

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CÂMPUS CAMPO MOURÃO
COORDENAÇÃO DE AMBIENTAL
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

SÉRGIO LUIZ NASCIMENTO JUNIOR

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO HIDRODINÂMICO DE UM REATOR
ANAERÓBIO-AERÓBIO DE LEITO FIXO TRATANDO EFLUENTE
BOVINO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CAMPO MOURÃO,
2013

SÉRGIO LUIZ NASCIMENTO JUNIOR

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO HIDRODINÂMICO DE UM REATOR
ANAERÓBIO-AERÓBIO DE LEITO FIXO TRATANDO EFLUENTE
BOVINO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à disciplina de TCC II do Curso de Engenharia Ambiental da Coordenação de Ambiental – COEAM – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Câmpus Campo Mourão, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof^a. Dr^a. Cristiane Kreutz

CAMPO MOURÃO,

2013

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho a todas as pessoas que estiveram presentes em minha jornada pela graduação, em especial às que me auxiliaram e tornaram-na prazerosa e - Aos meus pais, Therezinha e Sérgio; ao meu irmão Vitor; às minhas tias Maria e Cecília; à minha avó Leonarda (*in memorian*); ao meu avô Francisco, à minha namorada Beatriz; à orientadora deste trabalho prof. Dra. Cristiane Kreutz e à minha segunda família da Chatuba e agregados – Bila, Gordo, Rudi, Jhonny, Rodrigão, Boladão, Neto, Dreads, Jonas e Tanabe.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Therezinha e Sérgio, por não medirem esforços e empenho ao me fornecer condições e credibilidade, além de todos os recursos necessários nestes preciosos anos de graduação. São merecedores de minha consideração e respeito por me guiarem sempre com educação e afeto de sobra. Também agradeço pelo amor incessante e dedicação, muitas vezes acima de suas condições.

Ao meu irmão Vitor, que esteve sempre de prontidão a sanar dúvidas, prestar conselhos e fornecer-me força e carinho indispensáveis. Este foi um espelho, um exemplo de superação e, acima de tudo, um grande companheiro.

A minha avó Leonarda (*in memoriam*) que sempre me esperava voltar da universidade com almoços e jantares deliciosos, além do indiscutível amor de vó, muito importante sempre. A ela, toda minha admiração e respeito.

As minhas tias Maria de Fátima e Cecília, por serem mulheres notáveis e por auxiliarem-me desde o princípio da jornada acadêmica e ao meu avô Francisco, um guerreiro na luta contra o câncer, exemplo de vida pra mim.

A minha namorada Beatriz pela compreensão, amor incessante, companheirismo e carinho prestados em todos os momentos incisivos desta graduação. Também agradeço por me trazer alimentos e demais recursos enquanto eu passava dias e noites no laboratório concluindo meu trabalho.

A minha orientadora, prof^a Dra. Cristiane Kreutz, pelos valiosos ensinamentos, paciência e cooperação durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores Karina Carvalho e Fernando Passig pelos ensinamentos, acompanhamento e confiança em mim depositada.

Aos componentes da banca de defesa professor Thiago Moraes de Castro e Eudes José Arantes pelos ensinamentos.

Aos professores da COEAM que participaram da minha formação.

A amiga e companheira de laboratório Aldria Belini, sem a qual a realização deste trabalho seria impossível. Aos companheiros Maiko e Raphael, por auxiliarem na construção e manutenção do reator.

A todos os amigos, em especial à Chatuba e agregados: Bila, Gordo, Rudi, Jhonny, Rodrigão, Boladão, Neto, Dreads, Jonas e Tanabe; por proporcionarem momentos fantásticos de alegrias, companheirismo e lições de vida.

Aos técnicos do laboratório Kássia Ayumi Segawa do Amaral e Marcelo Nunes de Jesus, pela ajuda prestada na realização deste trabalho.

A Universidade Tecnológica Federal do Paraná – câmpus Campo Mourão, pelo espaço e equipamentos cedidos para realização deste trabalho e por todo ensinamento.

A Fundação Araucária pelo custeio dos reagentes e equipamentos utilizados nesta pesquisa.

“Nenhum vento será favorável àquele navio que não souber em qual porto atracar”
(anônimo)

RESUMO

NASCIMENTO JUNIOR, Sérgio L. **Estudo do comportamento hidrodinâmico de reator anaeróbio-aeróbio de leito fixo tratando efluente bovino**. 2013. 47 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2013.

O presente trabalho teve como objetivo avaliar o comportamento hidrodinâmico de um reator anaeróbio-aeróbio de leito fixo (RAALF), operando em três tempos de detenção hidráulica (TDH) distintos – 22h, 16h, e 10h. O reator, constituído de PVC de 100 mm de diâmetro e 1,2m de altura, com volume útil de 4,3L, operou em fluxo ascendente, com alimentação realizada por bomba peristáltica e utilizou como substrato efluente bruto proveniente de abatedouro bovino. Para imobilização de biomassa, foram utilizados dois materiais: *Luffa cylindrica* (celulose vegetal) na fase anaeróbia e espuma de poliuretano na fase aeróbia. Os perfis hidrodinâmicos constituíram de testes estímulo-resposta tipo pulso, utilizando como traçador azul de bromofenol. Foram realizadas análises de parâmetros físico-químicos com o objetivo de determinar o estado de equilíbrio dinâmico aparente do RAALF. Os resultados do monitoramento do RAALF indicam elevados índices de remoção de matéria orgânica em termos de DQO, atingindo a média de 93,3% para DQO bruta e 90,5% para DQO filtrada. As remoções de sólidos suspensos totais também atingiram bons percentuais, média de 97,7%. Foi observado um longo decaimento da concentração de traçador demonstrado por TDHs reais maiores do que os teóricos. Esse fenômeno pode ser atribuído à adsorção do traçador pelo meio suporte. Houve um adiantamento dos picos de concentração em todos os ensaios, o que pode ser explicado pela eventual presença de caminhos preferenciais. As correlações dos modelos de dispersão (R^2) indicam uma maior aproximação do modelo de tanques de mistura completa em série (N-CSTR), com uma média de 3 reatores em série nos perfis pertinentes aos TDH de 22h e 16h e 2 reatores em série ao TDH de 10h. Pelos resultados do estudo hidrodinâmico não foram identificados desvios de idealidade como zonas mortas e curto-circuito hidráulico. Quanto a eficiência hidráulica, para todos os ensaios realizados, os dados encontrados para este parâmetro foram superiores a 0,75, o que indica boa eficiência hidráulica.

Palavras-chave: Estudo hidrodinâmico, anomalias, traçadores, efluente bovino.

ABSTRACT

NASCIMENTO JUNIOR, Sergio L. **Study of hydrodynamic behavior of an anaerobic-aerobic fixed bed reactor treating veal effluent.** 2013. 47 p. Work of Course Completion (Bachelor of Environmental Engineering) - Federal Technological University of Paraná. Campo Mourão, 2013.

This study aimed to evaluate the hydrodynamic behavior of an anaerobic-aerobic fixed bed (RAALF), operating in three hydraulic retention times (HRT) - 22h, 16h, and 10h. The reactor consists of a 100 mm diameter PVC pipe and 1.2m high, with a volume of 4.3 L, operated in upflow, with power held by peristaltic pump and used as substrate raw wastewater from slaughter cattle. For immobilization of biomass, two materials was used: *Luffa cylindrica* (vegetable cellulose) in the anaerobic phase and polyurethane foam in aerobic phase. The hydrodynamic profiles consisted of testing stimulus-response type pulse, using bromophenol blue as a tracer. Analyses of physico-chemical parameters were made in order to determine the apparent steady state of the RAALF. The results of this monitoring indicate high levels of organic matter removal in terms of COD, averaging 93.3% for COD gross and 90.5% for filtered COD. The removal of suspended solids also achieved good percentage average of 97.7%. Decay was observed over the concentration of tracer demonstrated by actual TDHS greater than the theoretical. This phenomenon can be attributed to adsorption of the tracer through support. There was an advance peak concentration in all assays, which can be explained by the possible presence of preferential paths. The correlations of the models dispersion (R²) indicate a closer approximation of the model of complete mixing tanks in series (N-CSTR) with an average of three reactors in series pertaining to the profiles HDT of 22h and 16h and two reactors in series the HRT of 10h. The results of the study were not identified hydrodynamic deviations ideality as dead zones and short-circuit hydraulic. As the hydraulic efficiency for all tests, the data for this parameter was found higher than 0.75, indicating good hydraulic efficiency.

Keywords: Study hydrodynamic anomalies, plotters, bovine effluent.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO RAALF	20
FIGURA 2 – MEIOS SUPORTE UTILIZADOS PARA IMOBILIZAÇÃO DE BIOMASSA NO RAALF. A) <i>LUFFA CYLINDRICA</i> . B) ESPUMA DE POLIURETANO.....	21
FIGURA 3 – VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE AZUL DE BROMOFENOL AO LONGO DO TEMPO NAS AMOSTRAS DO	30
EFLUENTE PARA O TDH DE 22 HORAS: (A) ENSAIO 1; (B) ENSAIO 2 E (C): ENSAIO 3.	30
FIGURA 4 – VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE AZUL DE BROMOFENOL AO LONGO DO TEMPO NAS AMOSTRAS DO EFLUENTE PARA O TDH DE 26 HORAS: (A) ENSAIO 1; (B) ENSAIO 2 E (C): ENSAIO 3.	31
FIGURA 5 – VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE AZUL DE BROMOFENOL AO LONGO DO TEMPO NAS AMOSTRAS DOEFLUENTE PARA O TDH DE 10 HORAS: (A) ENSAIO 1; (B) ENSAIO 2 E (C): ENSAIO 3.	32
FIGURA 6 – CURVAS DE DTR OBTIDAS EXPERIMENTALMENTE COM AZUL DE BROMOFENOL PARA O TDH DE 22 HORAS: (A) ENSAIO 1; (B) ENSAIO 2; (C) ENSAIO 3.	37
FIGURA 7 – CURVAS DE DTR OBTIDAS EXPERIMENTALMENTE COM AZUL DE BROMOFENOL PARA O TDH DE 16 HORAS: (A) ENSAIO 1; (B) ENSAIO 2; (C) ENSAIO 3.	38
FIGURA 8 – CURVAS DE DTR OBTIDAS EXPERIMENTALMENTE COM AZUL DE BROMOFENOL PARA O TDH DE 10 HORAS: (A) ENSAIO 1; (B) ENSAIO 2; (C) ENSAIO 3.	39

LISTA DE TABELAS

TABELA 1. PARÂMETROS ANALISADOS E METODOLOGIA EMPREGADA NA AVALIAÇÃO DO ESTADO DE EQUILÍBRIO DINÂMICO APARENTE DO RAALF.	22
TABELA 2. MODELOS UNIPARAMÉTRICOS DE DISPERSÃO UTILIZADOS.....	24
TABELA 3 - EQUAÇÕES PARA DETERMINAÇÃO DA PRESENÇA DE ZONAS MORTAS, CURTOS-.....	25
CIRCUITOS E EFICIÊNCIA HIDRÁULICA	25
TABELA 4 – CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DO AFLUENTE	26
TABELA 5 – RESULTADOS DAS ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS COM O RAALF OPERANDO NO TDH DE 22H.....	27
TABELA 6 – RESULTADOS DAS ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS COM O RAALF OPERANDO NO TDH DE 16H.....	27
TABELA 7 – RESULTADOS DAS ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS COM O RAALF OPERANDO NO TDH DE 10H.....	28
TABELA 8 - RESULTADO DOS PARÂMETROS OBTIDOS COM O AJUSTE DOS DADOS	33
EXPERIMENTAIS PARA O TDH DE 22 HORAS	33
TABELA 9 - RESULTADO DOS PARÂMETROS OBTIDOS COM O AJUSTE DOS DADOS	34
EXPERIMENTAIS PARA O TDH DE 16 HORAS	34
TABELA 10 - RESULTADO DOS PARÂMETROS OBTIDOS COM O AJUSTE DOS DADOS	34
EXPERIMENTAIS PARA O TDH DE 10 HORAS	34
TABELA 11 - RESULTADO DOS PARÂMETROS OBTIDOS COM O AJUSTE DOS DADOS	35
EXPERIMENTAIS PARA O TDH DE 22 HORAS	35
TABELA 12 - RESULTADO DOS PARÂMETROS OBTIDOS COM O AJUSTE DOS DADOS	35
EXPERIMENTAIS PARA O TDH DE 16 HORAS	35
TABELA 13 - RESULTADO DOS PARÂMETROS OBTIDOS COM O AJUSTE DOS	

