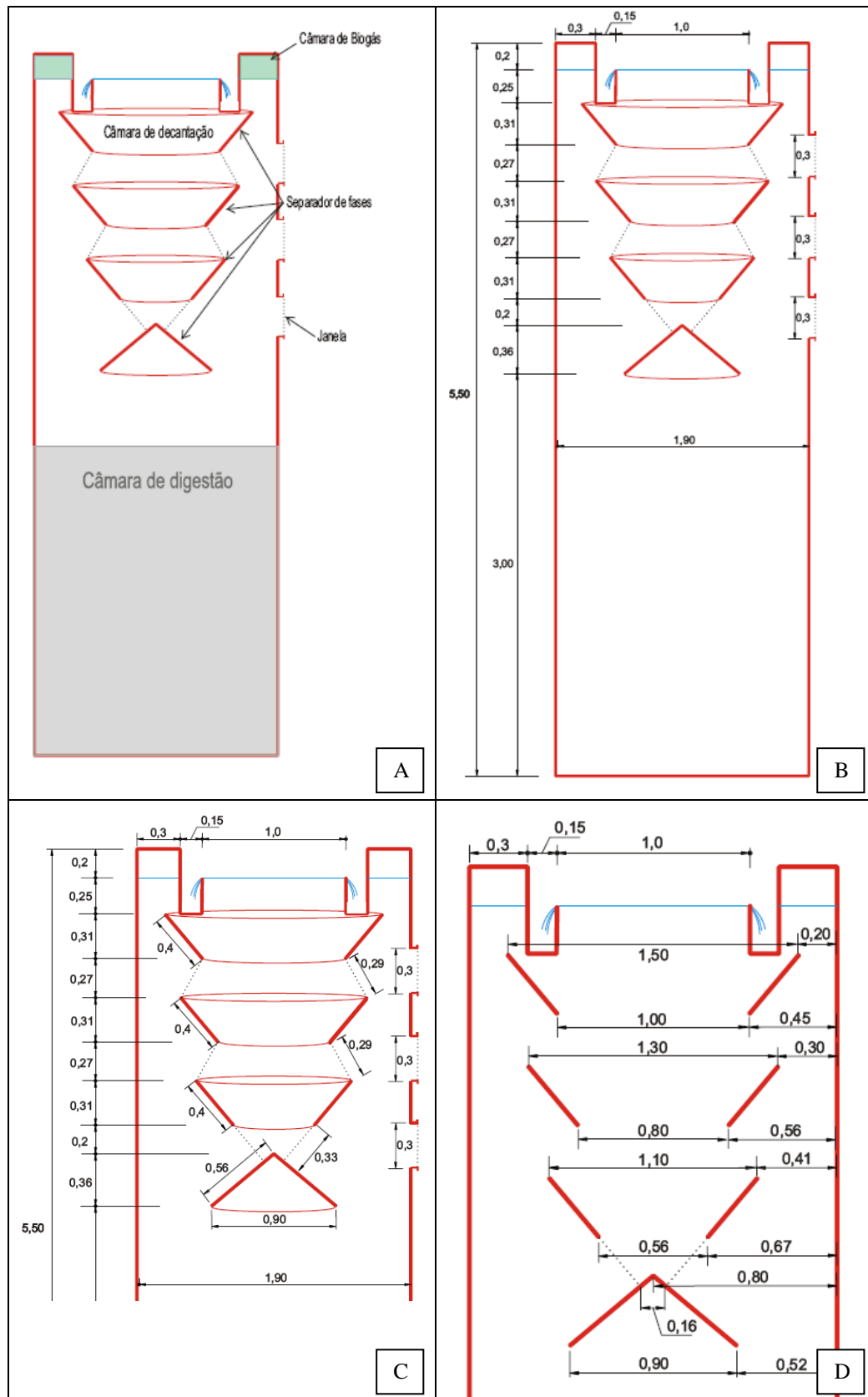


Figura 2: Cortes com dimensões do reator UASB estudado.



Figura 3: Fotos do protótipo de reator UASB instalado na ETE Vila União, Palmas, TO.

A: área experimental; B: vista frontal; C: vista lateral; D: vista superior.

A solução salina era aplicada ao reator UASB em carga, com água limpa. As sondas de condutividade foram instaladas a uma distância definida (20 cm). Assim, era possível cronometrar a alteração do primeiro medidor (montante), e posteriormente no segundo (jusante), à medida que a mancha de dispersão percorria a abertura. O condutivímetro (modelo WDT 400, fabricante WALCHEM) utilizado permitiu que os dados fossem armazenados e posteriormente descarregados para planilha eletrônica.

Para garantir vazão constante de entrada (0,5 L/s) e possibilitar maior controle na operação dos ensaios, foi instalado um tanque com sistema de bombeamento através de uma bomba submersa, sendo a vazão de entrada controlada através de um medidor tipo turbina e registro de gaveta. O tipo de medidor instalado foi um hidrômetro comumente utilizado para abastecimento de água. No entanto, para maior precisão no ajuste da vazão, instalou-se um contador de pulso interligado a um data-logger. Este sistema permite, com o auxílio de um computador, um ajuste fino da vazão, com precisão de 1 %.

O local de instalação do protótipo não dispunha de abastecimento de água, possuindo apenas uma cisterna para suprir a pequena demanda de água da estação de tratamento. Como a cisterna não possuía capacidade para atender as vazões de projeto do protótipo, optou-se por reutilizar a água da saída do reator, que era recirculada para o tanque de entrada.

A solução salina era aplicada com corante de modo facilitar a escolha de um melhor posicionamento dos condutivímetros. A visualização do interior do reator era possível pela instalação de três janelas retangulares de 40cm x 40 cm.

