

Avaliação hidrodinâmica de um reator anaeróbio híbrido (UAHB) submetido à variação senoidal cíclica da vazão afluyente


Hydrodynamic evaluation of an anaerobic hybrid reactor (UAHB) submitted to cyclical sinusoidal influent flowrate variation




- **Data de entrada:**
07/09/2019
- **Data de aprovação:**
05/12/2019

Jayson Pereira Godinho^{1*} | Fernando Hermes Passig² | Eudes José Arantes³ |
Karina Querne de Carvalho² | Aldria Diana Belini²

DOI: <https://doi.org/10.36659/dae.2021.014>

ORCID ID

Godinho JP  <https://orcid.org/0000-0003-2948-8639>
Passig FH  <https://orcid.org/0000-0002-7461-0616>

Arantes EJ  <https://orcid.org/0000-0002-7684-3069>
Carvalho KQ  <https://orcid.org/0000-0003-4577-7537>
Belini AD  <https://orcid.org/0000-0002-0661-9336>

Resumo

Neste trabalho foi avaliado o comportamento hidrodinâmico de um reator anaeróbio híbrido (UAHB) em escala de bancada (22,1 L) submetido a variações senoidais cíclicas em valores superiores e inferiores a 30% da vazão afluyente. A operação do reator foi dividida em etapas com variação da vazão e do Tempo de Detenção Hidráulica (TDH), sendo: etapa I com 1,84 L.h⁻¹ e 12 h, etapa II com 2,76 L.h⁻¹ e 8 h e etapa III com 5,53 L.h⁻¹ e 4 h. O comportamento hidrodinâmico foi avaliado por meio de ensaios de estímulo-resposta tipo pulso, utilizando eosina Y como traçador. Nos ensaios hidrodinâmicos foram verificados adiantamento do pico de concentração do traçador e lento decaimento da concentração (fenômeno de cauda longa). O regime de escoamento no reator foi classificado como de tanques de mistura completa em série (N-CSTR), mesmo com a variação da amplitude da vazão afluyente. Foram observadas zonas mortas apenas na etapa I. Não foi verificada presença de curtos-circuitos hidráulicos e a eficiência hidráulica foi classificada como satisfatória nas etapas de operação.

Palavras-chave: Traçador. Fenômeno de Cauda. Modelos Uniparamétricos. Difusão. Anomalias.

Abstract

This work evaluates the hydrodynamic behavior of an anaerobic hybrid reactor (UAHB) in bench scale (22,1 L) submitted to cyclic sinusoidal variations in values superior and inferior to 30% of the influent flowrate. The operation of the reactor was divided into stages with variation of the flowrate and the Hydraulic Retention Time (HRT), being: stage I with 1.84 L h⁻¹ and 12 h, stage II with 2.76 L h⁻¹ and 8 h and stage III with 5.53 L h⁻¹ and 4 h. The hydrodynamic behavior was evaluated through pulse-type stimulus-response assays using eosin Y as tracer. In the hydrodynamic assays, an advance of the tracer concentration peak and slow tracer concentration decay (long tailing phenomena) were verified. The flow regime in the reactor was classified as N-continuous stirred tank reactors in series (N-CSTR), even with the variation of the amplitude of the influent flowrate. Dead zones were observed only in stage I. No hydraulic short-circuits were present and hydraulic efficiency was classified as satisfactory in the operation stages.

Keywords: Tracer. Tailing phenomena. Uniparametric models. Diffusion. Anomalies.

¹ Universidade Federal do Paraná - Curitiba - Paraná - Brasil.

² Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Curitiba - Paraná - Brasil.

³ Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campos Mourão - Paraná - Brasil.

* **Autor correspondente:** jayson.godinho.eng@gmail.com.

1 INTRODUÇÃO

Dentre os reatores anaeróbios existentes, o reator anaeróbio de fluxo ascendente e manta de lodo (do inglês, *Upflow Anaerobic Sludge Blanket* - UASB) é um dos mais utilizados em estações de tratamento de esgotos sanitários no Brasil. Nesse tipo de unidade, a eficiência média atinge até 70% de remoção de matéria orgânica (em termos de DBO_{5,20}), na maioria dos casos, em condições de rotina operacional em estações de tratamento de esgotos sanitários municipais (ETE) (Foresti et al., 2006).

Devido o reator tipo UASB apresentar algumas limitações, como o arraste de sólidos para o efluente, acúmulo da espuma na região superficial do separador trifásico e também baixa degradação da matéria orgânica (M.O) na região logo abaixo do separador trifásico, se comparado à região inferior do seu leito de lodo denso, alguns autores passaram a modificar construtivamente o reator UASB para atingir maiores eficiências de remoção de matéria orgânica, menor tempo de detenção hidráulica e maiores velocidades ascensionais (Passig e Campos, 2005; Chernicharo, 2007).

Como uma alternativa ao reator UASB, Maxham e Wakamiya (1981) propuseram o reator anaeróbio híbrido (do inglês, *Upflow Anaerobic Hybrid Blanket* - UAHB), sendo este uma variação do reator UASB, composto por uma manta de lodo na parte inferior e um meio suporte para imobilização da biomassa na parte superior.

O meio suporte na parte superior do reator auxilia na retenção do lodo e funciona como um suporte de biofilme microbiano, que acarreta como consequência a elevação da eficiência global do sistema, pois esse recheio funciona como uma zona de “polimento” do efluente, melhorando a estabilidade do sistema e possibilitando a aplicação de velocidades ascensionais maiores do

que as usualmente empregadas nos reatores UASB, e em consequência diminuição do tempo de detenção hidráulico (TDH), que em média para reatores UASB varia de 6 a 8 h (Passig e Campos 2005; Chernicharo, 2007).

Outra vantagem do reator UAHB é a possibilidade de operação com cargas hidráulicas maiores e mais variáveis, se comparado ao reator UASB, pois acentuadas variações da carga hidráulica (como por exemplo, até três vezes o valor da sua vazão afluyente) causam redução da eficiência global do reator, e por isso, devem ser avaliadas para que a estabilidade operacional seja mantida (Foresti et al., 2006; Carvalho et al., 2008).

Segundo Sperling (2007), variações da carga hidráulica e orgânica no afluyente são rotineiras em diversas ETEs, pois elas são consequências das variações de consumo de água durante o dia, na semana, no mês e no ano, sendo que em média 80% da água potável consumida nas residências acaba se tornando esgoto sanitário.

Desse modo, também é importante avaliar a hidrodinâmica do reator UAHB quando submetido a variações de carga hidráulica e orgânica, pois os aspectos hidrodinâmicos influenciam na velocidade das reações biológicas por meio de alterações na taxa de transferência de massa e na distribuição das reações ao longo do reator, acarretando na diminuição do volume útil e do tempo de detenção hidráulica necessários ao desempenho da atividade microbiana no reator (Zaiat e Foresti, 1997; Levenspiel, 2000).

