



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA FRONTEIRA SUL
CAMPUS CERRO LARGO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL**

DJONATHAN LUIZ GIORDANI LENZ

**AVALIAÇÃO DA NÃO IDEALIDADE DE BIORREATORES TIPO LAGOA COM
INSERÇÃO DE CHICANAS**

**CERRO LARGO
2016**

DJONATHAN LUIZ GIORDANI LENZ

**AVALIAÇÃO DA NÃO IDEALIDADE DE BIORREACTORES TIPO LAGOA COM
INSERÇÃO DE CHICANAS**

Trabalho de conclusão de curso de
graduação apresentado como requisito para
obtenção de grau de Bacharel em
Engenharia Ambiental da Universidade
Federal da Fronteira Sul

Orientador: Prof. Dr. Bruno München Wenzel

CERRO LARGO

2016

DGI/DGCI - Divisão de Gestão de Conhecimento e Inovação

Lenz, Djonathan Luiz Giordani
Avaliação da Não Idealidade de Biorreatores tipo
Lagoa com Inserção de Chicanas / Djonathan Luiz
Giordani Lenz. -- 2016.
79 f.:il.

Orientador: Bruno München Wenzel.
Trabalho de conclusão de curso (graduação) -
Universidade Federal da Fronteira Sul, Curso de
Engenharia Ambiental , Cerro Largo, RS, 2016.

1. Tratamento de Águas Residuárias. 2. Modelo de
Dispersão. 3. Reatores Não Ideais. 4. Lagoas Anaeróbias.
I. Wenzel, Bruno München, orient. II. Universidade
Federal da Fronteira Sul. III. Título.

DJONATHAN LUIZ GIORDANI LENZ

**AVALIAÇÃO DA NÃO-IDEALIDADE DE BIORREATORES TIPO LAGOA COM
INSERÇÃO DE CHICANAS**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado como requisito para obtenção de grau de Bacharel em Engenharia Ambiental da Universidade Federal da Fronteira Sul

Orientador: Prof. Dr. Bruno München Wenzel

Este trabalho de conclusão de curso foi defendido e aprovado pela banca em:

13 / 12 / 2016

BANCA EXAMINADORA

Bruno M. Wenzel

Prof. Dr. Bruno München Wenzel – UFFS/ Campus Cerro Largo

Fabiano Cassol

Prof. Dr. Fabiano Cassol – UFFS/ Campus Cerro Largo

Fernanda Elis dos Santos

Eng^a. Fernanda Elis dos Santos – UFFS/ Campus Cerro Largo

Dedico este trabalho, primeiramente à minha família, que sempre acreditou e investiu em mim, e ao professor Bruno M. Wenzel pelo auxílio, paciência e incentivo na orientação deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, que me guiou ao longo da vida, não apenas na vida acadêmica, mas em todos os momentos, permitindo a realização deste trabalho, por ter me dado força e saúde para superar as dificuldades.

Agradeço à Universidade Federal da Fronteira Sul, pela oportunidade de realização da Graduação em Engenharia ambiental, que me permite vislumbrar um horizonte superior, assim como pela disponibilização da infraestrutura e materiais para a realização da pesquisa.

Agradeço ao professor orientador Dr. Bruno München Wenzel, pelo apoio, confiança e empenho nas orientações prestadas, tanto na realização do projeto de pesquisa, quanto no trabalho de conclusão de curso.

Agradeço aos professores, técnicos, colegas, e amigos que me acompanharam ao decorrer do curso, me apoiaram e contribuíram para a realização deste trabalho.

Agradeço à minha família, em especial aos meus pais Neivo José Lenz e Morgani Giordani Lenz, pelo apoio e confiança incondicional, que trouxeram força confiança para superar as adversidades.

Agradeço ao acadêmico Marcelo Schorr, voluntário do projeto de pesquisa, por estar sempre disposto a contribuir e aperfeiçoar o trabalho, auxiliando na realização da parte experimental e análise dos dados.