DADOS 35
EXPERIMENTAIS PARA O TDH DE 10 HORAS 35

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 OBJETIVOS	14
2.1 OBJETIVO GERAL	14
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1 EFLUENTES DE ABATEDOUROS BOVINOS	15
3.2 REATORES COMBINADOS	16
3.3 MEIO SUPORTE DE IMOBILIZAÇÃO DE BIOMASSA	17
3.4 HIDRODINÂMICA DE REATORES	18
4 MATERIAL E MÉTODOS	20
4.1 REATOR ANAERÓBIO-AERÓBIO DE LEITO FIXO	20
4.2 SUBSTRATO	21
4.3 MEIO SUPORTE	21
4.4 FASE EXPERIMENTAL	22
4.4.1 Caracterização físico-química do afluente e efluente	22
4.4.2 Ensaios hidrodinâmicos	23
4.5 VERIFICAÇÃO DE ANOMALIAS NO RAALF	24
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	26
5.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DO AFLUENTE E EFLUENTE	26
5.2 ENSAIOS HIDRODINÂMICOS	29
5.3 VERIFICAÇÃO DE ANOMALIAS NO RAALF	40
REFERÊNCIAS	45

1 INTRODUÇÃO

O grande investimento em tecnologia na indústria pecuarista possibilita aumento de produção, de modo a atender a crescente demanda no mercado por carne e seus derivados, proveniente de sociedades com altos padrões de consumo. Tal aumento na produção multiplica a geração de resíduos provenientes dos abatedouros bovinos. Outro contribuinte nesse incremento é a necessidade do cumprimento de padrões sanitários de higienização. Neste contexto, a Legislação se especifica visando estabelecer parâmetros para a gestão e lançamento destes resíduos no meio ambiente, cujo tratamento destes efluentes providos de abatedouros deve atingir os padrões apresentados nas resoluções nº 357/2005 e 430/2011 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) e no estado do Paraná pela resolução CEMA-PR nº 070, de 2009.

Surge então uma iminente preocupação pelo meio ambiente, trazendo consigo desafios diários voltados ao correto uso e manejo de recursos naturais, conciliando-os com aspectos econômicos através da redução de impactos ambientais e estratégias de melhor aproveitamento de materiais. Deste modo, visualiza-se uma necessidade de tratamento e disposição adequada dos efluentes gerados em abatedouros.

Estas águas residuárias são de natureza orgânica, sendo assim favoráveis ao tratamento biológico. O processo mais adequado varia por conta da disponibilidade de área, custos de construção e operação, e padrões de lançamento previstos (ARRUDA, 2004).

No tratamento de águas residuárias, o baixo custo de operação e fácil implantação de sistemas anaeróbios os colocam em posição de destaque dentre os sistemas de remoção de matéria orgânica, principalmente em locais de clima tropical ou subtropical (nos quais a digestão anaeróbia é otimizada).

Porém esse tratamento encontra dificuldades em atingir os padrões estabelecidos na legislação vigente, necessitando de um pós-tratamento. Nesse contexto, os reatores combinados anaeróbio-aeróbio se mostram promissores, principalmente quando o foco é a remoção de matéria orgânica e nitrogênio. O uso destes reatores traz vantagens tais como economia de energia para aeradores, menor

produção de lodo biológico e baixo custo de implantação e operação (ARAUJO JUNIOR, 2006).

A hidrodinâmica de reatores de leito fixo é caracterizada pelo fluxo líquido e pela dispersão, principais parâmetros para o dimensionamento destes reatores. A compreensão do comportamento hidrodinâmico de reatores combinados é considerado como sendo de importância fundamental para a otimização do processo, possibilitando a detecção e solução de problemas que ocorrem frequentemente devido ao projeto do reator e aspectos geométricos (CAPELA et al, 2008).

Aplica-se o estudo hidrodinâmico em reatores para avaliar fatores como o grau de mistura, volume efetivo (influenciado pela ocorrência de zonas mortas), a existência de caminhos preferenciais e a determinação do tempo de detenção hidráulica (TDH) real. Assim, a descoberta de fatores influentes sobre a eficiência do tratamento permite melhorá-lo afim de atender padrões de lançamento e dispor adequadamente tais resíduos (ARAUJO JUNIOR, 2006).

O presente estudo atentou-se em avaliar, sobretudo, o comportamento hidrodinâmico de um sistema anaeróbio-aeróbio empregado no tratamento de efluente de abatedouro bovino e fatores que o condicionam. Além disso, foi realizado o monitoramento afluente/efluente de parâmetros físicos, químicos e biológicos, além da verificação de eventuais anomalias no interior do reator.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral da presente pesquisa consistiu em avaliar o comportamento hidrodinâmico de um Reator Anaeróbio-Aeróbio de Leito Fixo (RAALF), submetido a três Tempos de Detenção Hidráulica (TDH) distintos - 22h, 16h e 10h, empregado no tratamento de efluente proveniente de abatedouro bovino.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar o estado de equilíbrio dinâmico aparente do RAALF;
- Realizar ensaios hidrodinâmicos no RAALF para determinação dos parâmetros hidrodinâmicos usando azul de bromofenol como traçador;
- Identificar o tipo de comportamento hidrodinâmico através de modelos uniparamétricos;
- Verificar a presença de anomalias no interior do RAALF.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 EFLUENTES DE ABATEDOUROS BOVINOS

O Brasil possui o segundo maior rebanho bovino do planeta, sendo a principal atividade a produção de carne. (IBGE, 2004). Além disso, o consumo *per capita* do brasileiro atinge $36,2 \text{ kg.hab}^{-1}.\text{ano}^{-1}$, número que representa o quarto maior consumo no mundo, atrás da Argentina, Estados Unidos e Austrália.

A variação do consumo de água em abatedouros dá-se tanto pelo gasto direto com os animais quanto pela necessidade em atender padrões de higiene exigidos pelas autoridades sanitárias, em atividades como consumo e lavagem de animais, lavagem da frota transportadora, lavagem de carcaças, vísceras e intestinos, movimentação de subprodutos e resíduos, limpeza e esterilização de equipamentos, limpeza de pisos, paredes e bancadas, geração de vapor e resfriamento de compressores (PACHECO e YAMANAKA, 2006)

A descarga de efluentes de abatedouros, em sua maioria, representa um incremento nos níveis de Sólidos Totais Dissolvidos (STD), Demanda Química de Oxigênio (DQO), Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), pH, temperatura, nitrogênio, fósforo, gorduras livres e emulsificadas, detergentes sintéticos aniônicos e variações de vazão (IPCC, 2005).

Considerando as características destes efluentes, além de serem extremamente prejudiciais ao meio ambiente ao passo que podem causar a desoxigenação de rios e contaminação de mananciais subterrâneos torna-se elementar a pesquisa e desenvolvimento de novas configurações de tratamento que ofereçam alto nível de eficiência em termos de remoção de nutrientes e de carga orgânica carbonácea, a fim de atingir padrões de lançamento satisfatórios (MASSÉ e MASSE, 2000).

3.2 REATORES COMBINADOS

A discussão sobre a utilização de sistemas anaeróbios ou aeróbios para o tratamento de esgoto sanitário está se tornando cada vez menos frequente. A combinação dos dois processos tem como objetivo aproveitar as vantagens de cada um, minimizando seus aspectos negativos. Como resultado busca-se maior remoção da matéria orgânica, características dos reatores aeróbios, contudo com baixos custos de implantação e operação do sistema, além de sistemas mais compactos com menor produção de lodo, que podem ser citados como vantagens dos sistemas anaeróbios. Além disso, a combinação torna possível a remoção de nutrientes tais como nitrogênio (N) e fósforo (P) e a própria matéria orgânica. Assim, segundo Santos et al. (1998), recomenda-se que processos biológicos anaeróbios e aeróbios atuem de forma combinada. Para tal, vários sistemas vêm sendo desenvolvidos para maximizar eficiências

Callado (2001) afirma que para tratamento de águas residuárias, o sistema combinado anaeróbio-aeróbio tem mostrado ser uma opção viável quanto aos aspectos econômicos e técnicos. Isso é devido ao fato de esse sistema promover oxidação carbonácea, nitrificação, desnitrificação e remoção biológica de fósforo, de modo a permitir que sejam atingidos os padrões de lançamentos.

Neste contexto, os sistemas anaeróbio-aeróbios aplicados ao tratamento de efluentes vêm se consolidando cada vez mais nos últimos anos, principalmente por pesquisas terem mostrado ser uma opção viável para a oxidação carbonácea, a nitrificação, a desnitrificação e a remoção biológica do fósforo. Assim, permitem o dimensionamento de Estações de Tratamento de Efluentes (ETE's) mais compactas e de mais fácil operação/manutenção, segundo Domingues e Nour (2005).

Portanto, a utilização de processos combinados pode proporcionar uma série de vantagens se comparadas às estações de tratamento convencionais, tais como baixa potência de aeração requerida na fase aeróbia, menor produção de lodo biológico e baixo custo de implantação e operação (CHERNICHARO, 2006).

Silva e Nour (2004) estudaram um reator compartimentado anaeróbio-aeróbio, tratando esgoto sanitário, como possibilidade de ser utilizado em pequenas

comunidades urbanas e rurais. O desempenho do sistema foi avaliado em diversos tempos de detenção hidráulica (TDH), nos quais os melhores valores de Demanda Química de Oxigênio Total (DQO_{total}) - 73,7% e Sólidos em Suspensão Totais (SST) - 78,8%, foram obtidos com TDH total de 8 horas (4 horas para a fase anaeróbia e 4 horas para a fase aeróbia).

3.3 MEIO SUPORTE DE IMOBILIZAÇÃO DE BIOMASSA

A escolha do material de suporte de adesão de biomassa é baseada nos objetivos do tratamento requerido, bem como na composição do efluente a ser tratado. O material deve favorecer a aderência dos microrganismos. Segundo HUYSMAN et al. (1983), rugosidade, porosidade e tamanho de poros são fatores que influenciam na formação do biofilme.

A espuma de poliuretano é um material suporte bastante utilizado em reatores de biomassa aderida. Segundo Zaiat (1996), esse material suporte é adequado à adesão de biomassa microbiana, pois apresenta colonização rápida dos microrganismos. Seu uso deve-se a flexibilidade de suas propriedades físicas (densidade e tamanho de partícula), alta porosidade interna, estabilidade à hidrólise, difícil degradação biológica e potencial capacidade de confinamento de microrganismos.

Ogbonna et al. (2001) afirmam que outra alternativa de material suporte é a utilização da bucha vegetal (*Luffa cylindrica*) também conhecida como esponja vegetal que contém em sua composição diversos componentes como: ácidos orgânicos, aminoácidos, ferro, galactanos, sacarídeos, taninos, xilano e xilose. Além de baixo custo, apresenta textura e estrutura adequadas com elevado grau de porosidade.

A *Luffa cylindrica* é uma herbácea com espécies originárias na Ásia, na África e na América, pertence ao grupo das chamadas “plantas industriais”. É leve, cilíndrica e apresenta naturalmente uma arquitetura entrelaçada e altamente porosa. Essas características conferem a esse material vantagens como suporte de imobilização (POÇAS et al., 2004).