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar o comportamento hidrodinâmico experimental de um reator UAHB em escala de bancada, submetido à variação senoidal cíclica diária da vazão afluyente, típicas de esgotos sanitários.

2 METODOLOGIA

2.1 Aparato experimental

Um reator anaeróbio híbrido (UAHB) em escala de bancada com volume útil de 22,1 L foi cons-

truído em vidro com 1 m de altura e medidas da base de 12,5 cm x 20 cm (Fig. 1).

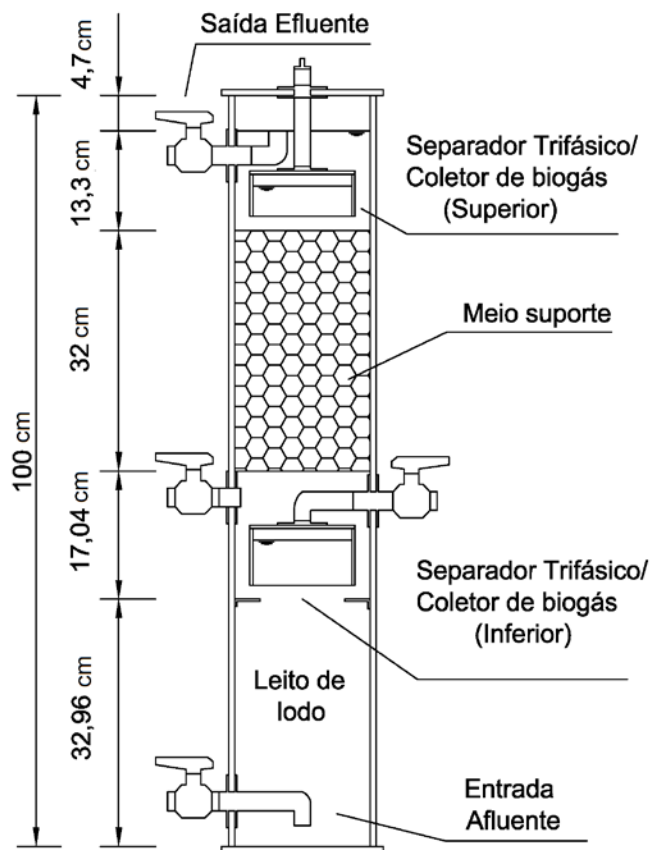


Figura 1 - Esquema do Reator UAHB em escala de bancada.

O meio suporte para aderência do biofilme bacteriano, fixado no compartimento central do reator, é composto de anéis de conduíte corrugado de PVC de 20 mm de diâmetro, 30 mm de lado, 3300 mm² de área superficial, 1,4 g de massa total, 1,40 mL de volume e densidade de 1,4 g mL⁻¹.

O substrato (afluente) utilizado para alimentação do reator UAHB foi esgoto sintético, simulando esgoto sanitário, preparado com as proporções de concentrações adaptadas de Torres (1992).

O afluente era armazenado em um tanque de equalização com capacidade de 310 L e este era conduzido para o reator UAHB por meio de bomba dosadora eletromagnética de diafragma ProMinent, modelo *gamma*, com capacidade de vazão de 7,1 L h⁻¹. A inoculação do reator foi realizada com 6 L de lodo anaeróbio floculento, que ocupou aproximadamente 33% do volume do reator, proveniente de um Reator Anaeróbio de Leito Fluidizado (RALF) que trata os esgotos sanitários de parte do município de Curitiba, PR.

Foi desenvolvido um sistema supervisor de aquisição de dados, utilizando um *software* computacional e uma placa digital/análogica, para monitorar a temperatura do líquido e controlar a vazão afluyente do reator UAHB, si-

mulando variações horárias (Fig. 2), conforme a variação horária afluyente de uma Estação de Tratamento de Esgotos do município de Piracicaba, SP descrita anteriormente por Passig, Vilela e Ferreira (2000).

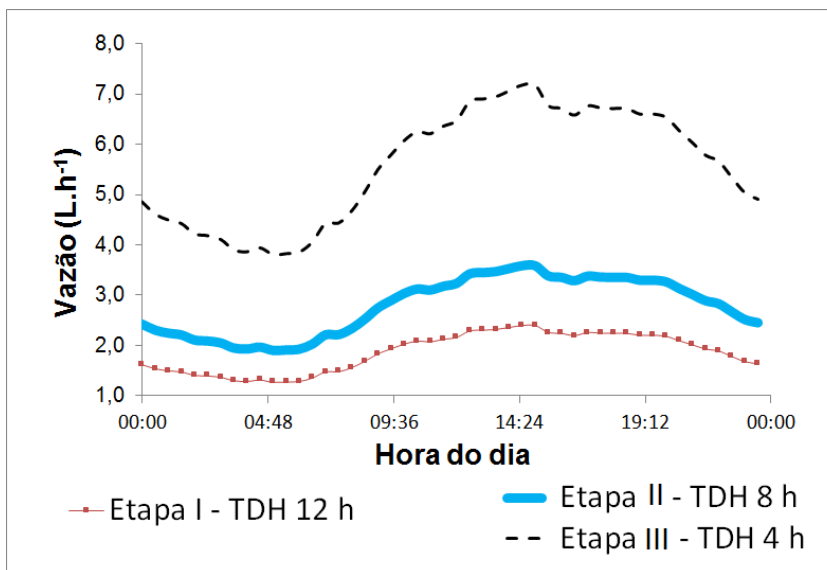


Figura 2 - Variação de vazão afluyente horária do reator UAHB para os TDH de 12 h, 8 h e 4 h.

2.2 Caracterização dos esgotos sanitários e monitoramento do reator

A caracterização dos esgotos sanitários utilizados como substrato para alimentação do reator UAHB foi realizada por meio de análises físicas e químicas, totalizando 6 perfis de amostragem temporal, com coleta de amostras do afluyente e

effluente em intervalos de 3 h durante 24 h. Para as amostras do afluyente foi utilizado um coletor automático da marca ISCO, modelo 6700C. A relação dos parâmetros analisados, metodologia empregada e referências usadas no monitoramento do reator UAHB estão descritas na Tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros analisados, metodologia empregada e referências usadas no monitoramento do reator UAHB.

Parâmetros	Frequência de análises	Método de Análise	Nº do Método	Referência
Temp. do líquido (°C)	Diária	Potenciométrico	-	-
pH	Semanal	Potenciométrico	4500_H+	Eaton et al. (2005)
AB (mgCaCO ₃ L ⁻¹)	Semanal	Titulométrico	-	Ripley et al. (1986)
AV (mgHAc L ⁻¹)	Semanal	Titulométrico	-	Dillalo e Albertson (1961)
DQO (mgO ₂ L ⁻¹)	Semanal	Espectrofotométrico	5220_D	Eaton et al. (2005)
DBO _{5,20} (mgO ₂ L ⁻¹)	Semanal	Respirométrico	5210 D	Eaton et al. (2005)
ST (mg. L ⁻¹)	Semanal	Gravimétrico	2540_B	Eaton et al. (2005)

Legenda: Temp. - Temperatura do líquido; AB - Alcalinidade a Bicarbonato; AV - Ácidos Voláteis; DQO - Demanda Química de Oxigênio (amostras brutas); DBO_{5,20} - Demanda Bioquímica de Oxigênio (amostras brutas); ST - Sólidos Totais.