Agradeço à FAPERGS, pelo apoio financeiro concebido, através do financiamento da bolsa de pesquisa de iniciação científica, que permitiu a realização deste estudo.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

“Os investimentos em conhecimento geram os melhores dividendos.” (FRANKLIN, Benjamin)

RESUMO

No contexto brasileiro atual em que apresenta-se um déficit quanto à coleta e tratamento de esgotos é fundamental a implementação de alternativas de baixo custo e simplicidade operacional. A criação intensiva de animais gera efluentes com elevada carga orgânica, resultando em diversos impactos caso não haja o tratamento adequado anterior ao lançamento nos corpos d'água. Em reatores reais, ocorrem diversas anomalias, as quais os modelos não-ideais buscam incorporar, visando uma predição mais condizente com a realidade. A utilização de chicanas em reatores tipo lagoa busca aproximar o comportamento hidrodinâmico ao fluxo de pistão, correspondente ao reator PFR, com vistas a reduzir o volume necessário para uma conversão equivalente. No presente estudo, as corridas experimentais foram realizadas em um protótipo de reator tipo lagoa anaeróbia revestido com geomembrana de PVC de 8 mm, de geometria típica para aplicação no tratamento de dejetos suínos, para tempos de residência correspondentes a 3, 6, 9 e 12 dias, com a utilização de 2 chicanas verticais. Foram aplicadas expressões teóricas para a DTR baseadas no modelo de dispersão, sendo avaliado o poder de predição para cada expressão a partir dos parâmetros obtidos experimentalmente e dos parâmetros ajustados através de otimização não-linear. Os modelos avaliados foram o modelo de dispersão de pequena intensidade, modelo do sistema open-open, modelo do sistema semi-open e modelo do sistema closed-closed. O modelo do sistema open-open considerando os parâmetros obtidos a partir do ajuste não linear foi o que apresentou os melhores coeficientes de determinação ajustados para todas as corridas experimentais. A aplicação do modelo proposto auxilia a um dimensionamento mais preciso de reatores tipo lagoa anaeróbia, ao inserir parâmetros que não são usualmente utilizados. Ignorando-se os efeitos de escala, esta metodologia pode ser aplicada para o projeto de reatores similares.

Palavras-Chave: Lagoa anaeróbia; reatores não-ideais; distribuição de tempos de residência; modelo de dispersão.

ABSTRACT

In the current Brazilian context, in which it presents a deficit as the collection and treatment of sewage, the implementation of low cost and operational simplicity alternatives is critical. The intensive Livestock generates wastewater with high organic load, resulting in several impacts, case there is no previous treatment appropriate to release in water bodies. In real reactors, there are several anomalies, which non-ideal models seek to incorporate, for a more consistent prediction with reality. The use of baffles in pond-type reactors search approach the hydrodynamic behavior to the piston flow, corresponding to PFR reactor, to reduce the volume needed for an equivalent conversion. In the present study, the experimental runs were performed in a prototype anaerobic lagoon reactor coated with 8 mm PVC geomembrane, with a typical geometry for application in the treatment of swine manure, for residence times corresponding to 3, 6, 9 and 12 days, with use of 2 vertical baffles. Theoretical expressions for RTD were applied based on the dispersion model, and the prediction power for each expression was evaluated from the parameters obtained experimentally and from the adjusted parameters through a nonlinear optimization. The models evaluated were the low intensity dispersion model, the open-open system model, the semi-open system model and the closed-closed system model. The open-open system model considering the parameters obtained from the non-linear adjustment was the one that presented the best correlation coefficients adjusted for all the experimental runs. The application of the proposed model assists in a more precise design of anaerobic pond type reactors, when inserting parameters that are not usually used. Ignoring the effects of scale, this methodology can be applied for the design of similar reactors.