A *L. cylindrica* já foi utilizada em vários experimentos. Vignoli et. al (2006) aplicou *L. cylindrica* na imobilização de *Zymomonas mobilis* para a produção de sorbitol e de *Saccharomyces cerevisiae* (OGBONNA et al., 2001), para produção do etanol. Pekdemir et al., (2003) mostrou que a *Luffa cylindrica* também é muito eficiente como material suporte para imobilização da *Thiobacillus ferrooxidans* no tratamento de águas residuárias industriais com elevados teor de ferro, enquanto Akhar et al., (2003) operou um sistema para a remoção de níquel a partir da imobilização de *Chlorella sorokinian* usando o mesmo material suporte.

3.4 HIDRODINÂMICA DE REATORES

Um aspecto a ser considerado a fim de garantir uma eficiência de reatores é o conhecimento do seu comportamento hidrodinâmico. Sua importância se dá pela sua possível influência sobre a velocidade das reações biológicas, através de alterações na taxa de transferência de massa e a distribuição das reações ao longo do reator. Frente as diferenças de distribuição da biomassa e do encadeamento das reações bioquímicas, as regiões do reator apresentam diferentes comportamentos, em função do tipo de escoamento imposto (CARVALHO et al., 2008).

A partir da escolha de um Reator Anaeróbio-Aeróbio de Leito Fixo (RAALF), para o tratamento de efluentes de matadouro bovino, torna-se fundamental o estudo do comportamento hidrodinâmico para analisar o regime de fluxo e verificar sua relação com a eficiência do tratamento a partir de fatores que podem representar desvios de idealidade, dentre os quais cita-se os caminhos preferenciais, zonas mortas e curto-circuitos.

Através do estudo do comportamento hidrodinâmico de um reator é possível prever os regimes de fluxo (fluxo pistão, fluxo mistura completa ou ambos), além de detectar a presença de anomalias nos processos ocorrentes no interior do reator que reduzem a eficiência do mesmo (DANTAS et al., 2000).

A interpretação dos dados obtidos através do comportamento hidrodinâmico

torna-se mais visível através de sua análise em modelos matemáticos uniparamétricos, nos quais são projetadas curvas de distribuição do tempo de residência (DTR).

A principal aplicação refere-se ao uso dessas curvas no aperfeiçoamento do projeto de unidades de tratamento, reduzindo o volume de zonas mortas, curtos circuitos e caminhos preferenciais, obtendo-se um maior aproveitamento do volume útil do reator (CASTRO, 2010).

Torna-se necessária então a escolha de um método eficiente para determinação do comportamento hidrodinâmico. Um dos métodos empregados é o uso de traçadores que, após aplicados podem traduzir o regime de fluxo do efluente dentro do reator.

A aplicação de traçadores, pelo método de estímulo-resposta, em reatores com recheio filtrante merece atenção especial, uma vez que a natureza dos traçadores pode exercer influência na forma das curvas de distribuição dos Tempos de Detenção Hidráulica (DE NARDI et al., 1999).

O desenvolvimento de modelos hidrodinâmicos que descrevam o comportamento hidráulico dos reatores é essencial para otimizar sua utilização nos diversos ramos da biotecnologia e tratamento de águas residuárias.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 REATOR ANAERÓBIO-AERÓBIO DE LEITO FIXO

O RAALF (figura 1) consistiu de um tubo de PVC de 100 mm de diâmetro, volume total de 6,3 L e volume útil de 4,3 L, com regime de escoamento ascendente e fluxo contínuo, sendo alimentado com auxílio de uma bomba peristáltica modelo Provitec[®] DM 5000. O reator foi dividido em duas zonas de atividade: anaeróbia e aeróbia. A aeração foi feita por compressor de ar, Boyu[®] modelo S2000A, cuja difusão se deu através de uma pedra porosa.

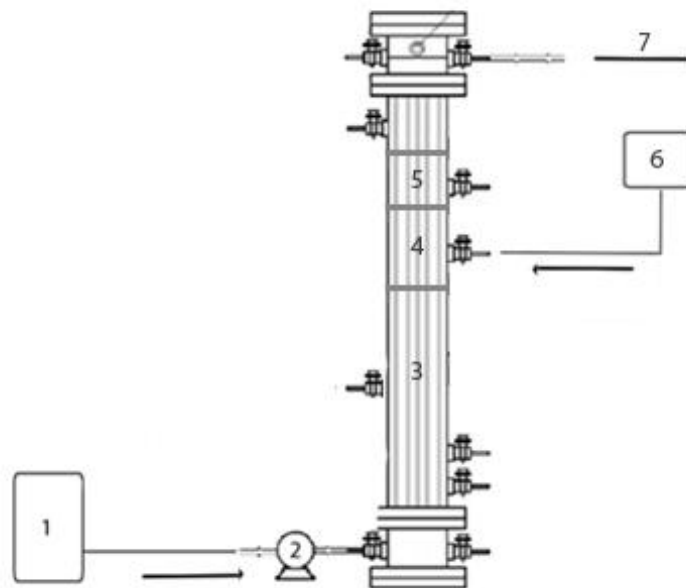


Figura 1 – Representação esquemática do RAALF

Legenda: 1 – Reservatório; 2 – Bomba Peristáltica de alimentação 3 – Zona anaeróbia preenchida com *L. cylindrica*; 4 – Zona de Aeração; 5 – Zona aeróbia preenchida com espuma de poliuretano; 6 – Compressor de ar ; 7 – Saída do efluente tratado

Fonte: Autoria própria (2012)

4.2 SUBSTRATO

O substrato utilizado na alimentação do RAALF foi efluente agroindustrial bruto, coletado após gradeamento, proveniente de abatedouro bovino localizado no município de Campo Mourão – PR.

4.3 MEIO SUPORTE

Para a imobilização da biomassa foi utilizada esponja de celulose - *Luffa cylindrica* (Figura 2A) na parte anaeróbia e espuma de poliuretano na fase aeróbia (figura 2B). Agra (2009) relaciona o uso de *L. cylindrica* com benefícios provenientes do seu uso em reatores, através de características como volume reduzido, superfície porosa e baixo peso.

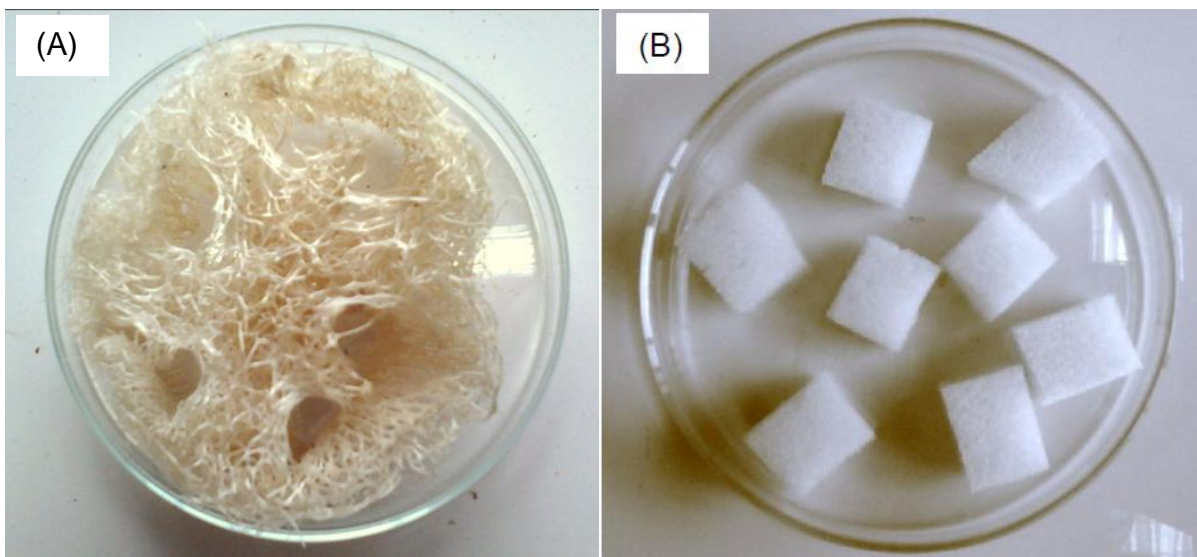


Figura 2 – Meios suporte utilizados para imobilização de biomassa no RAALF. A) *Luffa cylindrica*. B) Espuma de poliuretano.

Fonte: Autoria própria (2013), Adaptado de Kreutz (2012)

4.4 FASE EXPERIMENTAL

Visando melhor aplicação e desenvolvimento do projeto, a fase experimental foi dividida em três etapas – caracterização físico-química afluente e efluente, ensaios hidrodinâmicos e verificação de anomalias.

4.4.1 Caracterização físico-química do afluente e efluente

Visando avaliar o estado de equilíbrio dinâmico aparente do RAALF, primeiramente, foi realizada análise e monitoramento do reator operando em três TDH distintos (22 h, 16 h e 10 h), através da caracterização físico-química do afluente e efluente, realizada pela determinação dos parâmetros descritos na tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros analisados e metodologia empregada na avaliação do estado de equilíbrio dinâmico aparente do RAALF.

Parâmetros	Método de Análise	Método N ^o	Referência
Ácidos voláteis (mgHAc.L ⁻¹)	Titulométrico	-	Dillalo e Albertson (1961)
Alcalinidade (mgCaCO ₃ .L ⁻¹)	Titulométrico	-	Ripley et al. (1986)
Demanda Química de Oxigênio (mg.L ⁻¹)	Espectrofotométrico	5220_D	APHA (2005)
Oxigênio Dissolvido (mg.L ⁻¹)	Polarográfico	4500_O	APHA (2005)
pH	Potenciométrico	4500_H+	APHA (2005)
Sólidos suspensos (mg.L ⁻¹)	Gravimétrico	2540_G	APHA (2005)
Sólidos totais (mg.L ⁻¹)	Gravimétrico	2540_E	APHA (2005)
Temperatura (°C)	Termômetro	-	-

Fonte: A autoria própria (2013)

4.4.2 Ensaio hidrodinâmicos

Posteriormente, foi avaliado o comportamento hidrodinâmico do reator. Para tal, foram realizados, para cada TDH adotado, três ensaios de estímulo-resposta tipo pulso, utilizando-se como traçador azul de bromofenol, escolhido em função de suas características que permitem fácil detecção, elevada recuperação da massa injetada, estabilidade e segurança no manuseio (BRITO E MELO, 1997; DE NARDI et al., 1999; LIMA, 2001).

A solução contendo traçador foi preparada pesando-se 0,2 g de azul de bromofenol, a ser diluído em 4 ml de etanol e preenchido com água destilada até completar o volume de 10 ml. O tempo de injeção foi 10 s. As amostras foram realizadas em intervalos de 45 min e, para análise, foram centrifugadas a 3500 rpm durante 2 minutos (para evitar interferência de sólidos na leitura espectrofotométrica). A leitura (em nm) foi realizada no aparelho Hach® uv-vis DR/5000. O comprimento de onda para o traçador foi 590 nm.

A partir das leituras do traçador nas amostras, os dados passaram por tratamento matemático. Neste tratamento, a leitura em nanômetros era convertida na concentração, em mg.L^{-1} , conforme a equação:

$$C = \left(\frac{\text{Abs} + 0.017}{0.2683} \right)$$

onde:

C = Concentração do traçador (mg.L^{-1})

Abs = Leitura da amostra (em nm)

O tratamento dos dados foi realizado no software Microsoft Excel®, no qual um gráfico foi elaborado envolvendo a concentração do traçador (mg.L^{-1}) pelo tempo (h). Também foram plotadas curvas de distribuição do tempo de residência hidráulica ($E\theta$) em função do tempo adimensional (θ). A variância (σ_θ^2) de cada ensaio foi calculada

após a normalização. O ajuste das curvas experimentais foi realizado com base nos modelos teóricos uniparamétricos de dispersão de pequena intensidade (PD), de grande intensidade (GD) e de tanques em série (N-CSTR) de acordo com Levenspiel (2000), como pode ser visualizado na Tabela 2.