Para medir as velocidades, foram analisados comparativamente, os gráficos de condutividade medida por cada condutivímetro. Isto é, para cada condutivímetro, realizou-se a medição continuada das variações medidas ao longo da passagem do traçador. Estes dados permitiram a geração da curva de condutividade em função do tempo. Através da comparação entre os gráficos de cada sonda foi possível determinar as velocidades de passagem do traçador.

Devido à necessidade de recirculação da água, os gráficos de condutividade não se assemelharam àqueles normalmente encontrados na bibliografia; isto é, não ocorreu queda acentuada nos valores de condutividade após o gráfico atingir o pico. Devido a esta limitação, o estudo comparativo foi realizado analisando-se a resposta inicial de cada sonda. Os pontos de inflexão dos gráficos de condutividade foram definidos através de análise visual. Através da análise comparativa entre os dados das sondas, foi possível avaliar a hidrodinâmica interna deste protótipo. O protótipo possuía quatro aberturas internas para a câmara de decantação. Estas aberturas foram numeradas de baixo para cima, respectivamente, 1, 2, 3 e 4.

A Figura 4 ilustra o princípio de funcionamento da separação trifásica do reator testado. À direita da figura está representada a posição das sondas para os ensaios de medição de velocidade.

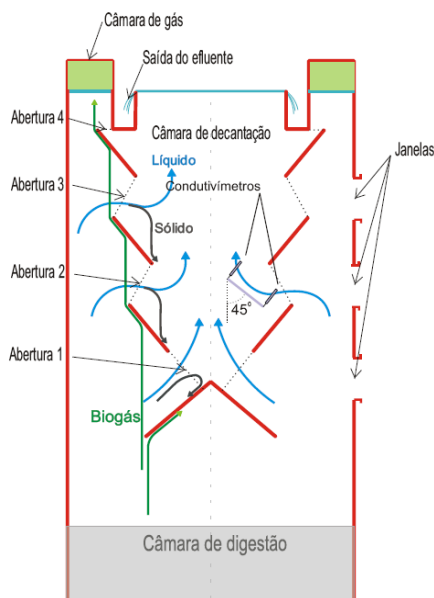


Figura 4: Separador trifásico e posição das sondas.

A Figura 5 apresenta fotografias dos sistemas descritos, sendo A e B referentes ao sistema de entrada, composto por uma caixa de entrada com sistema de bombeamento e registros de regulação de vazão. Em C e D ilustram-se os sistemas de distribuição de efluentes e de aeração e o sistema de medição de vazão através de hidrômetro com contador de pulso.

Na etapa I foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Bomba submersa, modelo Robusta 250T, marca ABS,
- Medidor de vazão tipo lentilha (hidrômetro), com contador de pulso eletro-magnético, medidor modelo Multimag TMII 3/4", marca Actaris,
- Controlador de condutividade de medição contínua, modelo WDT 400, marca Wachem, com duas sondas de medição,
- Dispositivos de armazenamentos de sinal, modelo Dataloger, marca Novus, duas unidades,
- Bomba de água manual tipo puxa-empurra, para injeção do traçador.



Figura 5: Aspectos do protótipo. A: Sistema de entrada; B: Registros de controle de vazão; C: Tubulação de entrada e difusores de ar; D: Medidor de vazão de entrada.

Etapa II

Nesta etapa do trabalho, o reator passou a operar com esgoto bruto efluente do tratamento preliminar. Iniciou-se, também, o monitoramento do protótipo, por meio de análises de DQO e SST. Foram também realizados nesta etapa, ensaios de estímulo-resposta. Foram determinados, no afluente e efluente do reator UASB, temperatura, DQO e SST. As análises laboratoriais seguiram os métodos analíticos recomendados pelo “Standard Methods” (APHA *et al.*, 1995).

Para se obter os parâmetros hidrodinâmicos de tempo de residência e coeficiente de mistura, foram realizados ensaios de estímulo-resposta com uso de traçador salino. Assim como no estudo hidrodinâmico da etapa 1, o traçador utilizado nos ensaios de estímulo resposta foi uma solução de cloreto de sódio comercial a uma concentração de 300 g/L. Foram utilizadas as mesmas sondas já calibradas cujos posicionamentos, para este estudo, foram no tanque de entrada e na canaleta de saída do reator UASB. Considerando o volume de reator de 15.000 litros, definiu-se uma concentração aplicada em relação ao volume do reator, de 1,0 g/L. Assim, pelo cálculo de diluição aplicou-se por teste um total de 15 kg de sal comum comercial. O volume de solução salina aplicada foi de 50 litros. Após a aplicação do traçador iniciava-se a aquisição de dados com intervalo de 10 minutos.

Nesta fase, foi mantida a mesma vazão anterior, de 0,50 L/s, correspondente a um tempo de detenção hidráulica de 8,3 horas. O tempo total de duração dos ensaios foi determinado de forma a que fossem atingidos os valores iniciais de condutividade anteriores à aplicação do traçador.

A partir dos dados de condutividade coletados foram calculados, através das equações de calibração das sondas, os valores de concentração na saída do reator. Com os dados de concentração foi possível calcular o tempo de residência médio (equação 1).

$$\bar{t} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i \cdot C_i(t) \cdot \Delta t_i}{\sum_{i=1}^n C_i(t) \cdot \Delta t_i} \quad (\text{equação 1})$$

Onde t_i é o tempo de coleta da amostra i , $C_i(t)$ é a concentração do traçador da amostra i , e Δt_i é constante, igual a 10 minutos. Sendo Δt_i constante, tem-se:

$$\bar{t} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i \cdot C_i(t)}{\sum_{i=1}^n C_i(t)} \quad (\text{equação 2})$$

A variância (σ^2) foi estimada através da equação 3.