2.3 Operação do reator

A operação da partida do reator UAHB teve início em batelada, com inoculação do lodo anaeróbio e enchimento com esgoto sintético por período de uma semana, para promover a aclimação da biomassa no interior do reator. Após esse período foi iniciada a alimentação contínua do reator com esgoto sintético com vazão afluyente de $1,84 \text{ L h}^{-1}$ e TDH de 12 h, até atingir o estado de equilíbrio dinâmico aparente (EEDA) no 90º dia de operação, verificado por meio da determinação dos mesmos parâmetros da Tabela 1. Após o alcance do EEDA, o reator foi submetido a variações senoidais cíclicas (Fig. 2) em valores inferiores e superiores a 30% da vazão afluyente, sendo de – etapa I - $1,84 \text{ L h}^{-1}$ (TDH de 12 h), com picos de mínimo e máximo iguais a $1,26 \text{ L h}^{-1}$ e $2,39 \text{ L h}^{-1}$, respectivamente, do 201º ao 226º dia de operação; - etapa II - $2,76 \text{ L h}^{-1}$ (TDH de 8 h), com picos de mínimo e máximo iguais a $1,89 \text{ L h}^{-1}$ e $3,59 \text{ L h}^{-1}$ do 271º ao 285º dia de operação; - etapa III - $5,53 \text{ L h}^{-1}$ (TDH de 4 h), com picos de mínimo e máximo iguais a $3,78 \text{ L h}^{-1}$ e $7,18 \text{ L h}^{-1}$ do 333º ao 345º dia de operação.

A aplicação da variação senoidal com período de 24 h para a amplitude de 30% em relação a cada vazão afluyente foi realizada por programa computacional que alterava percentualmente a vazão afluyente da bomba dosadora em intervalos de 15 min.

2.4 Ensaios hidrodinâmicos

Para avaliar o comportamento hidrodinâmico do reator UAHB foram realizados dois ensaios de estímulo-resposta tipo pulso para cada TDH, utilizando Eosina Y amarela (C20H11Br4Na2O5) como traçador. Esse traçador possui solubilidade em água de $0,1 \text{ g mL}^{-1}$, peso molecular de 691,88 g e comprimento de onda de 516 nm. A solução foi preparada com 0,20 g do traçador em 10 mL de água destilada. Antes de injetar a eosina Y, foi

necessário coletar uma amostra do efluente do reator sem a presença do traçador (branco), que serviu de referência para realização das análises de absorvância das outras amostras pelo espectrofotômetro (HACH® UV-VIS, modelo DR5000).

Após a coleta da amostra foram injetados 10 mL da solução (contendo o traçador), na entrada do reator com auxílio de uma seringa de 15 mL no tempo de aproximadamente 10 s. A coleta das amostras do efluente (20 mL) foi feita em intervalos de 30 min. com um coletor automático da marca Isco, modelo 6700C, com tempo total de ciclo de amostragem de 3 vezes o TDH de cada etapa de operação. As amostras coletadas foram centrifugadas em centrífuga clínica marca CentriBio e modelo 80-2B-15ML durante 2 min a 3500 rpm para evitar a interferência de sólidos na leitura das absorvâncias pelo método colorimétrico.

Para determinar a concentração do traçador nas amostras do efluente foi realizada uma curva analítica da concentração da eosina Y, utilizando o método colorimétrico de leitura de absorvância no comprimento de onda de 516 nm. Após a leitura, os valores foram transferidos para uma planilha eletrônica, para obtenção dos gráficos da variação da concentração do traçador pelo tempo.

De acordo com Levenspiel (2000), foi realizada normalização das curvas experimentais da variação de concentração do traçador ao longo do tempo ($C(t)$), que resultaram em curvas de distribuição do tempo de residência hidráulica (E_{θ}) em função do tempo adimensional (θ). Após a normalização, foi possível calcular a variância para cada ensaio (σ_{θ}^2).

O ajuste das curvas experimentais foi realizado com base nos modelos teóricos uniparamétricos de dispersão de pequena intensidade (PD) e de grande intensidade (GD), que representam um reator tipo tubular ideal e o modelo de tanques de mistura completa em série (N-CSTR) que simula um reator agitado por N tanques agitados

ideais em série (Tabela 2). Esses modelos podem ser verificados por meio do número de Peclet (Pe) para dispersão de pequena intensidade (Pep) e

de grande intensidade (Peg) e também com o número (N) de tanques agitadores ideais em série do modelo N-CSTR.

Tabela 2 - Modelos teóricos uniparamétricos ideais utilizados nos cálculos hidrodinâmicos.

Modelo	Parâmetro	Equação
Dispersão de pequena intensidade (PD)	$Pe_p = \left(\frac{2}{\sigma^2_\theta}\right) = \left(\frac{D}{u.L}\right)^{-1}$	$E_\theta = \frac{1}{\sqrt{4\pi(Pe_p)}} \exp\left[-\frac{Pe_p(1-\theta)^2}{4}\right]$
Dispersão de grande intensidade (GD)	$\sigma^2_\theta = \left(\frac{2}{Pe_g}\right) + \left(\frac{8}{Pe_g^2}\right)$	$E_\theta = \frac{1}{\sqrt{(4\pi\theta/Pe_g)}} \exp\left[-\frac{(1-\theta^2)}{4\theta/Pe_g}\right]$
Tanques de mistura completa em série (N-CSTR)	$N = \frac{1}{\sigma^2_\theta} = \frac{\theta^{-2}_h}{\sigma^2}$	$E_\theta = \frac{N(N.\theta)^{N-1}}{(N-1)!} e^{-N\theta}$

Fonte: Adaptado de Levenspiel (2000).

Em que: Pe_p - Número de Peclet para dispersão de pequena intensidade; Pe_g - Número de Peclet para dispersão de grande intensidade; θ - tempo de residência médio (adimensional); E_θ - Função de distribuição do tempo de residência hidráulica; σ^2 - variância; σ^2_θ - variância (adimensional); N - número de reatores em série; $\frac{D}{u.L}$ - número de dispersão do reator.