Keywords: Anaerobic pond; non-ideal reactors; residence time distribution; dispersion model.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Reator contínuo com injeção de traçador para medidas de DTR.....	23
Figura 2 – Curvas típicas de concentração-tempo para injeção de traçador em pulso	24
Figura 3 – Curvas típicas de concentração-tempo para injeção de traçador em degrau positivo	25
Figura 4 – Identificação de anomalias em um reator tubular real a partir da função DTR.....	29
Figura 5 – Esquema de um reator CSTR com presença de zonas mortas e escoamento preferencial	29
Figura 6 – Sistema open-open	37
Figura 7 – Sistema semi-open.....	37
Figura 8 – Sistema closed-closed	38
Figura 9 – Esquema simplificado de uma lagoa facultativa.....	40
Figura 10 – Desenho esquemático de uma lagoa anaeróbia	41
Figura 11 – Desenho esquemático de uma lagoa de maturação	42
Figura 12 - Estrutura do protótipo (a) com as dimensões e (b) após construído.....	45
Figura 13 – Protótipo de reator tipo lagoa anaeróbia revestido com geomembrana .	45
Figura 14 – Protótipo de reator tipo lagoa anaeróbia com duas chicanas verticais...	46
Figura 15 – Bomba peristáltica DCM-100.	47
Figura 16 – Curva de calibração para o traçador azul de metileno a 665 nm.	48
Figura 17 – Gráfico da função DTR, $E(t)$, para as corridas experimentais realizadas	53
Figura 18 – Gráfico da função DTR normalizada, $E(\Theta)$, para as corridas experimentais realizadas.....	54
Figura 19 – Regressão linear para as propriedades da DTR normalizada em função do tempo de residência de projeto	56
Figura 20 – Gráfico contendo as curvas DTR normalizadas geradas pelos modelos para ajuste dos dados da corrida experimental 1	61
Figura 21 – Gráfico contendo as curvas DTR normalizadas geradas pelos modelos para ajuste dos dados das corridas experimentais 2,3 e 4	62

Figura 22 – Gráfico contendo as curvas DTR normalizadas geradas pelos modelos para ajuste dos dados da corrida experimental 5.....	63
Figura 23 – Gráfico contendo as curvas DTR normalizadas geradas pelos modelos para ajuste dos dados da corrida experimental 6.....	64
Figura 24 – Gráfico contendo as curvas DTR normalizadas geradas pelos modelos para ajuste dos dados da corrida experimental 1.....	66
Figura 25 – Gráfico contendo as curvas DTR normalizadas geradas pelos modelos para ajuste dos dados das corridas experimentais 2,3 e 4	67
Figura 26 – Gráfico contendo as curvas DTR normalizadas geradas pelos modelos para ajuste dos dados da corrida experimental 5.....	69
Figura 27 – Gráfico contendo as curvas DTR normalizadas geradas pelos modelos para ajuste dos dados da corrida experimental 6.....	70
Figura 28 – Correlações entre os parâmetros obtidos a partir do ajuste não-linear para o modelo do sistema open-open e tempo de residência de projeto	73

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Modelos de DTR para configurações de CSTRs em série	32
Quadro 2 – Coeficientes do polinômio para obtenção das raízes da equação 3.24..	51
Quadro 3 – Quadro resumo dos modelos aplicados	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros experimentais e propriedades da função DTR.....	54
Tabela 2 – Parâmetros experimentais e propriedades da função DTR normalizada	55
Tabela 3 – Testes estatísticos para comparação da variância associada a alteração no tempo de residência de projeto do reator com a variância experimental	58
Tabela 4 – Ajuste de parâmetros e coeficientes de determinação para os dados da corrida experimental 1	61
Tabela 5 – Ajuste de parâmetros e coeficientes de determinação para os dados da corridas experimentais 2,3 e 4	62
Tabela 6 – Ajuste de parâmetros e coeficientes de determinação para os dados da corrida experimental 5.....	63
Tabela 7 – Ajuste de parâmetros e coeficientes de determinação para os dados da corrida experimental 6.....	64
Tabela 8 – Ajuste de parâmetros e coeficientes de determinação para os dados da corrida experimental 1	65
Tabela 9 – Ajuste de parâmetros e coeficientes de determinação para os dados da corridas experimentais 2,3 e 4	67
Tabela 10 - Ajuste de parâmetros e coeficientes de determinação para os dados da corrida experimental 5.....	68
Tabela 11 - Ajuste de parâmetros e coeficientes de determinação para os dados da corrida experimental 6.....	70
Tabela 12 – Coeficientes de determinação ajustados para os modelos avaliados ...	71
Tabela 13 – Parâmetros obtidos a partir do ajuste não-linear para o modelo do sistema open-open.....	72

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

C	Concentração
CSTR	Reator agitado de mistura perfeita
D_a	Coeficiente de dispersão
D_b	Largura na base
D_c	Largura aferida ao nível d'água
DBO	Demanda bioquímica de oxigênio
DTR	Distribuição de tempos de residência
$E(t)$	Função de distribuição de tempos de residência
$E(\Theta)$	Função normalizada de distribuição de tempos de residência
F	Fluxo mássico
$F(t)$	Função distribuição de tempos de residência cumulativa
gl	Número de graus de liberdade
H	Altura do reator
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
k	Constante de velocidade da reação
L_b	Comprimento na base
L_c	Comprimento aferido ao nível d'água
N	Massa
np	Número de parâmetros do modelo
nt	Número total de experimentos
OD	Oxigênio dissolvido
Pe	Número de Peclet
PFR	Reator tubular
pH	Potencial hidrogeniônico
PVC	Policloreto de vinila
r	Velocidade de reação
R^2	Coeficiente de determinação