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n t_i^2 \cdot C_i(t) \cdot \Delta t_i}{\sum_{i=1}^n C_i(t) \cdot \Delta t_i} - (\bar{t})^2 \quad (\text{equação 3})$$

Como Δt_i é constante, tem-se que:

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n t_i^2 \cdot C_i(t)}{\sum_{i=1}^n C_i(t)} - (\bar{t})^2 \quad (\text{equação 4})$$

Substituindo-se os valores da variância (σ^2) e (\bar{t}) obtidos por meio dos ensaios com traçador, foi possível obter o valor do coeficiente de mistura (d) por meio da equação 5.

$$\sigma_{\theta}^2 = \frac{\sigma^2}{\bar{t}^2} = 2d - 2d^2(1 - e^{-\frac{1}{d}}) \quad (\text{equação 5})$$

RESULTADOS

Etapa I: Estudo hidrodinâmico com ensaios de velocidade

Nesta etapa, foram feitas aplicações de traçador para avaliar as velocidades de trânsito nas aberturas do decantador. Como apresentado anteriormente, o protótipo possui aberturas internas à câmara de decantação, numeradas de baixo para cima, 1, 2, 3 e 4, conforme pode ser observado na figura 4.

Diferentemente do observado em trabalhos relacionados a estudos de velocidade, não foi possível obter curvas de variação de concentração com rápido decaimento. Martins (2004) realizou ensaios de velocidade onde foi possível observar claramente a passagem da mancha de concentração através das sondas. Porém neste trabalho observou-se um lento decaimento da curva de concentração, justificado pelas baixas velocidades em comparação aos resultados da bibliografia citada. Esta ocorrência impossibilitou uma clara observação do ponto de máximo dos gráficos de concentração. Devido a estas dificuldades apresentadas, para se estabelecer os picos dos gráficos de concentração, adotou-se neste trabalho que a comparação entre os tempos de respostas dos gráficos seria feita pela resposta inicial dada por cada sonda à passagem do traçador. Para isso, foram feitas análises visuais dos gráficos para determinação dos pontos de inflexão das curvas de condutividade a fim de definir o tempo de transito entre sondas. A figura 6 ilustra um dos resultados do ensaio de velocidade.

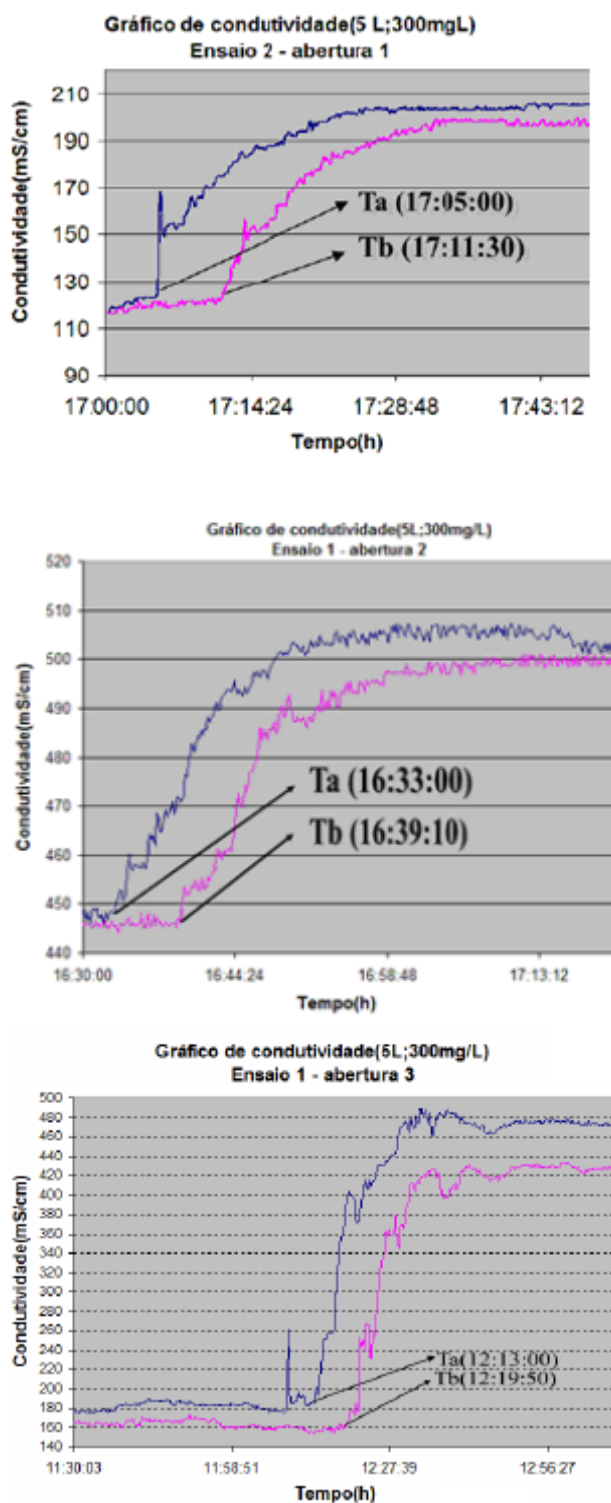


Figura 6: Resultados dos ensaios de velocidade de passagem do traçador.

A tabela 2 apresenta um resumo dos resultados dos experimentos realizados nesta etapa do trabalho. Nestes ensaios, o posicionamento da sonda tinha um ângulo de 45° , conforme pode ser observado na figura 7. Na tabela 2 são apresentados os resultados das medições de velocidade e também o cálculo da componente vertical obtida através da equação 6.

$$V_v = V \cdot \cos 45^\circ$$

(Equação 6)

Tabela 2: Resumo dos ensaios realizados na etapa 1.