O percentual de recuperação de massa do traçador foi calculado de acordo com Kellner et al. (2009), conforme Eq. 1. Segundo Cossio (1993), é necessário chegar a 85% de recuperação da massa do traçador para validar o experimento.

$$RMT = \frac{\sum_{i=2}^n \left(\frac{C_i - C_{i-1}}{2}\right) \times (t_i - t_{i-1}) \times Q_e}{M_0 \times 0,01} \quad (1)$$

Em que: RMT - Recuperação de Massa do Traçador (%); C_i - concentração ($mg L^{-1}$) do traçador no tempo t_i (h); Q_e - vazão efluente ($m^3 h^{-1}$); M_0 - massa do traçador injetada no reator ($mg L^{-1}$); 0,01 - fator percentual.

2.5 Características hidráulicas do reator UAHB

As características hidráulicas verificadas no reator UAHB foram eficiência hidráulica, volume de zonas mortas e presença de curtos-circuitos hidráulicos, conforme equações utilizadas descritas na Tabela 3.

Para determinação da eficiência hidráulica, que reflete o volume efetivo e o número de tanques de mistura completa em série, foi aplicada meto-

dologia descrita por Persson et al. (1999) e Sarathai et al. (2010).

Para o cálculo do volume de zonas mortas foi utilizada metodologia descrita por Peña et al. (2006) e Singh et al. (2006), com base nos valores de TDH teórico e real (h), e do volume ativo e total do reator (m^3).

Para verificar a presença de curtos-circuitos foi utilizada a relação entre o tempo do primeiro aparecimento do traçador no efluente do reator (h) e o TDH teórico (h) de acordo com metodologia adaptada de Sarathai et al. (2010) e Thackston et al. (1987).

De acordo com Sarathai et al. (2010), a presença de curtos-circuitos se dá quando o valor da razão (Ψ) do tempo em que ocorre o pico da concentração do traçador no efluente com o TDH real for menor ou igual a 0,3.

Segundo Persson et al. (1999) e Sarathai et al. (2010), a eficiência hidráulica está relacionada com o volume real do reator e com a condição de reatores de mistura completa em série, sendo: (i) boa para $\lambda > 0,75$; (ii) satisfatória para $0,5 < \lambda < 0,75$ e (iii) insatisfatória para $\lambda \leq 0,5$.

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

Anomalias	Equações	Significado
Zonas Mortas	$\beta = \frac{TDHr}{TDHt}$ $Va = Vt \cdot \beta$ $Vd = Vt - Va$	β = relação entre o TDH real (h) e o TDH teórico (h); Va = volume ativo do reator (m ³); Vt = volume total do reator (m ³); Vd = volume de zonas mortas (m ³).
Curtos-Circuitos	$\Psi = \frac{\tau_k}{\tau_r}$	Ψ = presença de curtos-circuitos; τ_k = tempo em que ocorre pico da concentração (h); τ_r = TDH real (h).
Eficiência Hidráulica	$\lambda = \beta \left(1 - \frac{1}{N} \right)$	λ = eficiência hidráulica; β = relação entre o TDH real (h) e o TDH teórico (h); N = número de tanques CSTR em série.

Fontes: Sarathai et al. (2010); Peña et al. (2006); Thackston et al. (1987); Persson et al. (1999).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Monitoramento do reator UAHB

Na Tabela 4 constam o resumo dos resultados obtidos com o monitoramento realizado no reator UAHB durante os ensaios hidrodinâmicos.

Tabela 4 - Resumo do monitoramento realizado no reator UAHB durante os ensaios hidrodinâmicos.

Parâmetro		12 h			8 h			4 h		
		Afluente	Efluente	%	Afluente	Efluente	%	Afluente	Efluente	%
Temp.	N	-	192	-	-	192	-	-	192	-
	Méd	-	20,7	-	-	21,2	-	-	15,9	-
	DVP	-	0,2	-	-	0,2	-	-	0,2	-
	CV	-	1,0	-	-	1,0	-	-	1,0	-
pH	N	8	16	-	8	16	-	8	16	-
	Méd	6,97	7,12	-	6,97	7,19	-	6,89	6,92	-
	DVP	0,23	0,15	-	0,23	0,10	-	0,28	0,11	-
	CV	3,3	2,1	-	3,3	1,4	-	4,1	1,6	-
AB (mgCaCO ₃ L ⁻¹)	N	8	16	-	8	16	-	8	16	-
	Méd	67	213	-	60	148	-	57	163	-
	DVP	5	14	-	8	20	-	14	21	-
	CV	8	7	-	14	14	-	25	13	-
AV (mgHAc L ⁻¹)	N	8	16	-	8	16	-	8	16	-
	Méd	89	31	-	108	64	-	101	71	-
	DVP	4	2	-	9	9	-	10	6	-
	CV	4	7	-	8	14	-	10	9	-
DQO (mg L ⁻¹)	N	16	32	16	16	32	16	16	32	16
	Méd	756	93	87	760	142	81	793	252	68
	DVP	20	10	1	21	14	1	29	20	2
	CV	3	10	2	3	10	2	4	8	3
DBO _{5,20} (mg L ⁻¹)	N	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	Méd	453	42	91	509	59	89	420	119	73
	DVP	13	2	1	18	3	1	5	6	2
	CV	3	4	1	3	5	1	1	5	1
ST (mg L ⁻¹)	N	8	16	8	8	16	8	8	16	8
	Méd	1585	652	59	1745	738	58	1747	793	53
	DVP	61	119	5	51	84	5	50	66	2
	CV	4	18	9	3	11	8	3	8	5

Legenda: Temp. - Temperatura do líquido (OC); AB - Alcalinidade a Bicarbonato; AV - Ácidos Voláteis; DQO - Demanda Química de Oxigênio (amostras brutas); DBO_{5,20} - Demanda Bioquímica de oxigênio (amostras brutas); ST - Sólidos totais.

Para o TDH de 12 h e 8 h as temperaturas se mantiveram próximas, mas no TDH de 4 h esta foi aproximadamente 5 °C menor que as anteriores, o que pode ter influenciado o processo de digestão anaeróbia de forma a prejudicar a eficiência do sistema quanto à remoção da matéria orgânica (MO). Segundo Gerardi (2006), o processo começa a perder eficiência em temperatura inferior a 20 °C. O pH se manteve na faixa de 6,0 a 8,0 para as três etapas operacionais, e está de acordo com a faixa indicada por Speece (1983) para a digestão anaeróbia.

Foi possível observar que para as três etapas ocorreu aumento da alcalinidade a bicarbonato no efluente, assegurando a capacidade de tamponamento do reator, ou seja, a neutralização dos ácidos graxos voláteis produzidos nas etapas acidogênicas e acetogênicas mesmo frente à diminuição do TDH. Durante a operação do reator foi verificada diminuição da concentração de ácidos voláteis no efluente, com concentração inferior a 200 mgHAc L⁻¹, o que, conforme reportado por Chernicharo (2007), indica condição adequada para processo de digestão anaeróbia.