Tabela 2. Modelos uniparamétricos de dispersão utilizados

Modelo	Parâmetro	Equação
Dispersão de pequena intensidade	$\sigma_{\theta}^2 = 2 \left(\frac{D}{\mu L} \right)$	$E_{\theta} = \frac{1}{2 \sqrt{\pi(D/\mu L)}} \exp \left[\frac{(1 - \theta^2)}{4(D/\mu L)} \right]$
Dispersão de grande intensidade (tanque aberto)	$\sigma_{\theta,ta}^2 = 2 \left(\frac{D}{\mu L} \right) + 8 \left(\frac{D}{\mu L} \right)^2$	$E_{\theta} = \frac{1}{2 \sqrt{\pi(D/\mu L)}} \exp \left[\frac{(1 - \theta^2)}{4\theta(D/\mu L)} \right]$
Tanques de mistura completa em série	$N = \frac{1}{\sigma_{\theta}^2} = \frac{\bar{\theta}_h^2}{\sigma^2}$	$E_{\theta} = \frac{N(N\theta)^{N-1}}{(N-1)!} e^{-N\theta}$

Fonte: Levenspiel (2000)

4.5 VERIFICAÇÃO DE ANOMALIAS NO RAALF

O volume de zonas mortas foi calculado de acordo com metodologia reportada por Peña (2006), com base nos valores de TDH teórico e real, este último obtido a partir dos ensaios hidrodinâmicos, e do volume total do reator.

A presença de curtos-circuitos foi verificada pela relação entre o tempo do primeiro aparecimento do traçador no efluente do reator e o TDH teórico de acordo com metodologia adaptada de Sarathai et al (2010).

A eficiência hidráulica reflete o volume efetivo e o número de tanques de mistura completa em série e foi calculada de acordo com Persson et al (1999) e Sarathai et al (2010). As equações necessárias para o cálculo de zonas mortas, curto-circuito e eficiência hidráulica estão descritas na Tabela 3.

Tabela 3 - Equações para determinação da presença de zonas mortas, curtos-circuitos e eficiência hidráulica

	Equações	Significado
Zonas Mortas	$\beta = \frac{TDHr}{TDHt}$ $V_a = V_t \times \beta$ $V_d = V_t - V_a$	<p>β = relação entre o TDH real (h) e o TDH teórico (h);</p> <p>V_a = volume ativo do reator (m^3);</p> <p>V_t = volume total do reator (m^3);</p> <p>V_d = volume de zonas mortas (m^3).</p>
Curtos-Circuitos	$\Psi = \frac{\tau_k}{\tau_r}$	<p>Ψ = Presença de curto-circuitos;</p> <p>τ_k = tempo em que ocorre pico da concentração (h);</p> <p>τ_r = TDH real (h).</p>
Eficiência Hidráulica	$\lambda = V_e \left(1 - \frac{1}{N}\right)$	<p>λ = eficiência hidráulica;</p> <p>V_e = volume efetivo (m^3);</p> <p>N = número de tanques CSTR em série.</p>

Fontes: Peña (2006), Sarathai et al. (2010), Persson et al. (1999)

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DO AFLUENTE E EFLUENTE

A caracterização físico-química do afluente foi determinada através de doze análises – quatro análises por TDH – e apresenta-se de forma resumida na tabela 4.

Tabela 4 – Caracterização físico-química do afluente

Parâmetros	Min	Max	Méd	DP
TL (°C)	22,8	29,1	25,9	4,5
OD (mg.L ⁻¹)	4,5	14,4	9,5	7,0
pH	6,2	7,5	-	-
AB (mgCaCO ₃ .L ⁻¹)	59,1	1191,1	625,1	800,5
AV (mgHAc.L ⁻¹)	0,2	73,1	36,7	51,5
DQO bruta (mg.L ⁻¹)	926,5	4604,5	2766,5	2600,7
DQO filtrada (mg.L ⁻¹)	429	3376,5	1908,2	2084,2
ST (mg.L ⁻¹)	902	10192,2	4896,3	3408,5
SST (mg.L ⁻¹)	19	10192,2	918,8	1106,3

Legenda: Méd: média, Mín: mínimo, Máx: máximo, DP: desvio padrão

Fonte: Autoria própria (2013)

De acordo com a tabela 4, a temperatura variou de 22,8^oC a 29,11^oC. Segundo Campos (1999) a temperatura deveria manter-se superior a 20^oC, caso contrário, reduziria a velocidade do metabolismo dos microrganismos e, conseqüentemente, ocasionaria lenta solubilização dos substratos. O mesmo autor descreve a faixa ótima sendo próxima de 30^oC.

Os valores de pH variaram entre 6,23 e 7,51. Speece (1996) afirma ser satisfatória a variação do pH entre 6,5 e 8,2 para reatores anaeróbios, porém, em determinadas condições, o limite inferior pode chegar a 6 sem interferências no rendimento do reator.

Houve oscilação nos valores de DQO bruta (média de 2766,5 ± 2600,7 mg.L⁻¹) e filtrada (média de 1908,2 ± 2084,2 mg.L⁻¹) devido, possivelmente, a variação na quantidade de bovinos abatidos durante o período de amostragem. Comportamento similar pode ser observado nos valores de sólidos totais (média de 4896,30 ± 3408,5 mg.L⁻¹) e sólidos suspensos totais (média de 918,8 ± 1106,3 mg.L⁻¹). A presença de

sólidos exerceu influência direta na fase experimental, uma vez que altos teores provocavam entupimento da bomba de alimentação, além de ocasionarem a necessidade de centrifugação das amostras que continham traçadores, nos perfis hidrodinâmicos.

As tabelas 5, 6 e 7 apresentam o resumo das análises físico-químicas do afluente e efluente nos TDH's de 22h, 16h e 10h, respectivamente. Para cada TDH foram realizadas quatro baterias de análises.

Tabela 5 – Resultados das análises físico-químicas com o RAALF operando no TDH de 22h

Parâmetros	Afluente				Efluente				E (%)
	Mín	Máx	Méd	DP	Mín	Máx	Méd	DP	
TL (°C)	23,9	27,7	25,9	1,7	22,8	29,1	25,9	2,9	
OD (mg.L ⁻¹)	0,5	3,0	1,3	1,2	4,6	12,5	8,9	3,4	
pH	6,1	6,7	-	-	7,4	7,5	-	-	
AB (mg CaCO ₃ .L ⁻¹)	287,1	448,7	392,1	72,1	59,1	1191,1	377,5	545,9	
AV (mg HAc.L ⁻¹)	42,8	173,6	101,8	54,6	0,2	73,1	40,5	30,5	
DQO bruta (mg.L ⁻¹)	3766,5	4606,5	4105,3	410,0	29,0	149,0	97,1	57,0	97,6
DQO filtrada (mg.L ⁻¹)	429,0	1621,5	1293,4	577,3	34,0	96,5	61,5	26,4	95,2
ST (mg.L ⁻¹)	6118,0	10192,0	7823,0	1724,2	1004,0	1592,0	1189,5	274,8	84,8
SST (mg.L ⁻¹)	410,0	10192,0	2186,3	2057,5	2,0	26,0	15,0	10,4	99,3

Legenda: Méd: média, Mín: mínimo, Máx: máximo, DP: desvio padrão, E: eficiência de remoção

Fonte: Autoria própria (2013)

Tabela 6 – Resultados das análises físico-químicas com o RAALF operando no TDH de 16h

Parâmetros	Afluente				Efluente				E (%)
	Mín	Máx	Méd	DP	Min	Max	Méd	DP	
TL (°C)	27,7	29,0	28,2	0,6	28,1	28,3	28,2	0,1	
OD (mg.L ⁻¹)	0,6	1,1	0,9	0,3	6,4	14,4	10,8	3,7	
pH	6,4	6,9	-	-	6,7	7,0	-	-	
AB (mg CaCO ₃ .L ⁻¹)	107,3	985,1	577,0	360,3	0,0	765,4	244,8	350,9	
AV (mg HAc.L ⁻¹)	144,2	391,2	277,6	107,3	19,2	59,3	40,6	16,4	
DQO bruta (mg.L ⁻¹)	1539,0	4294,0	3236,5	1,292,42	74,0	259,0	154,0	77,9	95,2
DQO filtrada (mg.L ⁻¹)	699,0	3376,5	1971,5	1331,4	71,5	179,0	117,8	48,0	94,0
ST (mg.L ⁻¹)	5080,0	7314,0	5712,0	1070,8	562,0	1028,0	826,5	235,5	85,5
SST (mg.L ⁻¹)	315,0	535,0	421,3	99,6	0,0	42,0	15,5	19,4	96,3

Legenda: Méd: média, Mín: mínimo, Máx: máximo, DP: desvio padrão, E: eficiência de remoção

Fonte: Autoria própria (2013)

Tabela 7 – Resultados das análises físico-químicas com o RAALF operando no TDH de 10h

Parâmetros	Afluente				Efluente				E (%)
	Mín	Máx	Méd	DP	Mín	Máx	Méd	DP	
TL (°C)	23,6	26,5	25,0	1,3	24,2	26,5	25,5	1,1	
OD (mg.L ⁻¹)	0,6	1,5	1,0	0,4	4,5	6,6	5,7	0,9	
pH	6,9	8,3	-	-	6,6	7,0	-	-	
AB (mg CaCO ₃ .L ⁻¹)	0,0	980,4	465,4	401,7	0,0	876,3	238,4	426,1	
AV (mg HAc.L ⁻¹)	68,0	126,1	96,6	27,7	31,7	36,8	33,1	2,5	
DQO bruta (mg.L ⁻¹)	984,6	1059,0	926,5	56,7	96,5	166,5	125,9	30,7	87,2
DQO filtrada (mg.L ⁻¹)	599,0	641,5	556,5	46,3	76,5	156,5	104,6	37,2	82,5
ST (mg.L ⁻¹)	1154,0	1532,0	902,0	275,4	664,0	760,0	700,0	42,4	39,3
SST (mg.L ⁻¹)	19,0	220,0	148,5	90,5	0,0	9,6	3,9	4,1	97,4

Legenda: Méd: média, Mín: mínimo, Máx: máximo, DP: desvio padrão, E: eficiência de remoção
Fonte: Autoria própria (2013)

Conforme mostram as tabelas 5, 6 e 7, com relação ao oxigênio dissolvido, os valores médios afluentes para os três TDH testados (22h, 16h e 10h) foram 1,3, 0,9 e 1,0 respectivamente. A concentração de oxigênio necessária para que ocorresse a degradação da matéria orgânica pelos microrganismos aeróbios foi incrementada, mantendo-se sempre acima de 2 mg.L⁻¹ – para os três TDH testados, os valores médios efluentes foram 4,6, 6,9 e 4,5 mg.L⁻¹ respectivamente. De acordo com Van Haandel e Marais (1999), a concentração mínima de OD para que seja realizada a nitrificação é de 2 mg.L⁻¹. Isso demonstra que a concentração de oxigênio dissolvido foi satisfatória para que os organismos aeróbios estabilizassem a matéria orgânica.

Os valores máximos de pH para o afluente e efluente foram respectivamente 6,7 e 7,5, 6,9 e 7,0 e 8,3 e 7,0 para os TDHs de 22h, 16h e 10h. Observadas estas variações, notou-se uma tendência ao tamponamento pelo RAALF ao efluente.

Conforme Vela (2006), variações na alcalinidade podem indicar instabilidade do processo de digestão anaeróbia, decorrente da predominância da fermentação ácida sobre a fermentação metanogênica. Os valores médios de alcalinidade foram 392,1, 577,0 e 465,4 mg CaCO₃.L⁻¹ para afluente e 377,5, 244,8 e 238,4mg CaCO₃.L⁻¹ para efluente, respectivamente aos três TDH testados (22h, 16h e 10h). Portanto, observa-se a predominância da fermentação ácida sobre a fermentação metanogênica.