Código do experimento	Data	Vazão aplicada média (L/s)	Velocidade medida (V) (m/h)	Velocidade componente vertical (Vv) (m/h)
E 1.1	20/12/2009	0,497	1,92	1,36
E 1.2	22/12/2009	0,493	1,84	1,30
E 2.1	24/12/2009	0,496	1,95	1,38
E 2.2	28/12/2009	0,491	1,89	1,34
E 3.1	04/01/2010	0,497	1,75	1,24
E 3.2	07/01/2010	0,495	1,71	1,21

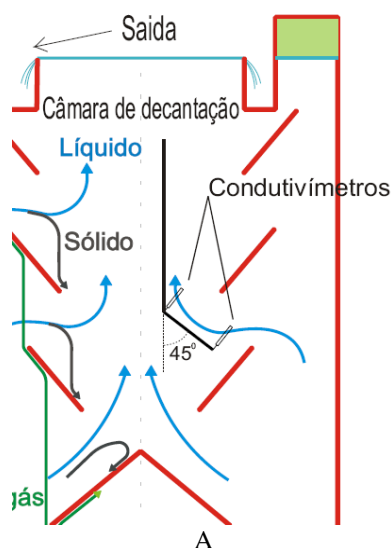


Figura 7: Posicionamento das sondas de condutividade. A: Ângulo de instalação das sondas; B: foto das sondas instaladas na abertura 1.

Através da metodologia utilizada foi possível avaliar as velocidades internas à câmara de decantação. Contudo devido à configuração interna do reator e ao posicionamento das sondas, as velocidades medidas neste trabalho são mais representativas das velocidades ascensionais dentro da câmara de decantação do que as velocidades de passagem nas aberturas, conforme explicado a seguir.

Na tabela 3 estão apresentadas às áreas referentes a cada abertura. A primeira coluna corresponde à área de passagem, isto é, a área de entrada da zona de decantação. Já a segunda coluna corresponde à área superficial do decantador no ponto médio de cada abertura. Os valores de área foram calculados a partir dos dados apresentados na figura 8.

Através dos dados de velocidade e área, foi possível fazer uma estimativa das vazões para cada abertura, conforme apresentado na tabela 4. Para isso, neste cálculo foi considerado que as velocidades medidas correspondem à velocidade de passagem pelas aberturas, porém será demonstrado a seguir que esta consideração deve ser corrigida. Nos ensaios não foram realizadas medições de velocidades na abertura 4, que foi desconsiderada nos cálculos das tabelas 4 e 5.

Tabela 3: Áreas referentes às aberturas.

Abertura	Área por abertura (m ²)	Área Superficial do decantador (m ²)
1	0,38	0,58
2	0,90	0,92
3	1,09	1,33
4	0,44	-

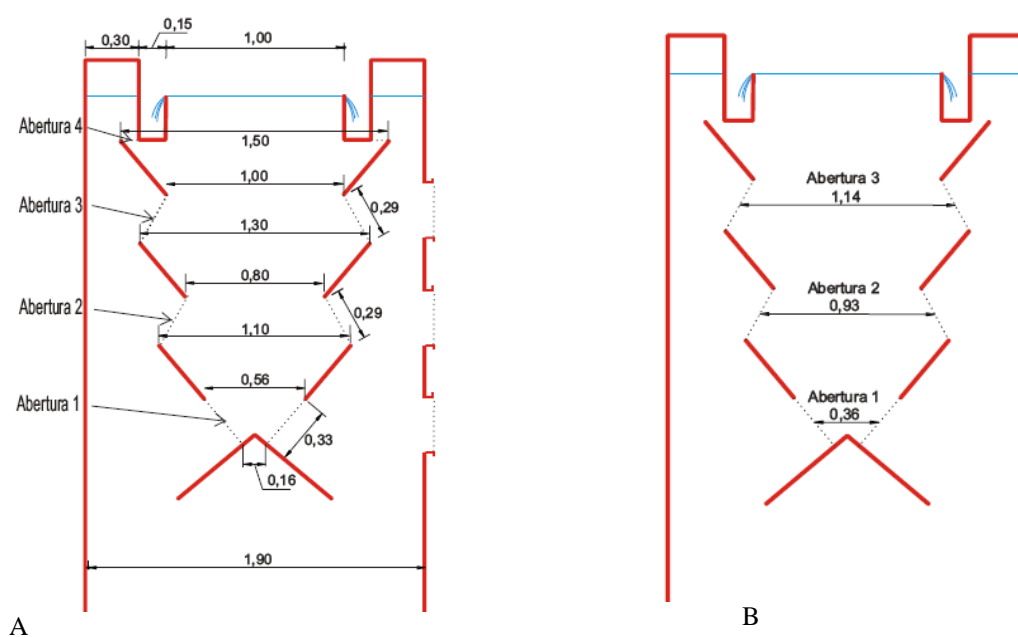


Figura 8: Dimensionais do reator UASB. A: Cotas referentes ao cálculo das áreas das aberturas; B: Cotas referentes às áreas superficiais do decantador.

Tabela 4: Cálculo das vazões referentes às aberturas.

Abertura	Ensaio	Velocidade medida (m/h)	Área por abertura (m²)	Vazão por abertura	
				(L/s)	Média (L/s)
1	E 1.1	1,92	0,38	0,20	0,20
	E 1.2	1,84		0,19	
2	E 2.1	1,95	0,90	0,49	0,48
	E 2.2	1,89		0,47	
3	E 3.1	1,75	1,09	0,53	0,52
	E 3.2	1,71		0,52	
		SOMA			1,20

Observa-se que a soma das vazões das aberturas com total de 1,20 L/s é um valor muito superior a vazão média aplicada de 0,5 L/s. Já na tabela 6 foi considerado que as componentes verticais das velocidades medidas correspondem à velocidade ascensional aplicada ao decantador. Observa-se que a vazão superficial no ponto referente à abertura 3, ponto mais próximo da saída do reator, foi de 0,46 L/s, compatível com a vazão aplicada de 0,496 L/s neste ensaio.