$R^2_{ajustado}$	Coeficiente de determinação ajustado
R_I	Taxa de reciclo
RSS_{mod}	Somatório dos quadrados do resíduo entre o modelo e o dados experimentais
s^3	Assimetria
SS_{exp}	Somatório total dos quadrados
t	Tempo
t_m	Tempo de residência médio
UV	Ultra Violeta
V	Volume do reator
v	Vazão volumétrica
v_0	Vazão volumétrica na entrada
X	Conversão

Letras gregas

α	Parâmetro que relaciona volume útil e volume real do reator
β	Parâmetro de proporção volumétrica entre o reator 1 e o reator 2
τ	Tempo de residência de projeto
σ^2	Variância
θ	Tempo de residência normalizado
\emptyset	Ângulo de inclinação da borda do reator

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	OBJETIVOS.....	20
2.1	OBJETIVO GERAL.....	20
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
3	REFERENCIAL TEÓRICO.....	21
3.1	REATORES CONTÍNUOS IDEAIS.....	21
3.1.1	Reator agitado de mistura perfeita	21
3.1.2	Reator tubular	22
3.2	REATORES CONTÍNUOS NÃO-IDEAIS.....	22
3.2.1	Técnica da distribuição de tempos de residência	23
3.2.1.1	Medidas de determinação da DTR	23
3.2.1.1.1	<i>Perturbação em pulso</i>	<i>24</i>
3.2.1.1.2	<i>Perturbação tipo degrau positivo.....</i>	<i>24</i>
3.2.1.2	Características da DTR	26
3.2.1.2.1	<i>Funções normalizadas</i>	<i>27</i>
3.2.1.2.1	<i>Anomalias.....</i>	<i>28</i>
3.3	MODELOS DE NÃO-IDEALIDADES EM REATORES	29
3.3.1	Modelos sem parâmetros ajustáveis	29
3.3.2	Modelo de tanques em série	30
3.3.3	Modelo de dispersão.....	34
3.3.3.1	Dispersão de pequena intensidade	34
3.3.3.2	Dispersão de grande intensidade.....	35
3.3.3.2.1	<i>Sistema open-open</i>	<i>36</i>
3.3.3.2.2	<i>Sistema semi-open.....</i>	<i>37</i>
3.3.3.2.3	<i>Sistema closed-closed.....</i>	<i>38</i>

3.3.4	Modelos baseados em combinações de reatores ideais	39
3.4	LAGOAS DE ESTABILIZAÇÃO	39
3.4.1	Lagoa facultativa	39
3.4.2	Lagoa anaeróbia	40
3.4.3	Lagoa de maturação	41
3.5	LAGOAS COM CHICANAS	42
4	MATERIAIS E MÉTODOS	44
4.1	MATERIAIS E APARATO EXPERIMENTAL	44
4.2	MÉTODO ANALÍTICO	47
4.3	MODELAGEM DAS NÃO-IDEALIDADES	49
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
5.1	AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS	53
5.1.1	Distribuição de tempos de residência e suas propriedades	53
5.1.2	Análise Estatística	55
5.2	MODELAGEM MATEMÁTICA.....	59
5.2.1	Avaliação dos modelos a partir das propriedades da DTR	60
5.2.2	Avaliação dos modelos a partir de ajuste não-linear dos parâmetros .	65
5.2.3	Determinação do melhor modelo	71
5.2.4	Correlações entre os parâmetros	72
5.3	APLICAÇÃO DO MODELO PARA O DIMENSIONAMENTO DE REATORES	73
6	CONCLUSÕES	75
	REFERÊNCIAS	77

1 INTRODUÇÃO

O Brasil apresenta um grande déficit quanto à questão do esgotamento sanitário, encontrando-se distante de alcançar uma condição considerada satisfatória. Conforme dados do Atlas de Saneamento Básico do IBGE de 2011, em 2008, 55,1% dos municípios apresentavam rede coletora de esgoto, porém com elevadas diferenças regionais. A proporção entre esgoto coletado e esgoto tratado é inferior a 50% nos estados do Acre, Amazonas, Alagoas, Minas Gerais e Rio Grande do Sul e superior a 70% nos estados de Roraima, Rio de Janeiro, Paraná e Distrito Federal.