Em termos de DQO pode-se afirmar que a redução do TDH acarretou a diminuição da eficiência de remoção da MO em amostras brutas em 19%, comparados os TDH de 12 h (87%) e 4 h (68%). Porém, mesmo com essa redução, pode-se afirmar que o reator UAHB se manteve estável e suportou a diminuição do TDH inicial aplicado em três vezes (12 h).

Comportamento similar foi reportado por Stanford e Kato (2003) para TDH 8 h com 70%, Chernicharo e Machado (1998) de 9 h com 80% e Lima et al. (2015) de 10,5 h com 77%, respectivamente, na operação de reatores UAHB.

Em termos de DBO_{5,20}, a eficiência de remoção foi prejudicada pelo aumento da vazão afluyente e diminuição do TDH de 12 h (91%) para 4 h (73%), com redução de aproximadamente 18% (Tabela 4). Mesmo com essa redução, o reator UAHB foi capaz de atender à eficiência mínima de 60% conforme estabelecido na Resolução 430/2011 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (Conama).

Cavalcanti (2005) obteve eficiência de remoção de DBO_{5,20} de 80%, 86%, 87% para TDH de 10 h, 8 h e 6 h, respectivamente; e Passig e Campos (2005) verificaram remoção de 91% na operação de um UAHB com TDH de 6 h.

A eficiência de remoção de sólidos totais (ST) foi de 59% para TDH de 12 h, 58% para TDH de 8 h e 53% para TDH de 4 h, ou seja, redução de apenas 6% em função da redução de 33% do TDH de 12 h para 4 h.

3.2 Hidrodinâmica

As curvas de variação da concentração de eosina Y, em função do tempo, nas amostras coletadas na saída do reator UAHB são apresentadas na Fig. 3.

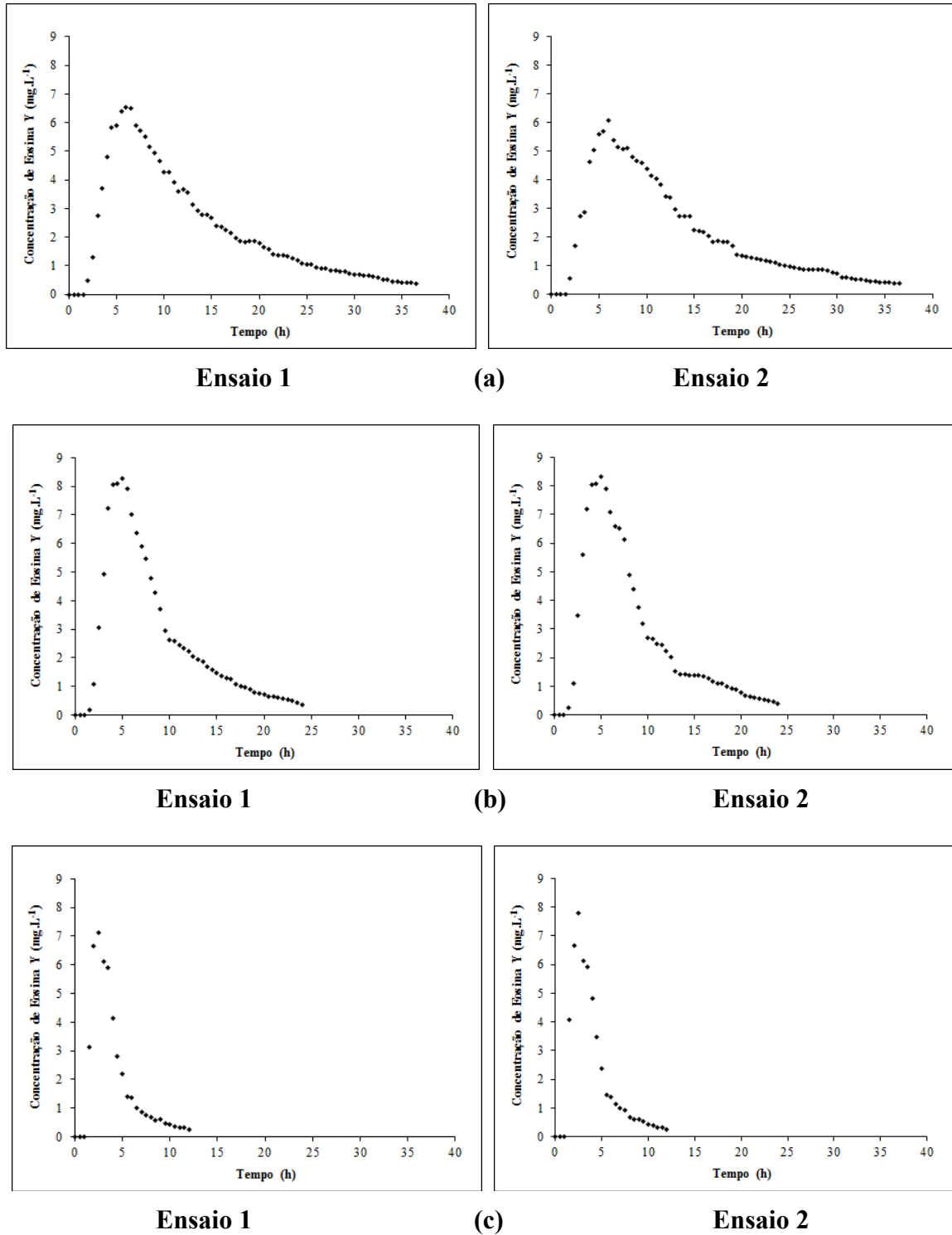


Figura 3 - Variação da concentração de eosina Y ao longo do tempo para os três TDH testados. (a) TDH de 12 h; (b) TDH de 8 h e (c) TDH de 4 h.

Na Fig. 3 é possível observar o efeito de cauda longa em todos os ensaios, devido ao lento decaimento da concentração do traçador ao longo do tempo, o que segundo Levenspiel (2000) pode indicar difusão dos traçadores em zonas mortas do reator ou adsorção dos traçadores na biomassa do reator (lodo floculento). Outros autores também observaram o efeito de cauda longa - Passig (2005); Peña et al. (2006); Carvalho et al. (2008); Sarathai et al. (2010), Freitas et al. (2017) e Godinho et al. (2018).

Passig e Blundi (1996) realizaram ensaios hidrodinâmicos do tipo pulso com rodamina WT como traçador na operação de um reator anaeróbio de leite estruturado abiótico. Os autores também observaram o efeito de cauda longa e atribuíram esse fenômeno à provável existência de recirculação interna no reator, zonas mortas e/ou interações do traçador com o meio suporte.

Quanto maior a extensão da cauda das curvas (Fig. 3), maiores os valores do número de dis-

persão e menores os de Peclet (Tabela 5). Não foi possível observar influência na extensão da cauda no número de tanques (N) do modelo N-CSTR, mas segundo Zaiat, Foresti (1999) o número de tanques de mistura também diminui com o aumento da extensão da cauda nas curvas de concentração do traçador ao longo do tempo.