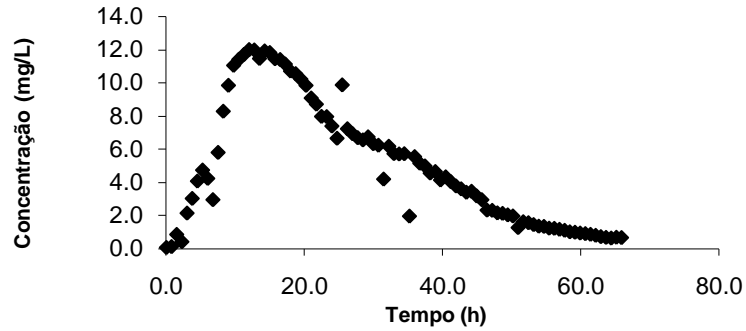
O valor da concentração média de AVT do efluente - 40,5, 40,6 e 33,1 mg HAc.L⁻¹ respectivamente aos três TDH (22h, 16h e 10h) empregado - foi sempre menor que do afluente (101.75, 277.58 e 96.59 mg HAc.L⁻¹ respectivamente aos três TDH empregados), indicando equilíbrio do processo de conversão anaeróbia da matéria orgânica.

As eficiências de remoção de matéria orgânica em termos de DQO de amostras brutas apresentaram altos percentuais, variando de 97,6%, 95,2% e 87,2%, respectivamente, para o TDH de 22h, 16h e 10h. Para a DQO filtrada, os índices de remoção também foram altos, sendo 95,04%, 94,03% e 82,53%, respectivamente ao TDH de 22h, 16h e 10h. Netto (2007) obteve 95% de remoção de matéria orgânica em termos de DQO utilizando reator anaeróbio-aeróbio em três TDH distintos. Já Kreutz (2012), utilizando-se da mesma configuração de reator e mesmo efluente (abatedouro bovino) obteve 59% de remoção de matéria orgânica em termos de DQO de amostras brutas. Porém, a autora utilizou argila expandida e espuma de poliuretano como meio suporte para imobilização de biomassa. Uma vez comparados sistemas com configurações e substratos semelhantes, uma hipótese que pode ser atribuída à boa eficiência de remoção de matéria orgânica no trabalho atual é o meio suporte – *Luffa cylindrica*. Utilizando-se do mesmo material para retenção de microorganismos, Agra (2009) obteve 89% de remoção de matéria orgânica expressa em DQO tratando água residuária doméstica em reator combinado.

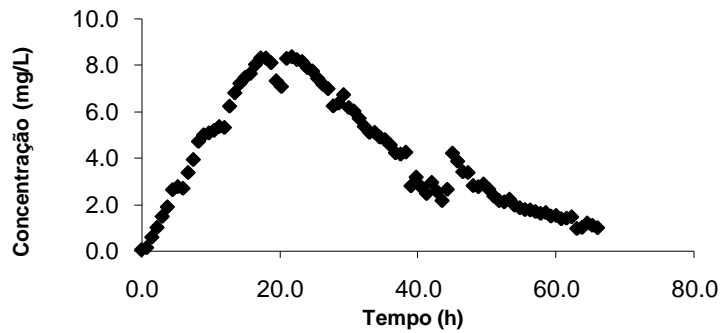
As eficiências de remoção de sólidos totais e sólidos suspensos totais foram 84,8% e 99,3% para o TDH de 22 h, 85,5 e 96,3% para o TDH de 16 h e 39,3% e 97,4% para o TDH de 10 h. Com exceção das análises efetuadas para amostras pertencentes ao TDH de 10 h, os valores de remoção de sólidos mostraram-se efetivamente satisfatórios. O baixo índice de remoção de sólidos totais neste tempo de detenção pode ser atribuído a inconsistências no substrato, bem como uma possível saturação do meio suporte.

5.2 ENSAIOS HIDRODINÂMICOS

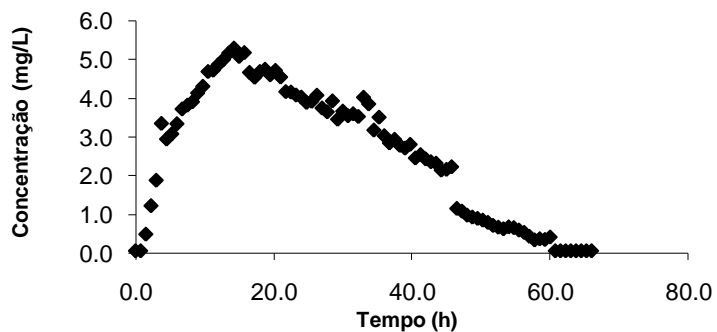
A partir dos resultados obtidos com os ensaios estímulo-resposta e com o ajuste dos parâmetros, foram plotados gráficos de relação tempo *versus* concentração do traçador. As figuras 3, 4 e 5 representam, respectivamente, as curvas de concentração para os TDH de 22h, 16h e 10h.



(a)



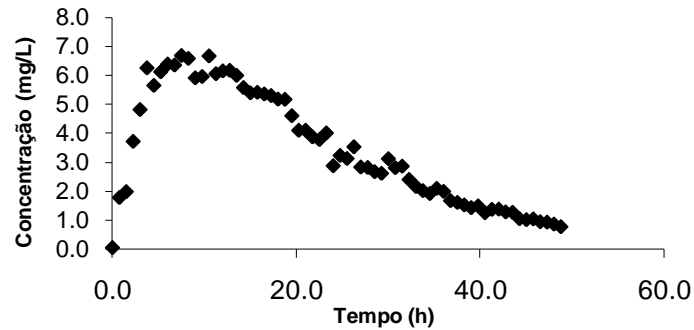
(b)



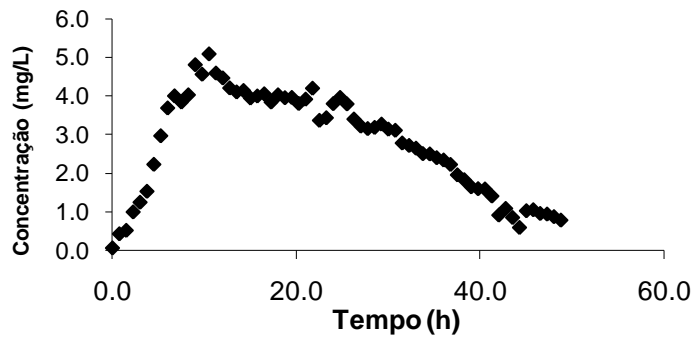
(c)

Figura 3 – Variação da concentração de azul de bromofenol ao longo do tempo nas amostras do efluente para o TDH de 22 horas: (a) ensaio 1; (b) ensaio 2 e (c): ensaio 3.
Fonte: Autoria própria (2013)

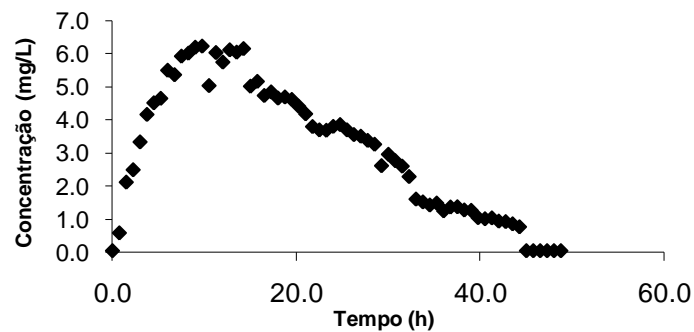
Como pode-se observar, para o TDH de 22h, os picos de concentração do traçador azul de bromofenol foram alcançados em 12h (figura 3a), 17,25h (figura 3b) e 14,25h (figura 3c). Observa-se, portanto, um adiantamento destes picos em relação ao TDH teórico de 45,5% em (a), 21,6% em (b) e 35,2% em (c).



(a)



(b)



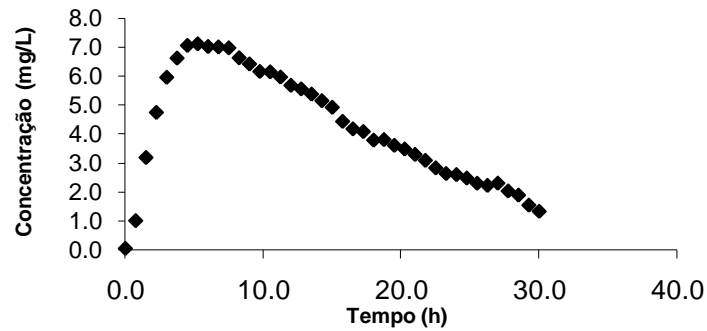
(c)

Figura 4 – Variação da concentração de azul de bromofenol ao longo do tempo nas amostras do efluente para o TDH de 26 horas: (a) ensaio 1; (b) ensaio 2 e (c): ensaio 3.

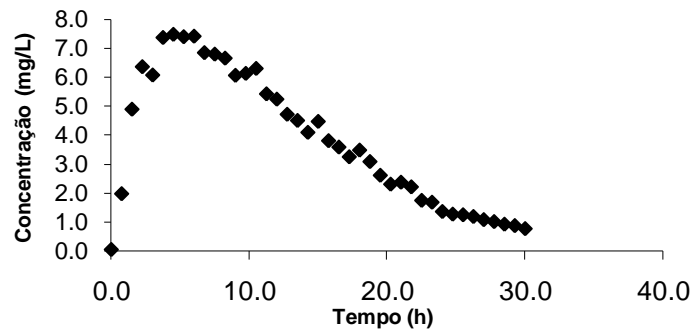
Fonte: Autoria própria (2013)

Conforme a figura 4, os picos de concentração de azul de bromofenol para o

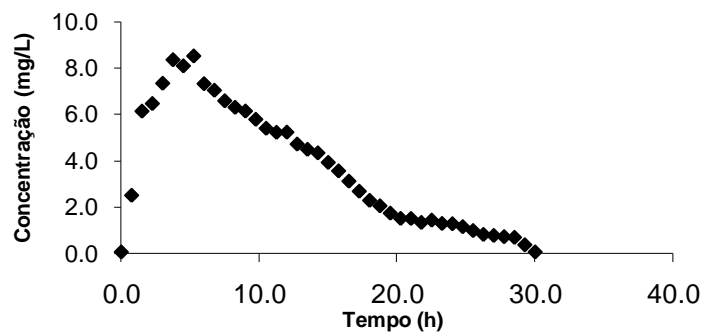
TDH de 16h foram alcançados em 7,5h (figura 4a), 10,5h (figura 4b) e 9,75h (figura 4c). Observa-se, portanto, um adiantamento destes picos em relação ao TDH teórico de 53,1% em (a), 34,4% em (b) e 39,1% em (c).



(a)



(b)



(c)

Figura 5 – Variação da concentração de azul de bromofenol ao longo do tempo nas amostras do efluente para o TDH de 10 horas: (a) ensaio 1; (b) ensaio 2 e (c): ensaio 3.

Fonte: Autoria própria (2013)

Os ensaios com o RAALF operando no TDH de 10h mostram que os picos de concentração do traçador azul de bromofenol foram atingidos em 5,25h (figura 5a), 4,5h (figura 5b) e 5,25h (figura 5c). Observa-se, portanto, um adiantamento destes picos em relação ao TDH teórico de 47,5% em (a) e (c) e 55% em (b).

Observa-se que os picos de concentração do traçador adiantam-se em relação aos TDHs teóricos em todos os ensaios. Isso pode ocorrer devido a uma eventual presença de caminhos preferenciais no interior do RAALF. O lento decréscimo da concentração de azul de bromofenol em função do tempo, resulta no efeito de cauda longa nos gráficos representados nas figuras 3, 4 e 5. Calheiros et al. (2009) também observaram esse efeito utilizando reator anaeróbico sequencial no tratamento de esgoto doméstico, atribuindo o efeito de cauda à ocorrência de zonas mortas que, na ocasião, representaram 3,8% do volume do reator.