Tendo em vista que apenas pouco mais da metade dos municípios brasileiros possuem rede coletora de esgoto, e que grande parte deste esgoto coletado não recebe o tratamento adequado antes de seu lançamento em corpos d'água, percebe-se que o sistema de coleta e tratamento de esgotos é insuficiente para atender a demanda, o que acarreta diversas enfermidades e requer elevados investimentos para os respectivos tratamentos.

Quanto à questão de saneamento no meio rural, existem dificuldades adicionais quanto ao acesso à rede de esgoto, devido ao elevado custo para uma menor densidade populacional. Além disso, as criações intensivas de animais geram efluentes com elevadas cargas orgânicas, cujo lançamento em cursos d'água ou no solo, sem tratamento ou com tratamento inadequado, ocasiona desequilíbrios ecológicos, diminuição do oxigênio dissolvido, disseminação de patógenos e contaminação das águas.

Diante do problema exposto, faz-se necessário o investimento na instalação de sistemas simplificados e de baixo custo para a coleta e tratamento de efluentes tanto no meio urbano quanto rural.

O tratamento biológico através de reatores tipo lagoas de estabilização constitui-se de uma boa alternativa para a remoção da matéria orgânica, tanto da DBO solúvel, que não é removida pelos processos meramente físicos, quanto da DBO suspensa, que é parcialmente removida no tratamento primário, mas os sólidos de sedimentabilidade lenta continuam na massa líquida (VON SPERLING, 2005).

Os formatos típicos de lagoas de estabilização utilizados no Brasil são lagoas anaeróbias, lagoas facultativas e lagoas de maturação, sendo implementadas para o

tratamento de efluentes municipais e industriais e para digestão anaeróbia de dejetos animais em áreas rurais.

Para a questão do tratamento do esgoto sanitário, recomenda-se a aplicação em pequena escala de sistemas de baixo custo de implantação e manutenção, além de simplicidade operacional e eficiências adequadas, como o sistema convencional (lagoas de estabilização/anaeróbia), aplicações no solo, tanque séptico mais filtro anaeróbio, reator de manta de lodo e filtro biológico percolador (CHERNICHARO, 2007; VON SPERLING, 2005).

Quanto à questão do tratamento de dejetos suínos, o sistema mais utilizado no Brasil, devido ao baixo custo e facilidade de implantação, é o modelo canadense modificado, que consiste em um tanque (câmara subterrânea) para armazenamento e digestão da biomassa e o gasômetro para armazenamento do biogás (CORTEZ, LORA e GÓMEZ, 2008).

O projeto adequado de um reator requer uma análise criteriosa de diversos parâmetros, como a cinética da reação, a geometria do reator e o comportamento hidrodinâmico do efluente. Os reatores reais usualmente apresentam comportamento distinto do considerado ideal, como é o caso das lagoas anaeróbias, incorrendo na necessidade de adaptações de modelos para reatores ideais ou desenvolvimento de novos modelos que possam prever com uma maior precisão o comportamento destes.

Os dois principais elementos para o dimensionamento de um reator são o balanço material e a cinética do processo. O modelo cinético, para ser válido, deve ser determinado experimentalmente em condições monitoradas e abranger as variáveis que influenciam a cinética da reação. Para o processo de digestão anaeróbia de dejetos suínos, a velocidade específica de crescimento celular segue o modelo de Contois (CHEN, 1983). Quanto ao balanço material, para reatores anaeróbios convencionais, geralmente utilizam-se modelos de reatores ideais.

Em reatores reais, ocorrem diversas anomalias no comportamento hidrodinâmico do efluente, sendo as mais comuns escoamento preferencial, curto-circuito, zonas mortas, zonas estagnantes, e reciclo. Os modelos não ideais buscam incorporar essas anomalias, visando prever o comportamento do fluido no interior do reator com a maior aproximação possível.