O pico de concentração da eosina Y (em mg.L⁻¹) para TDH de 12 h foi verificado em 6 h com 6,3 mg.L⁻¹, para o TDH de 8 h foi em 5 h com 8,3 mg.L⁻¹ e para o TDH de 4 h ocorreu em 2,5 h com 7,4 mg.L⁻¹ (Fig. 3).

O modelo N-CSTR (tanques de mistura completa em série) melhor se ajustou aos dados experimentais (curvas) para as três condições hidráulicas distintas (Fig. 4), TDH de 12 h (R² 0,94), 8 h (R² 0,93) e 4 h (R² 0,92), apesar de inicialmente os ensaios não respeitarem suas premissas básicas (D/uL < 0,01 e dispersão idêntica dentro e fora do volume de controle).

Tabela 5 - Resultados obtidos com os ajustes dos dados experimentais dos TDH de 12 h, 8 h e 4 h.

Ensaio	TDH _{teórico} (h)	TDH _{real} (h)	RMT (%)	N-CSTR	Dμ L ⁻¹		Número de Peclet (Pe)		Coeficiente de correlação (R ²)		
					PD	GD	Pe _p	Pe _g	N-CSTR	PD	GD
1	12	12,6	75	3	0,39	0,64	2,56	1,56	0,94	0,71	0,39
2		12,6	69	3	0,39	0,66	2,56	1,52	0,95	0,72	0,40
1	8	8,3	87	3	0,35	0,59	2,86	1,69	0,93	0,72	0,48
2		8,3	89	3	0,35	0,60	2,86	1,66	0,94	0,73	0,48
1	4	3,9	63	3	0,32	0,53	3,13	1,89	0,92	0,76	0,54
2		3,9	68	3	0,32	0,52	3,13	1,92	0,93	0,78	0,55

Legenda: RMT - recuperação de massa da eosina Y ao final dos ensaios, TDH - Tempo de detenção hidráulico, PD - Pequena dispersão, GD - Grande dispersão, Pep- Número de Peclet (pequena dispersão), Peg- Número de Pécllet (grande dispersão).

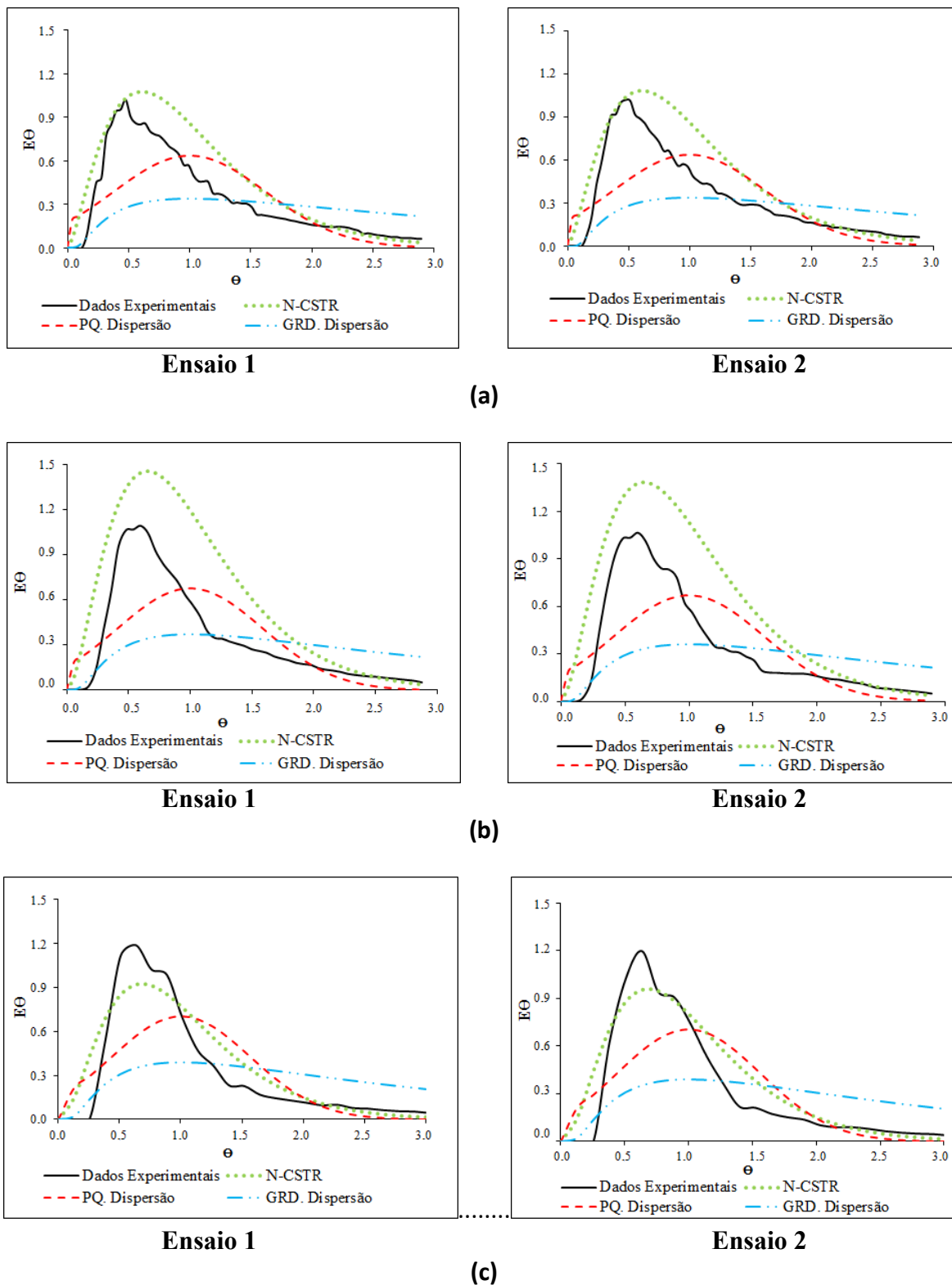


Figura 4 - Curvas de distribuição do tempo de residência para os três TDH médios testados. (a) TDH de 12 h; (b) TDH de 8 h e (c) TDH de 4 h

No ajuste dos dados experimentais pelos modelos teóricos uniparamétricos, foram determinados os números de dispersão dos modelos de dispersão de Grande (GD) e Pequena (PD) intensidade, e os respectivos números de Peclet (Pe_p e Pe_g) e o número (N) de reatores em série para o modelo de Tanques de mistura completa em série (N-CSTR), conforme pode ser verificado na Tabela 5.

Como observado na Tabela 5, foi verificado atraso na resposta do traçador nos ensaios com TDH 12 h e 8 h, acarretando no aumento do TDH real do reator em relação ao teórico estipulado em projeto, com diferenças de 5% e 4%, respectivamente. Por outro lado, adiantamento do TDH real de 2,5% em relação ao TDH teórico de 4 h foi obtido devido ao aumento da vazão afluyente em 50% em relação ao TDH de 8 h.