Na figura 8, estão apresentadas as cotas referentes aos diâmetros das áreas superficiais nos pontos de medição de velocidade; por exemplo, para a abertura 3, tem-se o diâmetro de 1,30 m que corresponde a uma área superficial de 1,327 m².

Tabela 5: Cálculo das vazões superficiais aplicadas na câmara de decantação.

Abertura	Ensaio	Velocidades Componente vertical (m/h)	Área superficial do Decantador (m²)	Vazão ascensional (L/s)	
				Média	
1	E 1.1	1,36	0,58	0,21	0,21
	E 1.2	1,30		0,21	
2	E 2.1	1,38	0,92	0,35	0,35
	E 2.2	1,34		0,34	
3	E 3.1	1,24	1,33	0,46	0,46
	E 3.2	1,21		0,45	
	Vazão aplicada				

Assim, a vazão calculada na tabela 5, corresponde ao produto entre velocidade ascensional e área superficial para cada seção do decantador, cuja resposta em m³/h foi convertida em L/s. Esta observação permite concluir que a medição de velocidade foi possível, porém devido ao posicionamento das sondas e das características internas do reator, as velocidades observadas neste experimento correspondem às velocidades ascensionais da câmara de decantação.

Desta constatação, pode-se concluir que as velocidades ascensionais no decantador, próximo ao ponto de saída, ficaram na faixa de 1,22 m/h, valor que corresponde à taxa de aplicação para a vazão máxima, recomendado por Chernicharo (2007). Contudo, observar-se-á, por meio da avaliação dos parâmetros físico-químicos, que o reator obteve resultados satisfatórios em relação à remoção de sólidos suspensos e DQO, apesar de operar com taxa superficial elevada no decantador.

Através dos resultados de vazão apresentados na tabela 5, foi possível estimar as vazões através das aberturas do decantador (figura 9).

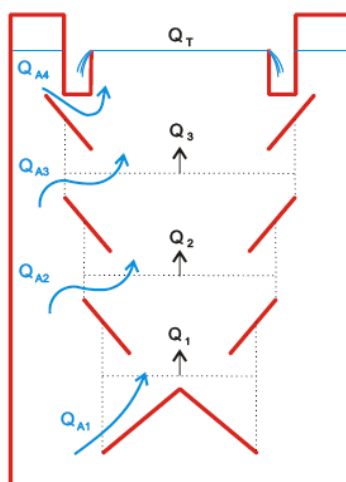


Figura 9: Representação das vazões nas aberturas.

$$\begin{aligned}
 Q_1 &= Q_{A1} \\
 Q_2 &= Q_{A2} + Q_1 \\
 Q_3 &= Q_{A3} + Q_2 \\
 Q_T &= Q_3 + Q_{A4}
 \end{aligned}$$

Sendo: Q = vazão ascensional do ponto; Q_A = vazão da abertura.

De acordo com a tabela 5, os valores de vazão Q_T , Q_1 , Q_2 e Q_3 , são:

$$Q_T = 0,496 \text{ L/s};$$

$$Q_3 = 0,46 \text{ L/s};$$

$$Q_2 = 0,35 \text{ L/s};$$

$$Q_1 = 0,21 \text{ L/s}.$$

A distribuição das vazões nas aberturas, em relação à vazão aplicada é:

$$Q_{A4} = Q_T - Q_3 = 0,496 - 0,46 = 0,036 \text{ L/s} \rightarrow 7,2 \%,$$

$$Q_{A3} = Q_3 - Q_2 = 0,46 - 0,35 = 0,11 \text{ L/s} \rightarrow 22,1 \%,$$

$$Q_{A2} = Q_2 - Q_1 = 0,35 - 0,21 = 0,14 \text{ L/s} \rightarrow 28,2 \%,$$

$$Q_{A1} = Q_1 = 0,21 \text{ L/s} \rightarrow 42,4 \%.$$

Avaliando a distribuição das vazões de entrada no decantador, é possível observar que houve uma distribuição decrescente, de baixo para cima, entre as aberturas da decantação. A abertura 1 responde pela maior parcela da vazão aplicada ao reator (42,4%, 0,21 L/s). Por meio destes dados de vazão e das áreas das aberturas, foi possível estimar a velocidade de passagem para cada abertura conforme apresentado na tabela 6.

Tabela 6. Velocidades de passagem nas aberturas ao decantador.

Abertura	Área por Abertura (m ²)	Vazão estimada por abertura (L/s)	Velocidade estimada por abertura (m/h)
1	0,38	0,21	1,99
2	0,90	0,14	0,52
3	1,09	0,11	0,36
4	0,44	0,04	0,09

Observa-se na tabela 6 que as velocidades nas aberturas do decantador diminuem de baixo para cima, o que, teoricamente, favorece o processo de decantação. Os valores de velocidades ficaram todos abaixo da faixa recomendada de 2,0 a 2,3 m/h (CHERNICHARO, 2007).

Estes resultados favorecem a configuração dos separadores de fase proposta neste projeto, que tem por finalidade o aumento da área de passagem com a conseqüente redução das velocidades de entrada ao decantador.