Stevens et al. (1986), Jimenez et al. (1988) e De Nardi et al. (1999) atribuíram o efeito de cauda ao processo de difusão do traçador no leito do reator. No trabalho atual, o principal agente sobre o efeito é a adsorção do traçador pelo meio suporte (*L. cylindrica*). Do mesmo modo, Turner (1964) *apud* Souza (2012) também observou a formação de cauda, e atribuiu o fenômeno à existência de zonas mortas e adsorção do traçador, em seus estudos hidrodinâmicos utilizando o traçador cloreto de sódio para analisar a DTR de reator de leito fixo, com esferas de vidro e resina de troca iônica como meio suporte.

Foi realizado o ajuste das curvas de distribuição do tempo de residência pelos modelos matemáticos teóricos, de acordo com Levenspiel (2000) para o TDH de 22, 16 e 10 horas (Tabela 8, 9 e 10).

Tabela 8 - Resultado dos parâmetros obtidos com o ajuste dos dados experimentais para o TDH de 22 horas

Traçador	Ensaio	TDH	TDH real	N-CSTR (N)	PD (D/ μ L)	GD (D/ μ L)
		teórico (h)	(h)			
Azul de bromofenol	1	22	24,2	3	0,159	0,519
	2	22	27,2	3	0,141	0,440
	3	22	25,4	3	0,167	0,529

Legenda: N-CSTR – Número de reatores em série, PD – Pequena dispersão, GD – Grande dispersão
Fonte: Autoria própria (2013)

Tabela 9 - Resultado dos parâmetros obtidos com o ajuste dos dados experimentais para o TDH de 16 horas

Traçador	Ensaio	TDH teórico (h)	TDH real (h)	N-CSTR (N)	PD (D/μL)	GD (D/μL)
Azul de bromofenol	1	16	18,2	2	0,206	0,752
	2	16	21,3	4	0,142	0,447
	3	16	17,8	3	0,170	0,570

Legenda: N-CSTR – Número de reatores em série, PD – Pequena dispersão, GD – Grande dispersão
 Fonte: Autoria própria (2013)

Tabela 10 - Resultado dos parâmetros obtidos com o ajuste dos dados experimentais para o TDH de 10 horas

Traçador	Ensaio	TDH teórico (h)	TDH real (h)	N-CSTR (N)	PD (D/μL)	GD (D/μL)
Azul de bromofenol	1	10	12,6	3	0,176	0,598
	2	10	11,0	2	0,201	0,724
	3	10	10,3	2	0,229	0,878

Legenda: N-CSTR – Número de reatores em série, PD – Pequena dispersão, GD – Grande dispersão
 Fonte: Autoria própria (2013)

Para todos os ensaios, o TDH real mostrou-se maior que o teórico, indicando um atraso na resposta do traçador ao perfil. Os atrasos médios nos perfis de 22 h, 16 h e 10 h foram, respectivamente, de 28%, 20% e 13%. A explicação para estes atrasos reside, basicamente, na adsorção do traçador pelo meio suporte. O traçador teria se difundido em zonas mortas, sendo liberado aos poucos, o que provoca atraso em sua resposta na saída do reator e gera o fenômeno de cauda longa, como foi observado nas curvas experimentais.

Jimenez et al. (1988) e De Nardi et al. (2005) relatam que, em recheios porosos, o líquido contido nos poros do meio suporte atua como volume estagnado. Antes da introdução do traçador no reator, os poros são ocupados somente pelo líquido. À medida em que o traçador, na forma de pulso, passa pelo leito, surge um gradiente de concentração crescente entre o escoamento e o líquido contido nos poros do recheio. Em seguida, findado o pulso, a concentração de traçador no escoamento tende a

diminuir, tornando-se menor que a concentração de traçador nos poros. Então, o gradiente de concentração é invertido, ocorrendo a difusão no sentido contrário, isto é, do traçador no sentido dos poros para o escoamento. Essa situação é detectada pelo decaimento vagaroso da concentração de traçador com o tempo, na curva resposta.

Nas tabelas 11, 12 e 13 estão os resultados dos coeficientes de correlação (R^2) obtidos para os modelos matemáticos teóricos para o TDH de 22, 16 e 10 horas.

Tabela 11 - Resultado dos parâmetros obtidos com o ajuste dos dados experimentais para o TDH de 22 horas

Traçador	Ensaio	TDH teórico (h)	TDH real (h)	N-CSTR (R^2)	PD (R^2)	GD (R^2)
Azul de bromofenol	1	22	24,2	0,964	0,813	0,476
	2	22	27,2	0,980	0,849	0,525
	3	22	25,4	0,955	0,864	0,390

Legenda: N-CSTR – Número de reatores em série, PD – Pequena dispersão, GD – Grande dispersão
Fonte: A autoria própria (2013)

Tabela 12 - Resultado dos parâmetros obtidos com o ajuste dos dados experimentais para o TDH de 16 horas

Traçador	Ensaio	TDH teórico (h)	TDH real (h)	N-CSTR (R^2)	PD (R^2)	GD (R^2)
Azul de bromofenol	1	16	18,2	0,963	0,756	0,196
	2	16	21,3	0,911	0,857	0,518
	3	16	17,8	0,962	0,865	0,388

Legenda: N-CSTR – Número de reatores em série, PD – Pequena dispersão, GD – Grande dispersão
Fonte: A autoria própria (2013)

Tabela 13 - Resultado dos parâmetros obtidos com o ajuste dos dados experimentais para o TDH de 10 horas

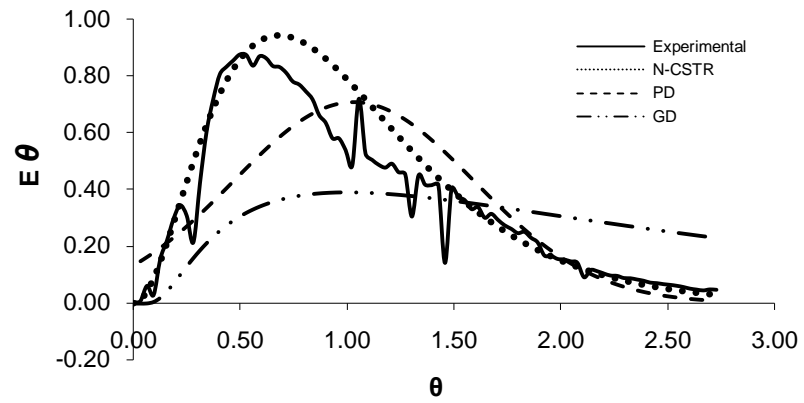
Traçador	Ensaio	TDH teórico (h)	TDH real (h)	N-CSTR (R^2)	PD (R^2)	GD (R^2)
Azul de bromofenol	1	10	12,6	0,946	0,730	0,327
	2	10	11,0	0,967	0,763	0,254
	3	10	10,3	0,974	0,815	0,261

Legenda: N-CSTR – Número de reatores em série, PD – Pequena dispersão, GD – Grande dispersão
Fonte: A autoria própria (2013)

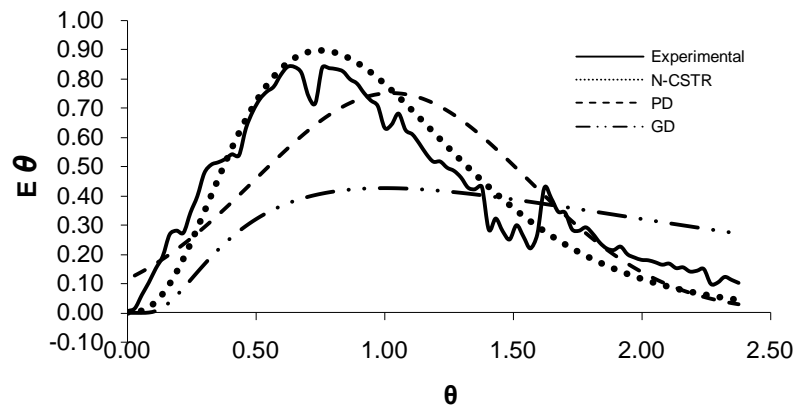
Percebe-se que os TDHs reais são, em todos os ensaios, maiores que o TDH teórico, o que pode indicar a presença de zonas mortas e adsorção do traçador ao meio suporte. Carvalho et al. (2008) também observaram atraso na resposta do traçador em reator UASB com vazão de 16 L.h^{-1} , operando num TDH de 10 h. Os autores encontraram altos percentuais de atraso, com uma média de 50%. Calheiros et al. (2009), ao estudarem um reator anaeróbio sequencial utilizando cloreto de sódio como traçador, também observaram um atraso, de aproximadamente 4%, o que pôde revelar a presença de curto circuitos hidráulicos, responsáveis pelo efeito de cauda longa observado nas curvas experimentais.

Para o TDH de 22h, o modelo N-CSTR estabelece 3 reatores em série. Já para o TDH de 16h o modelo prevê 2, 4 e 3 reatores em série e para o TDH de 10h, 3 e 2 reatores em série (tabela 8).

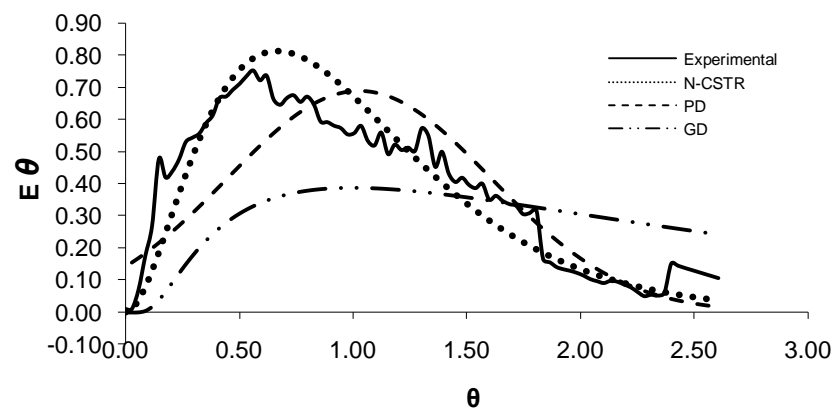
Através do ajuste dos dados experimentais dos ensaios realizados no RAALF, foram obtidas curvas de Distribuição do Tempo de Residência (DTR), para os três diferentes Tempos de Detenção Hidráulicos (TDH), de 22 horas (Figura 6), 16 horas (Figura 7) e 10 horas (Figura 8).