Os valores médios de massa de traçador recuperada resultaram em 72%, 88% e 65,5% para TDH de 12 h, 8 h e 4 h, respectivamente, ou seja, apenas para TDH de 8 h foi observado valor superior a 85% estabelecido por Cossio (1993) como uma das premissas de validade do ensaio hidrodinâmico.

Com o ajuste dos dados experimentais pelo modelo N-CSTR foram obtidos 3 tanques de

mistura completa em série nas condições operacionais avaliadas. Esses resultados são similares aos reportados por Passig (2005), Carvalho et al. (2008), Freitas et al. (2017) e Godinho et al. (2018).

Como o modelo N-CSTR em série apresentou maior correlação dos dados avaliados, admite-se que o regime de fluxo no interior do reator obedece a esse modelo, mesmo considerando que os escoamentos em reatores biológicos não são ideais em virtude da influência da biomassa no comportamento hidrodinâmico de acordo com Levenspiel (2000).

Na Tabela 6 é possível observar o volume de zonas mortas negativo para TDH de 12 h, indicando presença de caminhos preferenciais no interior do reator de acordo com Peña et al. (2006). O mesmo comportamento também foi verificado por Cruz et al. (2016), Freitas et al. (2017) e Godinho et al. (2018) em reatores anaeróbios e por Cruz et al. (2020) em um estudo hidrodinâmico computacional de Reator UASB em escala de laboratório. Por outro lado, foram determinados volumes de zonas mortas no TDH de 8 h e 4 h, o que pode influenciar no atraso da resposta e no lento decaimento do traçador no efluente do reator.

Tabela 6 - Volume de zonas mortas, curtos-circuitos e eficiência hidráulica para os TDH de 12 h, 8 h e 4 h.

Ensaio	TDH _{teórico} (h)	TDH _{real} (h)	Pico (h)	Volume de zonas mortas (m ³)	Eficiência Hidráulica (λ)	Curto-Circuito (Ψ)
1	12	12,6	6	-0,001	0,61	0,47
2		12,6	6	-0,001	0,61	0,48
1	8	8,3	5	0,007	0,65	0,72
2		8,3	5	0,007	0,64	0,72
1	4	3,9	2,5	0,015	0,67	1,51
2		3,9	2,5	0,015	0,67	1,52

Não foi observada presença de curtos-circuitos para as condições operacionais avaliadas, pois os valores de Ψ resultaram em 0,48, 0,72 e 1,5

para TDH de 12 h, 8 h e 4 h, respectivamente. De acordo com Sarathai et al. (2010), a presença de curtos-circuitos se dá quando o valor da razão

(Ψ) do tempo em que ocorre o pico da concentração do traçador no efluente com o TDH real for menor ou igual a 0,3.

Segundo o mesmo autor, os curtos-circuitos hidráulicos promovem diminuição da capacidade de distribuição uniforme do traçador ao longo do reator, podendo diminuir sua eficiência e consequentemente comprometer a qualidade do efluente final.

A eficiência hidráulica (λ) resultou em satisfatória de acordo com classificação de Persson et al. (1999) e Sarathai et al. (2010), pois os valores médios resultaram em 0,61, 0,65 e 0,67 para TDH de 12 h, 8 h e 4 h, respectivamente.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados obtidos no desenvolvimento deste trabalho, foi possível verificar que o reator UAHB alcançou o estado de equilíbrio dinâmico aparente (EEDA) ao longo da operação, sendo possível observar produção de alcalinidade a bicarbonato para neutralizar os ácidos voláteis produzidos nas etapas da acidogênese e acetogênese da digestão anaeróbia.

Em relação à hidrodinâmica, observou-se efeito de cauda longa em todas as condições operacionais devido à difusão do traçador nas zonas mortas do reator ou adsorção dos traçadores na biomassa do reator (lodo floculento). O atraso da resposta e o lento decaimento do traçador no efluente do reator resultaram da presença de zonas mortas no reator operado com TDH de 8 h e 4 h.

O regime de escoamento no interior do reator UAHB foi classificado como de tanques de mistura completa em série (N-CSTR), mesmo com a variação da amplitude da vazão afluente.

A eficiência hidráulica resultou em média de 65% e não foram verificados curtos-circuitos para as condições operacionais avaliadas.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às agências brasileiras CNPq (processo 474498/2012-3; processo 474274/2012-8) e Fundação Araucária pela concessão de apoio financeiro, à Capes pela concessão da bolsa de mestrado, à Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) campus Curitiba pela concessão de apoio financeiro (Edital PRO-PPG 07/2015), ao Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental (PPGCTA) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC), ambos da UTFPR, pelo espaço cedido, equipamentos e materiais utilizados.

6 CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Todos os autores contribuíram de forma igualitária.

7 REFERÊNCIAS

- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução CONAMA nº 430**, de 13 de maio de 2011.
- 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**, 13(2), 226-235, 2008. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522008000200013>
- CAVALCANTI, M. P. **Tratamento de esgoto doméstico em reator híbrido de fibra de vidro tipo UASB e filtro anaeróbio para comunidades de pequeno porte**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil, 98 pp. 2005.
- CHERNICHARO, C. A. L. **Anaerobic reactors: biological wastewater treatment Series (volume 4)**. 1a ed., IWA Publishing, London, 184 pp. 2007.
- CHERNICHARO, C.A.L., MACHADO, R.M.G. Feasibility of the UASB/AF system for domestic sewage treatment in developing countries. **Water Science and Technology**, 38(9), 325-332. 1998. [https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(98\)00708-2](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(98)00708-2)
- COSSIO, F.Y. **Lagunas de estabilización: teoría, diseño, evaluación y mantenimiento**. 1a Ed, Ogas/OMS, 421 pp. 1993.
- CRUZ, D. B.; ARANTES, E. J.; CARVALHO, K. Q.; PASSIG, F. H.; KREUTZ, C.; GONCALVES, M. S.; GODINHO, J. P. Estudo Hidrodinâmico Computacional de Reator UASB em Escala de Laboratório. **Revista DAE**, v. 68, nº 227, pp 166-181, edição especial de nov. 2020. <https://doi.org/10.36659/dae.2020.088>