Etapa II : Estudo hidrodinâmico - ensaios de estímulo-resposta

Nas Figuras 10 a 12 são apresentados os resultados dos ensaios de estímulo- resposta, com vazão constante. A resposta inicial dos ensaios tem como resultado um gráfico de condutividade em função do tempo. A figura 13 mostra o traçado das Curvas de Distribuição do Tempo de Resposta (DTR) para cada ensaio.

Observando e comparando as curvas DTR dos ensaios acima, verifica-se que os comportamentos hidrodinâmicos se assemelharam. O fenômeno de cauda, observado em todos os ensaios, configuram um sistema com fluxo disperso.

Na tabela 7 apresentam-se os resultados dos tempos de residência médios e números de dispersão medidos nos ensaios realizados. De acordo com os valores obtidos, em todos os ensaios, o número de dispersão ou mistura ficou acima de 0,1, sendo que a média dos ensaios foi de 0,124. Este resultado encontra-se dentro da faixa de representação para escoamento do tipo fluxo disperso (Von Sperling, 1996). No entanto, (Levenspiel, 1999) considera que escoamentos com coeficiente de mistura acima de 0,01, ou seja, para $(D/uL) > 0,01$, configuram escoamentos com grande dispersão.

Os resultados encontrados neste trabalho, assemelham-se aos resultados apresentados por Carvalho *et al.* (2006). Estes autores, operando um reator UASB com vazão constante, obtiveram valores de coeficiente de mistura (d) entre 0,112 a 0,121. Salgado (2008) também operando um UASB com vazão constante, mediu valores de d na faixa entre 0,099 a 0,132.

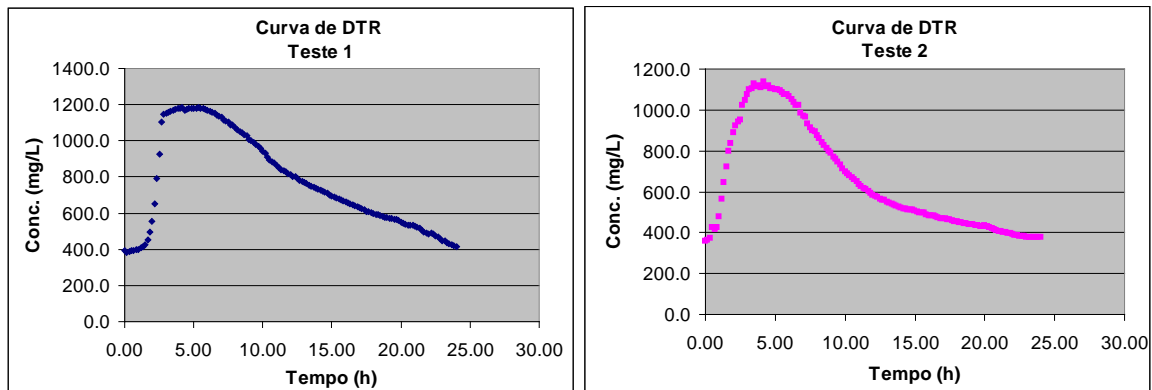


Figura 10: Curvas DTR, referentes aos ensaios 1 e 2.

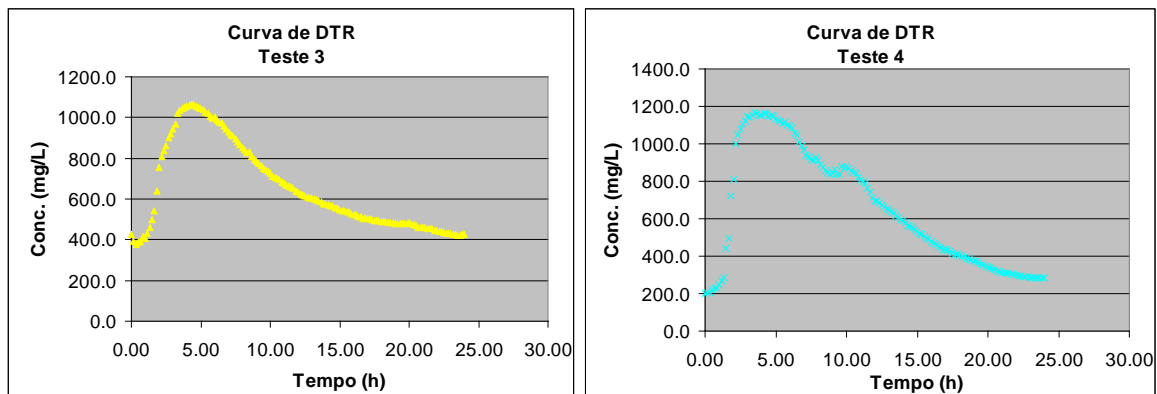


Figura 11: Curvas DTR, referentes aos ensaios 3 e 4.

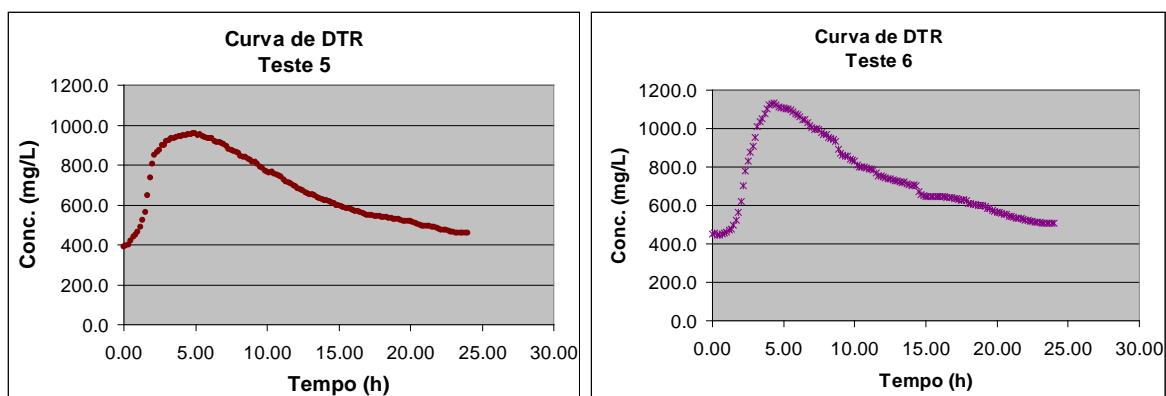


Figura 12: Curvas de DTR, referentes aos ensaios 5 e 6.