(a)

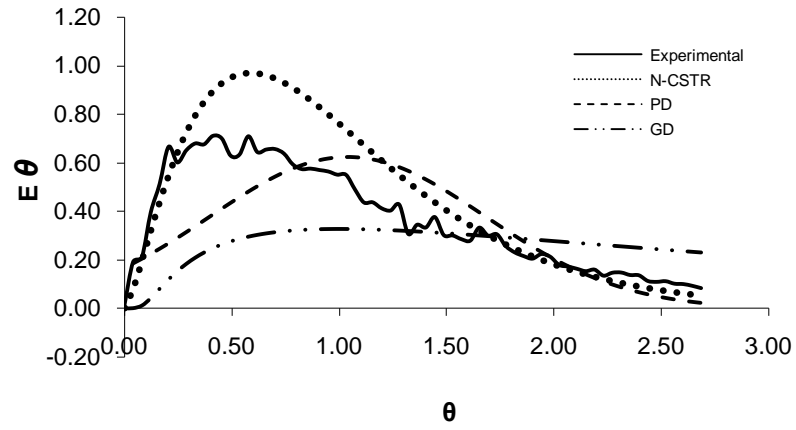


(b)

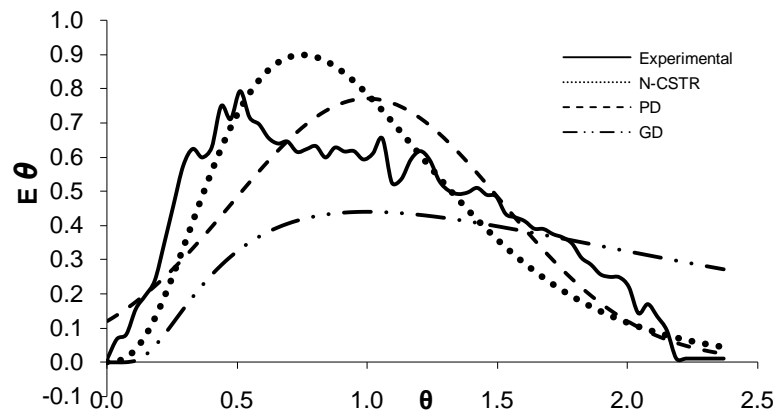


(c)

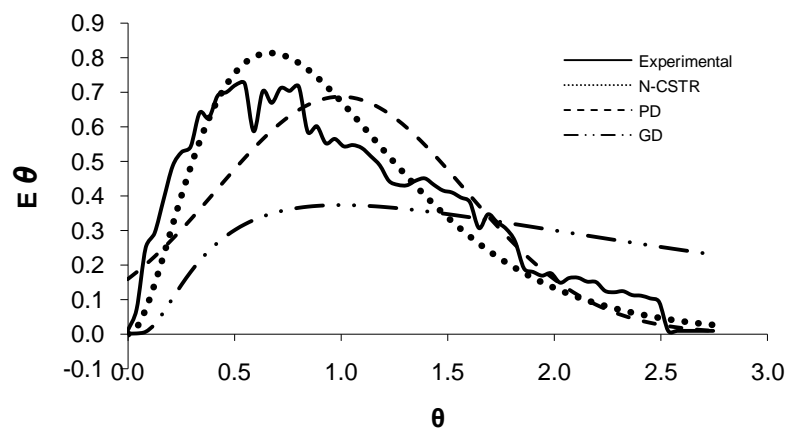
Figura 6 – Curvas de DTR obtidas experimentalmente com azul de bromofenol para o TDH de 22 horas: (a) ensaio 1; (b) ensaio 2; (c) ensaio 3.
 Fonte: Autoria própria (2013)



(a)

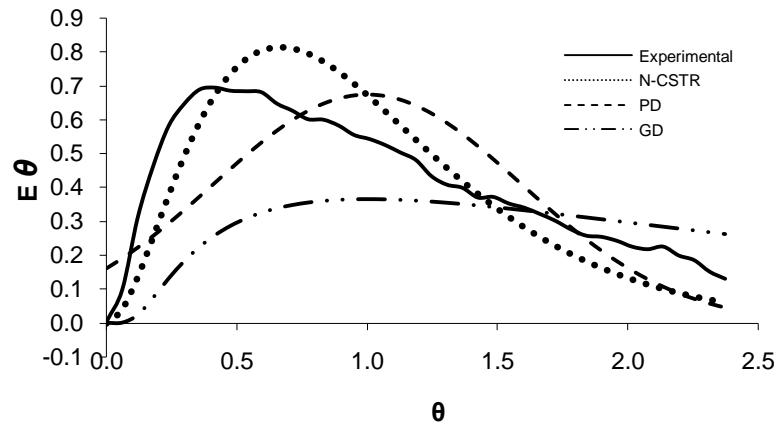


(b)

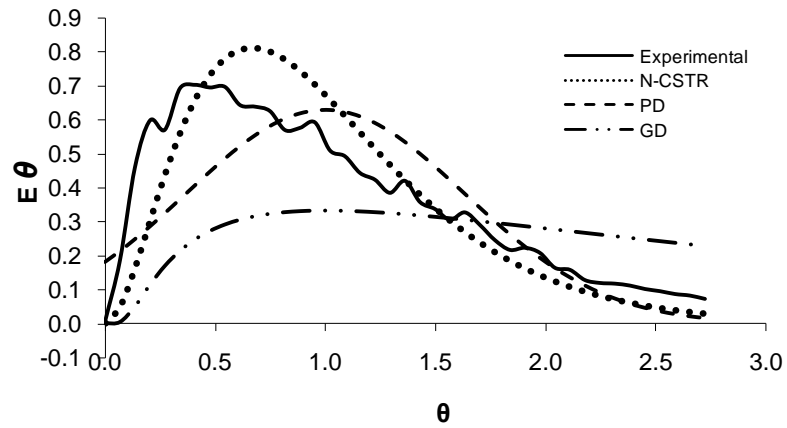


(c)

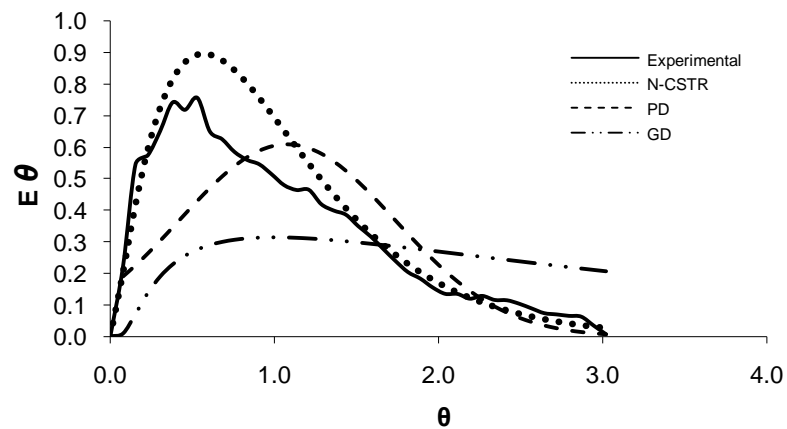
Figura 7 – Curvas de DTR obtidas experimentalmente com azul de bromofenol para o TDH de 16 horas: (a) ensaio 1; (b) ensaio 2; (c) ensaio 3.
 Fonte: Autoria própria (2013)



(a)



(b)



(c)

Figura 8 – Curvas de DTR obtidas experimentalmente com azul de bromofenol para o TDH de 10 horas: (a) ensaio 1; (b) ensaio 2; (c) ensaio 3.
 Fonte: Autoria própria (2013)

Os coeficientes de correlação apresentados nas tabelas 11, 12 e 13 analisados juntamente com os gráficos de distribuição do tempo de residência (figuras 6, 7 e 8) permitem analisar que o RAALF tende a um comportamento de mistura completa (N-CSTR), com índices médios de 0,966 para o TDH de 22h, 0,945 para o TDH de 16h e 0,962 para o TDH de 10h.

Com base nos estudos hidrodinâmicos e através do conhecimento e interpretação dos modelos de dispersão, observou-se que, para todas as etapas o regime de fluxo no interior do RAALF tende a ser de mistura completa, com R^2 médio de 0,952, além de ser notada uma elevada dispersão longitudinal nos parâmetros de $D/\mu L$. Contudo, o modelo de dispersão que mais se enquadra aos resultados experimentais é o de tanques de mistura completa em série (N-CSTR).

O mesmo foi registrado por Sarathai et al. (2010) ao estudarem as características hidráulicas de um reator anaeróbio compartimentado (ABR), tratando esgoto sanitário. O traçador utilizado foi lítio, pelo método de estímulo resposta, tipo pulso. Os resultados dos ensaios hidrodinâmicos indicaram que o ABR tende ao padrão de mistura completa, com 4 tanques em série, quando operado com TDH de 48 h.

5.3 VERIFICAÇÃO DE ANOMALIAS NO RAALF

A verificação de anomalias foi realizada com base nos parâmetros estabelecidos na tabela 3, sendo que os resultados para os cálculos destes encontram-se relacionados nas tabelas 14, 15 e 16.

Tabela 14 - Resultados obtidos no cálculo de anomalias e eficiência hidráulica para o TDH de 22 horas

Ensaio	TDH real (h)	Pico de concentração (h)	Volume de zonas mortas (V_d)	Eficiência hidráulica (λ)	Curto-circuitos (Ψ)
1	24,2	12	-0,6	1,1	0,5
2	27,2	17,25	-3,2	2,8	0,6
3	25,4	14,25	-2,6	2,4	0,6

Fonte: Autoria própria (2013)

Tabela 15 - Resultados obtidos no cálculo de anomalias e eficiência hidráulica para o TDH de 16 horas

Ensaio	TDH real (h)	Pico de concentração (h)	Volume de zonas mortas (V_d)	Eficiência hidráulica (λ)	Curto-circuitos (Ψ)
1	18,2	7,5	-0,9	0,9	0,4
2	21,3	10,5	-2,1	2,3	0,5
3	17,3	9,75	-0,5	1,0	0,6

Fonte: Autoria própria (2013)

Tabela 16 - Resultados obtidos no cálculo de anomalias e eficiência hidráulica para o TDH de 10 horas

Ensaio	TDH real (h)	Pico de concentração (h)	Volume de zonas mortas (V_d)	Eficiência hidráulica (λ)	Curto-circuitos (Ψ)
1	12,6	5,25	-1,6	1,8	0,4
2	11,0	4,5	-0,6	0,8	0,4
3	10,3	5,25	-0,2	0,6	0,5

Fonte: Autoria própria (2013)

Para todos os ensaios, os volumes de zonas mortas foram negativos. Uma vez observado o adiantamento do pico de concentração em todos os ensaios (figuras 3, 4 e 5), era esperada a ocorrência de zonas mortas. Logo, presume-se a que o fluido obteve caminhos preferenciais em seu escoamento. Estes atrasos também não podem ser justificados pela presença de curtos-circuitos, tendo em vista que $\Psi > 0,3$ em todos os ensaios

Observa-se que o TDH real foi maior do que o TDH teórico em todos os ensaios. Tal comportamento é ilustrado através dos efeitos de cauda observados em todos os ensaios, que caracterizam um lento decaimento dos níveis de concentração do traçador. Isso pode ter ocorrido excepcionalmente pela adsorção do traçador no meio suporte. Carvalho et al. (2008) também observaram o lento decaimento de concentração do traçador em função do tempo, atribuindo-o a fenômenos de difusão em zonas mortas do reator, adsorção do traçador na biomassa do reator ou curto circuito hidráulico, trabalhando com Reator UASB de fluxo ascendente utilizando eosina Y como traçador.

Com relação à eficiência hidráulica, 8 dos 9 ensaios obtiveram uma boa eficiência hidráulica ($\lambda > 0,75$), o que não foi observado apenas no último ensaio hidrodinâmico do TDH de 10h.

Resultado similar foi relatado por Borges et al. (2009), estudando o uso de traçadores para avaliação hidrodinâmica em sistemas alagados construídos.

Relacionando os três TDHs adotados, observa-se que em termos de eficiência de remoção de matéria orgânica expressa em DQO, o TDH de 22 horas foi o que apresentou os melhores índices (média de 97,6% para análises de amostras brutas e 95,2% para análises de amostras filtradas).

Em termos de Eficiência hidráulica (λ), os melhores resultados foram obtidos com o RAALF operando no TDH de 22 horas. Nesta ocasião, a eficiência hidráulica média foi de 2,1.

Assim, tanto para eficiência remoção de matéria orgânica em termos de DQO, quanto em termos hidrodinâmicos de eficiência hidráulica, os ensaios que obtiveram os melhores resultados foram os realizados com o RAALF operando no tempo de detenção hidráulica de 22 horas.

6 CONCLUSÕES

O estudo do comportamento hidrodinâmico do RAALF, bem como o monitoramento dos parâmetros físico-químicos do afluente e efluente permitem um conhecimento elementar na busca de melhores aproveitamentos na eficiência do tratamento.

O equilíbrio dinâmico aparente do RAALF foi determinado através de caracterização físico-química afluente e efluente ao reator. Elevadas eficiências (superiores a 85%) de remoção de matéria orgânica em termos de DQO permitiram atribuir ao sistema o estado de equilíbrio dinâmico aparente.

A temperatura não sofreu variações e manteve-se próxima da faixa ótima de atuação microbiana (30°C). Já o pH sofreu pequenos aumentos do afluente ao efluente, caracterizando um efeito de tamponamento do RAALF.