- CRUZ, D. B.; ARANTES, E. J.; CARVALHO, K. Q.; PASSIG, F. H.; KREUTZ, C.; GONCALVES, M. S. Avaliação do comportamento hidrodinâmico de reator anaeróbio de manta de lodo e fluxo ascendente com diferentes configurações do sistema de distribuição do afluyente utilizando fluidodinâmica computacional. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, 21(4), 721-730. 2016. <https://doi.org/10.1590/s1413-41522016127299>
- DILLALO, R.; ALBERTON, O. E. Volatile acids by direct titration. **Journal of Water Pollution Control Federation**, 33(4), 356-365. 1961. <https://www.jstor.org/stable/25034391>
- EATON, A. D.; CLESCERI, L. S.; RICE, E. W.; GREENBERG, A. B. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 21a ed., American Public Health Association, American Water Works Association and Water Environment Federation, Washington, 1600 pp. 2005.
- FORESTI, E.; ZAIAT, M.; VALLERO, M. Anaerobic processes as the core technology for sustainable domestic wastewater treatment: Consolidated applications, new trends, perspectives, and challenges. **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology**. 5(1), 3-19. 2006. <https://doi.org/10.1007/s11157-005-4630-9>
- FREITAS, D. C.; PASSIG, F. H.; KREUTZ, C.; CARVALHO, K. Q.; ARANTES, E. J.; GOMES, S. D. Effect of hydraulic retention time on hydrodynamic behavior of anaerobic-aerobic fixed bed reactor treating cattle slaughterhouse effluent. **Acta Scientiarum. Technology (Online)**, v. 39, p. 469-476, 2017. <https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v39i4.30995>
- GERARDI, M. H. **Wastewater Bacteria - Série Wastewater Microbiology**. 1a ed. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc, 272 pp. 2006.
- GODINHO, J. P.; ARANTES, E. J.; CARVALHO, K. Q.; PASSIG, F. H.; KREUTZ, C.; NAGALLI, A.; SILVA, M. S. A. Comportamento dinâmico e hidrodinâmico de reator tipo UASB submetido à variação de carga hidráulica. **Revista DAE**, v. 66, nº 209, pp 84-98, 2018. <http://doi.editoracubo.com.br/10.4322/dae.2017.017>
- KELLNER, E.; MOREIRA, J. F. V.; PIRES, E. C. Influência da estratificação térmica no volume útil e no comportamento hidrodinâmico de lagoa de estabilização: determinação experimental e teórica. **Engenharia Sanitária e Ambiental**. 14(1), 129-138. 2009. <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-41522009000100014>
- LEVENSPIEL, O. **Engenharia das Reações Químicas**. 3a ed., Edgard Blücher Ltda, São Paulo, 584 pp. 2000.
- LIMA, D. A.; SOUSA, J. T.; LIMA, J. F.; SOUSA, T. A. T.; HENRIQUE, I. N. Tratamento de esgotos domésticos em reator anaeróbio híbrido seguido de reator com algas imobilizadas. **Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales**. 8(2), 270-285. 2015. <http://dx.doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2015.8.3.51643>
- MAXHAM, J.V.; WAKAMIYA, W. Innovative biological wastewater treatment technologies applied to the treatment for biomass gasification wastewater. **Proceedings of 35th Industrial waste conference**, Purdue University, West Lafayette, Indiana, EUA. 1981.
- PASSIG, F. H. **Reator anaeróbio híbrido para tratamento de esgoto sanitário**. Tese, Doutorado em Programa de pós-graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil, 171 pp. 2005.
- PASSIG F. H.; VILLELA L. H.; FERREIRA O. P. Piracicamirim sewage treatment plant - conception utilizing anaerobic process followed by aerobic process - evaluation of operational conditions and compatibility of processes. In: VI Oficina e Seminário Latino-Americano de Digestão Anaeróbia, 2000, Recife/PE. 2000. **Anais...**
- PASSIG, F. H.; BLUNDI, C. E. Caracterização hidrodinâmica de um filtro anaeróbio de fluxo ascendente. In: 25º Congresso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, México, 1996. **Anais...** Acesso em 07 de setembro de 2019, disponível em: <<http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/aresidua/mexico/01180i04.pdf>>.
- PASSIG, F. H.; CAMPOS, J. R. Hybrid Anaerobic Reactor for Domestic Sewage Treatment. **Water and Environmental Management Series**, 8(1). 380-395. 2005.
- PEÑA, M. R.; MARA, D. D.; AVELLA, G. P. Dispersion and treatment performance analysis of an UASB reactor under different hydraulic loading rates. **Water Research**, 50(3), 445-452. 2006. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.11.021>
- PERSSON J.; SOMES N. L. G.; WONG T.H. F. Hydraulics efficiency of constructed wetlands and ponds. **Water Science and Technology**. 40(3), 291-300. 1999. [https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(99\)00448-5](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(99)00448-5)
- RIPLEY, L. E.; BOYLE, W. C.; CONVERSE, J. C. Improved alkalimetric monitoring for anaerobic digestion of high-strength wastes. **Journal Water Pollution Control Federation**, 58(5), 406-411. 1996. <https://www.jstor.org/stable/25042933>
- SARATHAI, T.; KOOTTATEP, T.; MOREL, A. Hydraulic characteristics of an anaerobic baffled reactor as onsite wastewater treatment system. **Journal of Environmental Science**, 22(9), 1319-1326. 2010. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(09\)60257-6](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(09)60257-6)
- SINGH, K. S.; VIRAGHAVAN, T.; BHATTACHARRYA, D. Sludge Blanket Height and Flow Pattern in UASB Reactor: Temperature Effects. **Journal Environmental and Engineering**, 132(8), 895-900. 2006. [https://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)-0733-9372\(2006\)132%3A8\(895\)](https://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)-0733-9372(2006)132%3A8(895))
- SPEECE, R. E. Anaerobic biotechnology for industrial wastewater treatment. **Environmental Science & Technology**, 17(9), 416A-427A, 1 set. 1983. <https://doi.org/10.1021/es00115a001>
- SPERLING, M. V. **Basic principles of wastewater treatment: biological wastewater treatment series** (Volume 2). 1a ed., v. 2, IWA Publishing, London, 200 pp. 2007.
- SPERLING, M. V. **Urban wastewater treatment in Brazil**. Technical Note nº IDB-TN-970. 2016.

STANFORD, M. P. A.; KATO, M. Comparação de reatores UASB e Híbrido tratando esgoto sanitário. 22º Congresso de Engenharia Sanitária e Ambiental (ABES), Joinville, Santa Catarina, Brasil. 2003. **Anais...**

THACKSTON, E. L.; SHIELDS, F. D. J; SCHROEDER P. R. Residence time distributions of shallow basins. **Journal of Environmental Engineering**. 116(6), 1319–1332. 1987. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(1987\)113:6\(1319\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(1987)113:6(1319))

TORRES, P. **Desempenho de um Reator Anaeróbio de Manta de Lodo (UASB) de Bancada no Tratamento de Substrato Sintético Simulando Esgotos Sanitários**. Dissertação (Mestrado em hidráulica e saneamento), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil, 185 pp. 1992.

ZAIAT, M.; FORESTI, E. Method for estimating the kinetics of substrate degradation in horizontal-flow anaerobic immobilized sludge reactors. **Biotechnology Techniques**. 11(5), 315–318. 1997. <https://doi.org/10.1023/A:1018419412229>