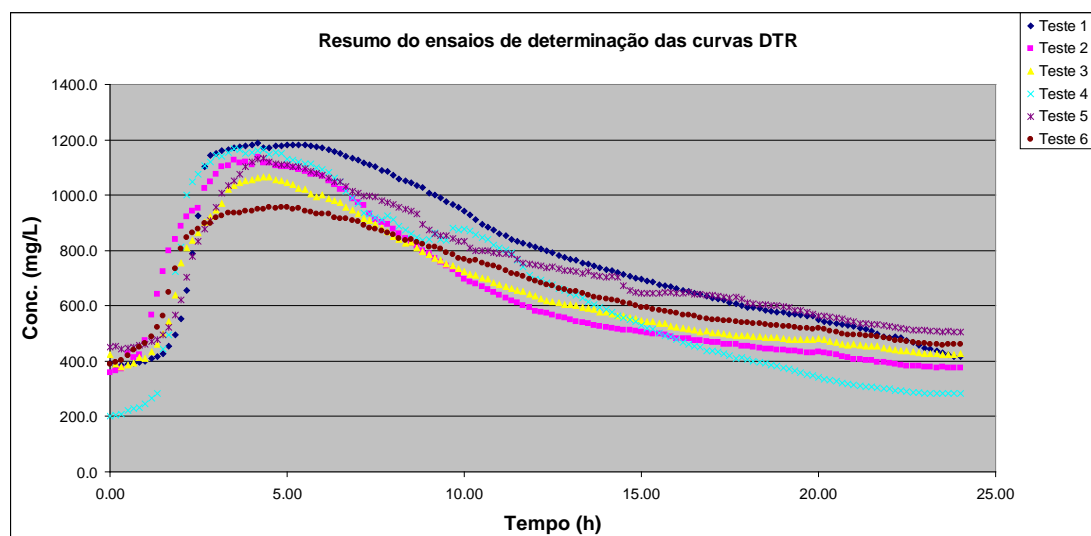


Figura 13: Curvas de DTR, referentes aos ensaios com traçador.

Tabela 7: Resumo dos tempos de residência e números de dispersão.

Código do experimento	Tempo de residência médio (\bar{t}) (h)	Cálculo da variância (σ^2) (h^2)	Cálculo do número de dispersão (d)
E 1	10,71	0,345	0,117
E 2	10,01	0,416	0,135
E 3	10,54	0,381	0,126
E 4	9,85	0,369	0,124
E 5	10,95	0,352	0,119
E 6	10,83	0,366	0,123
Média	10,48	0,366	0,124

Na Etapa II do estudo iniciou-se um monitoramento de temperatura, DQO e sólidos suspensos totais do reator. A tabela 8 apresenta um resumo dos valores de temperatura no afluente e efluente do reator UASB. Os sistemas anaeróbios dependem fortemente da temperatura, sendo que se procura atingir uma faixa de temperatura dentro da digestão mesofílica, entre 30°C a 40°C (van Haandel e Lettinga, 1984). Como pode ser observado na tabela 8, o reator operou com temperaturas médias próximas da faixa ótima, indicando que a temperatura de operação não foi um fator limitante para o metabolismo da biomassa anaeróbia.

Tabela 8: Valores de temperatura no afluente e efluente do reator.

Ponto de Amostragem	Temperatura (°C)	Meses			
		1º	2º	3º	4º
Afluente	Mínima	27,0	26	27,4	27,5
	Média	28,7	28,4	29,1	29,4
	Máxima	31,0	29,8	31,0	31,3
Efluente	Mínima	27,3	25,2	26,5	27,0
	Média	29,2	27,1	31,9	29,1
	Máxima	31,7	27,8	29,1	31,9

Na tabela 9 são apresentados os valores das médias aritméticas e dos desvios padrões de DQO e sólidos suspensos totais para o período de monitoramento do sistema.

Tabela 9: Concentrações de DQO e SST no afluente e efluente do reator UASB (Etapa II).

Período (meses)	Amostras (n)	DQO _{total}			SST		
		Afluente (mg/L)	Efluente (mg/L)	Remoção (%)	Afluente (mg/L)	Efluente (mg/L)	Remoção (%)
1º	8	883±140	404±88	53,2±11,1	263±43	125±34	52,5±11,1
2º	9	856±94	333±120	61,8±12,1	261±47	101±38	62,5±11,0
3º	8	742±87	244±116	67,4±15,1	486±125	124±60	74,4±9,0
4º	3	702±141	259±85	64,0±5,8	415±29	140±23	66,2±5,4
Média	28	828±132	328±124	60,9±13,5	336±127	116±45	63,3±13,1

Para as condições operacionais do reator, com TDH de 8,3 horas, a concentração média de DQO no efluente foi de 328 mg/L, representando uma eficiência média de 60,9%. Contudo, se for considerada apenas a fase de estabilidade do reator, compreendida entre o 3º e o 4º período, a eficiência atingida sobe para 65,7%, com concentração de DQO no efluente de 252 mg/L. Esta eficiência encontra-se dentro das expectativas para reator UASB. A figura 14 mostra as eficiências de remoção de DQO total pelo reator UASB.