As concentrações de oxigênio dissolvido foram sempre incrementadas, garantindo a presença satisfatória deste parâmetro para processos de oxidação da amônia necessários para que ocorresse nitrificação.

Os valores de alcalinidade sofreram decréscimo, indicando a predominância da fermentação ácida sobre a fermentação metanogênica. Já a concentração de ácidos voláteis sofreu decréscimo no RAALF, indicando equilíbrio do processo de conversão anaeróbia da matéria orgânica

No que diz respeito às remoções de matéria orgânica em termos de DQO (bruta e filtrada), o RAALF apresentou bons resultados, atingindo a média de 93,3% para DQO bruta e 90,5% para DQO filtrada. As remoções de sólidos totais e sólidos suspensos totais também atingiram bons percentuais, com as respectivas médias de 70% e 97,7%.

Com relação aos ensaios hidrodinâmicos, observou-se, em todos os ensaios com azul de bromofenol, um adiantamento no pico da curva de concentração *versus* tempo. Isso é justificado pela ocorrência de caminhos preferenciais.

O efeito de cauda longa denota um lento decaimento na curva de concentração e, conseqüentemente, traduz TDHs reais maiores, em todos os ensaios, do que os TDHs teóricos. Vários autores relataram atrasos similares, e o atribuíram a ocorrência

de zonas mortas e curtos-circuitos no interior de reatores. No estudo atual, conclui-se que esse atraso possivelmente seja dado pela adsorção do traçador ao meio suporte, especificamente à *L. cylindrica*, presente na fase anaeróbia do reator.

Os parâmetros hidrodinâmicos determinados, utilizando azul de bromofenol como traçador, foram: TDH real, coeficientes de correlação à modelos teóricos de dispersão (R^2) e eficiência hidráulica (λ).

Tais parâmetros, normalizados, foram relacionados com o modelo de dispersão mais adequado aos resultados obtidos através dos ensaios. Isso permitiu identificar o tipo de comportamento hidrodinâmico do RAALF, que se encaixou no modelo de mistura completa, uma vez verificadas elevadas dispersões longitudinais nas relações $D/\mu L$. Contudo, as correlações dos modelos de dispersão (R^2) indicam uma maior aproximação do modelo de tanques de mistura completa em série (N-CSTR), com uma média de 3 reatores em série nos perfis pertinentes aos TDH de 22h e 16h e 2 reatores em série ao TDH de 10h.

Também foram estudadas possíveis anomalias no comportamento do RAALF. Os parâmetros analisados foram: volume de zonas mortas e incidência de curtos circuitos. Através dos cálculos para estes parâmetros, foram encontrados volumes negativos para zonas mortas em todos os ensaios, excluindo suas possíveis influências sobre o lento decaimento na curva de concentração do traçador. Também não foram notados curtos-circuitos no reator, uma vez em nenhum ensaio realizado o parâmetro Ψ foi maior que 0,3.

REFERÊNCIAS

ABREU, S.B.; ZAIAT, M. Desempenho de reator anaeróbio-aeróbio de leito fixo no tratamento de esgoto sanitário. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, p. 181-188. 16 abr. 2008.

AGRA, C. de A. **Tratamento de águas residuárias domésticas em reatores de biomassa dispersa e biomassa aderida.**

AKHTAR, N.; IQBAL, J. **Microalgal-luffa sponge immobilized disc: a new efficient biosorbent for the removal of Ni(II) from aqueous solution.** Lett. Appl. Microbiol. 37: 149-153. 2003.

ARAUJO JUNIOR, Moacir M. **Reator combinado anaeróbio-aeróbio de leito fixo para remoção de matéria orgânica e nitrogênio de água residuária de indústria de lisina.** 2006. 160 f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, 2006.

ARRUDA, VALMIR C. M. **Tratamento anaeróbio de efluentes gerados Em matadouros de bovinos.** 2004. 109 f. Tese (Mestrado) – UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO, Recife, 2004.

BORGES, A.C.; MATOS, A. T.; CALIJURI, M.C.; OLIVEIRA, G.H.H.; ROLDÃO, J F. **Uso de traçadores para avaliação da hidrodinâmica de sistemas alagados construídos operando sob condições climáticas tropicais.** Eng. Agríc., Jaboticabal, v.29, n.2, p.301-310, abr./jun. 2009.

CALHEIROS, Herlane C.; PERICO, Ana C. S.; NUNES, Camila F. **Estudo experimental de aspectos hidrodinâmicos e da partida de um reator anaeróbio sequencial tratando esgotos domésticos.** Ambi-Agua, Taubaté, v.4, n. 3, p. 144-156, 2009.

CALLADO, N. H. (2001). **Reatores seqüenciais em batelada em sistemas anaeróbio-aeróbio tratando esgoto sanitário sintético e com remoção de nutrientes.** Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

CAMPOS, J. R. **Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo**. Rio de Janeiro: ABES, 1999. 464 p.

CAPELA, I.; BILÉ, M. J.; SILVA, F.; NADAIS, H.; PRATES, A.; ARROJA, L. **Hydrodynamic behaviour of a full-scale anaerobic contact reactor using residence time distribution technique**. *J Chem Technol Biotechnol* 2009; 84: 716–724

CARVALHO, K.Q.; SALGADO, M.T.; PASSIG, F.H.; PIRES, E.C. Avaliação hidrodinâmica de reator UASB submetido à variação cíclica de vazão. **Engenharia Sanitária e ambiental**. Rio de Janeiro, v.13, n. 2 - abr/jun 2008, p.226-235.

CHERNICHARO, C.A.L. Post-treatment options for the anaerobic treatment of domestic wastewater reviews. (2006). **Environmental Science and Bio/Technology** 5:73-92.

DANTAS, M.A.R.; MELO, H.N.S.; ANDRADE NETO, C.O. Aplicação de traçadores em filtros anaeróbios para avaliação das características hidrodinâmicas. In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 23., 2000, Porto Alegre. **Anais...** Rio de Janeiro, Editora da ABES, 2001.

DE NARDI, IR; ZAIAT, M; FORESTI, E. Influence of the tracer characteristics on hydrodynamic models of packed-bed bioreactors. **Bioprocess Engineering**, v. 21, n.5, p. 469-476, nov. 1999.

DE NARDI, Ivana R.; ZAIAT, Marcelo; FORESTI, Eugenio. **Respostas do reator anaeróbio horizontal de leito fixo (RAHLF) nos ensaios hidrodinâmicos com diferentes traçadores**, 2005. Disponível em: <<http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/abes97/respuesta.pdf>>. Acesso em: março de 2013.

DEL POZO, R.; DIEZ, V. Integrated anaerobic–aerobic fixed-film reactor for slaughterhouse wastewater treatment. **Water Research**, v. 39 n.6, p 1114-1122, mai. 2005.

DOMINGUES, L. M.; NOUR, E. A. A. Estudo hidrodinâmico de um sistema combinado filtro anaeróbio - biofiltro aerado submerso. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 23., 2005, Campo Grande. **Anais...** Rio de Janeiro, Editora da ABES, 2005.

DOS SANTOS, V.A.P.; TRAMPER, J.; WIJFFELS, R.H. Integrated nitrogen removal in compact systems by immobilized microorganisms: new-generation bioreactors. Department of Biotechnology, Institute of Medical Biology, University of Tromsø, Norway. v 4, p. 323-394, jul. 1998.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Brasil. Disponível em <www.ibge.gov.br>, acesso em maio de 2012.

IPCC – International Pollution Prevent and Control. **Reference Document on Best Available Techniques in the Slaughterhouses and Animal By-products Industries.** European Comission, 2005.

GARCÍA, J.; CHIVA, J.; AGUIRRE, P.; ALVAREZ, E.; SIERRA, J.P.; MUJERIEGO, R. **Hydraulic behaviour of horizontal subsurface flow constructed wetlands with different aspect ratio and granular medium size.** Ecological Engineering, Amsterdam, v.23, n.3, p.177-187, 2004

HUYSMAN, P.; MEENEN, P.; ASSCHE, P.; VERSTRAETE, W. **Factors affecting the colonization of non porous packing material in model upflow methane reactors.** Biotechnology Letters, 1983, 5, p.643-648.

JIMENEZ, B.; NOYOLA, A.; CAPDEVILLE, B.; (1988). **Selected Dyes for Residence Time Distribution Evaluation in bioreactors.** *Biotechnology Techniques*, 2:77-82.

KREUTZ,Cristiane. **Comportamento de reator anaeróbio-aeróbio no tratamento de efluente bovino.** Teses... Doutorado – Engenharia Agrícola. UNIOESTE, Cascavel – 2012.

MASSÉ, D.I.; MASSE, L. Characterization of wastewater from hog slaughterhouse in Eastern Canda and evaluation of their in-plant wastewater systems. **Canadian Agricultural Engineering**, v. 42, n.3, p. 139-146. 2000.

NETTO, A.P. de O. **Reator anaeróbio-aeróbio de leito fixo, com recirculação da fase líquida, aplicado ao tratamento de esgoto sanitário.** 2007. 207f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

OGBONNA, J. C.; MASHIMA, H.; TANAKA, H. **Scale up of fuel ethanol production from sugar beet juice using loofa sponge immobilized bioreactor.** Bioresource Technology, Essex, v. 76, n. 1, p. 1-8, 2001.

PACHECO, J.W.; YAMANAKA, H.T. **Guia técnico ambiental de abates (bovino e suíno)**. São Paulo : CETESB, 2006.

PEÑA, Miguel. R.; MARA, D.D.; AVELLA, G.P. (2006). Dispersion and treatment performance analysis of an UASB reactor under different hydraulic loading rates. **Water Research**, v.50, n.3, p. 445-452.

PERSSON J., SOMES N. L. G., WONG T. H. F,(1999). **Hydraulics e_iciency of constructed wetlands and ponds**. *Water Science and Technology*, 40: 291–300

POÇAS, E.C.;BUZATO, J.B. CELLIGOI, M.A.P.C. Otimização na imobilização de invertase em *Luffa cylindrica* para a produção de xarope invertido. In:SEMINÁRIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA ENZIMÁTICA, 6.,2004, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ABEQ, p.49. 2004

RAMOS, Alcinéia de Lemos Souza. **Sistema multimídia para apoio ao monitoramento de resíduos de abatedouros**. 2007. 107 f. Tese (Pós Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2007.

SARATHAI, Yuttachai.; KOOTTATEP, T.; MOREL, A. Hydraulic characteristics of an anaerobic baffled reactor as onside wastewater treatment system. **Journal of Environmental Sciences**, v 22, p. 1319-1326, 2010.

SOUZA, Thaís. H. Y. (2012) **Estudo Hidrodinâmico de Reator Aeróbio-Anóxico de Leito Fixo (RAALF)**. Monografia. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos/SP, 2012. 71p.

SPEECE, R. E. **Anaerobic biotechnology for industrial wastewaters**. Nashville: Archae Press, 1996. 394 p.

Van HAANDEL A.; MARAIS, G. O. Comportamento do sistema de sistema de lodo ativado. Epgraf., Campina Grande-PB, 1999.

STEVENS, D.K.; BERTHOUEX, P.M.; CHAPMAN, T.W. (1986). **The Effect of Tracer Diffusion in Biofilm on Residence Time Distributions**. *Water Research*. 20:369-375.

VELA, Francisco. **Tratamento de esgoto sanitário em reator anaeróbio operado em bateladas seqüenciais e periodicamente aerado**. Teses.. Doutor em Saneamento – Escola de Engenharia de São Carlos. USP, São Carlos, 2006.

VIGNOLI, J. A.; CELLIGOI, M. A. P. C.; SILVA, R. S. F. **Development of a statistical model for sorbitol production by free and immobilized *Zymomonas mobilis* in loofa sponge *Luffa cylindrica***. *Process Biochemistry*, London, v. 41, n. 1, p. 240-243, 2006.

ZAIAT, M. **Desenvolvimento de reator anaeróbio horizontal de leito fixo (RAHLF) para tratamento de águas residuárias**. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 1996.