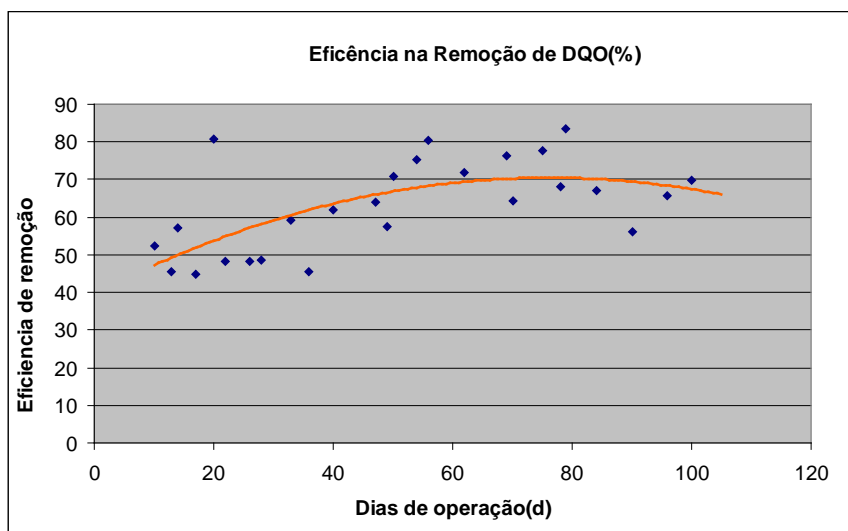


Figura 14: Eficiência de remoção de DQO ao longo do período monitorado.

A figura 15 mostra a eficiência de remoção de sólidos suspensos totais no reator UASB ao longo do período de observação. O reator apresentou eficiência média de remoção de 63,3 %, com concentração média no efluente de 116 mg/L. Da mesma forma que a DQO, na fase de estabilidade, a eficiência média subiu para 70,3%, o que também é compatível com os valores indicados na literatura.

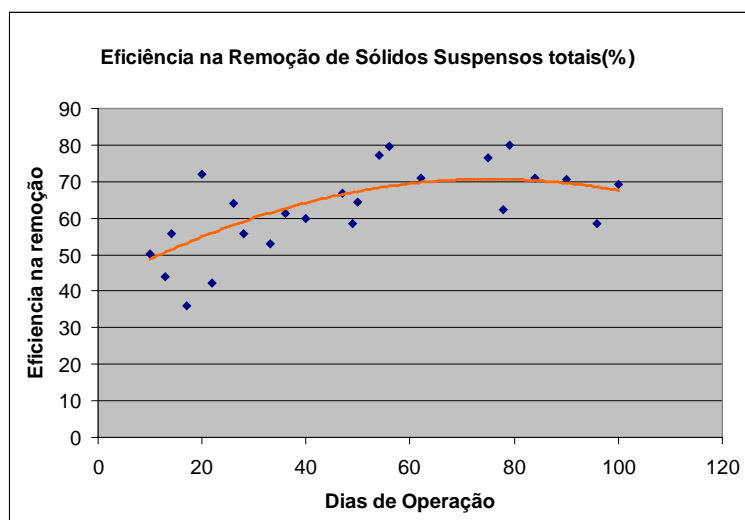


Figura 15: Eficiências de remoção de SST ao longo do período monitoradas.

CONCLUSÕES

As principais conclusões do estudo realizado foram as seguintes:

- 1º) Os resultados referentes as medições de velocidades internas à câmara de decantação, indicam velocidades ascensionais variando de 1,21 m/s a 1,36 m/s.
- 2º) Há a necessidade de se melhorar a metodologia para medição das velocidades de entrada no decantador. Analisando-se indiretamente os resultados, foi possível estimar as velocidades de entrada no decantador com valores de 1,99; 0,52; 0,36; e 0,09 m/h, para as aberturas de 1 a 4, respectivamente. Estes resultados ficaram abaixo dos valores recomendados na bibliografia.
- 3º) Os resultados dos ensaios de estímulo resposta indicaram que o escoamento no reator é do tipo fluxo disperso, uma vez que o efeito de cauda na curva “C” sugere a existência de diferentes velocidades internas causadoras da dispersão do traçador. O coeficiente de dispersão médio medido foi de 0,124.
- 4º) Através dos resultados dos testes com traçador, foi possível calcular os valores para o tempo de residência médio, $\bar{t} = 10,48$ h, superior ao teórico de 8,3 h.
- 5º) As remoções de DQO e SST foram compatíveis com os resultados de reatores convencionais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. APHA, AWWA, WPCF. Standard methods for the examination of water and wastewater. 19th ed. Washington: APHA, 1995.
2. 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.
3. CHENICHARO, C.A.L. Reatores anaeróbios. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG, 2007.
4. LEVENSPIEL. O. Chemical reaction engineering: 3º ed. Wiley, 1999.
5. MARTINS JR, W. N. *et al.* Determinação automática de tempos de trânsito de traçadores para medição de velocidades. In: XXI Congresso Latino-americano de Hidráulica (IAHR). São Pedro, 2004.
6. PIRES, E. C.; RIBEIRO, A. P. Avaliação preliminar do comportamento hidrodinâmico de reatores anaeróbios de escoamento ascendente e manta de lodo. São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos, 1992.
7. SALGADO, M.T. Modelo matemático para avaliação hidrodinâmica em reatores tubulares operando em regime não permanente. São Carlos, 2008. Tese de doutorado – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.
8. VAN HAANDEL, A.C.; LETTINGA, G. Tratamento anaeróbio de esgotos: um manual para regiões de clima quente. Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 1984.
9. VON SPERLING, M. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, 1996.