O uso de chicanas em lagoas de estabilização vem sendo difundido como uma forma de aproximar o comportamento hidrodinâmico ao limite teórico ideal,

correspondente ao fluxo de pistão, o que gera uma redução no tempo de residência necessário para o atendimento de um determinado grau de tratamento e redução dos custos de implantação, devido ao menor volume necessário (KILANI e OGUNROMBI, 1984; SILVA, JÚNIOR e OLIVEIRA, 2001, CAETANO, 2009).

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho consistiu em avaliar a não idealidade de biorreatores tipo lagoa com inserção de chicanas. Para tanto, utiliza-se a técnica de distribuição de tempos de residência (DTR), através da análise e comparação entre modelos matemáticos e dados experimentais

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos são:

- i. Inserir chicanas em um protótipo de reator tipo lagoa anaeróbia;
- ii. Realizar experimentos utilizando a técnica de injeção do traçador em pulso para diferentes tempos de residência;
- iii. Investigar a influência da inserção de chicanas no comportamento hidrodinâmico do reator;
- iv. Aplicar modelos para a função DTR, utilizando como base o modelo de dispersão;
- v. Determinar dentre as configurações analisadas, o modelo que melhor se aplica a predição das não idealidades do reator.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 REATORES CONTÍNUOS IDEAIS

Reatores são os locais onde reações ocorrem, e reatores ideais são aqueles modelados com base em condições pré-definidas, onde considera-se uma situação hipotética em que o reator obedece com perfeição à todas variáveis estabelecidas. Diversas vezes reatores reais apresentam características próximas aos modelos idealizados, sendo estes passíveis de utilização, com uma precisão adequada, uma aproximação que atenda os critérios estabelecidos pelo engenheiro.

3.1.1 Reator agitado de mistura perfeita

Utilizado principalmente para reações em fase líquida, o reator agitado de mistura perfeita, ou CSTR – Continuous-Stirred Tank Reactor, é operado em regime estacionário e perfeitamente misturado. As variáveis do processo, tais como temperatura e concentração, são idênticas para cada ponto do reator, devido à mistura perfeita.

Partindo do balanço molar para o reator, apresentado na Equação 3.1, e levantando as hipóteses: i) operação em estado estacionário – condições físicas constantes e ii) velocidade de reação idêntica para todos os pontos dentro do reator, deduz-se a equação de projeto do reator, demonstrada pela Equação 3.2 (FOGLER, 2009).

$$F_{A0} - F_A + \int_V r_A dV = \frac{dN_A}{dt} \quad (3.1)$$

$$V = \frac{v_0 C_{A0} - v C_A}{-r_A} \quad (3.2)$$

Onde:

- F = vazão molar da espécie A (MT⁻¹);
- t = tempo (T);
- N = número de mols da espécie A;
- r = taxa de reação da espécie A;

- V = volume requerido do reator (L^3);
- v = vazão volumétrica (L^3T^{-1});
- C = Concentração da espécie A ($mol L^{-3}$ ou ML^{-3})

3.1.2 Reator tubular

Também conhecido como PFR – Plug-Flow Reactor, o reator tubular com escoamento contínuo apresenta características como: i) Regime estacionário; ii) Escoamento empistonado; iii) Taxa de reação e concentrações variáveis ao longo do reator (com exceção à reações de ordem zero); iv) Consumo de reagentes ao longo do reator.

Quando comparado a um reator CSTR, o reator PFR apresenta uma maior conversão por volume, porém seu controle é mais difícil. É aplicado tanto para reações em fase gasosa, como em fase líquida (FOGLER, 2009; WENZEL, 2015).

Partido do balanço molar para o reator, apresentado anteriormente na Equação 3.1, efetuando uma análise em um elemento do volume, obtém-se a Equação 3.3.

$$F_A|_V - F_A|_{V+\Delta V} + r_A dV = 0$$

$$\frac{F_A|_{V+\Delta V} - F_A|_V}{\Delta V} = r_A \quad (3.3)$$

A equação de projeto do reator PFR, demonstrada pela Equação 3.4, é obtida tomando o limite quando $\Delta V \rightarrow 0$

$$\frac{dF_A}{dV} = r_A \quad (3.4)$$

3.2 REATORES CONTÍNUOS NÃO-IDEAIS

Os reatores reais, usualmente, apresentam comportamento distinto do considerado ideal, incorrendo na necessidade de adaptações de modelos para reatores ideais ou desenvolvimento de novos modelos que possam prever com uma maior precisão o comportamento destes.

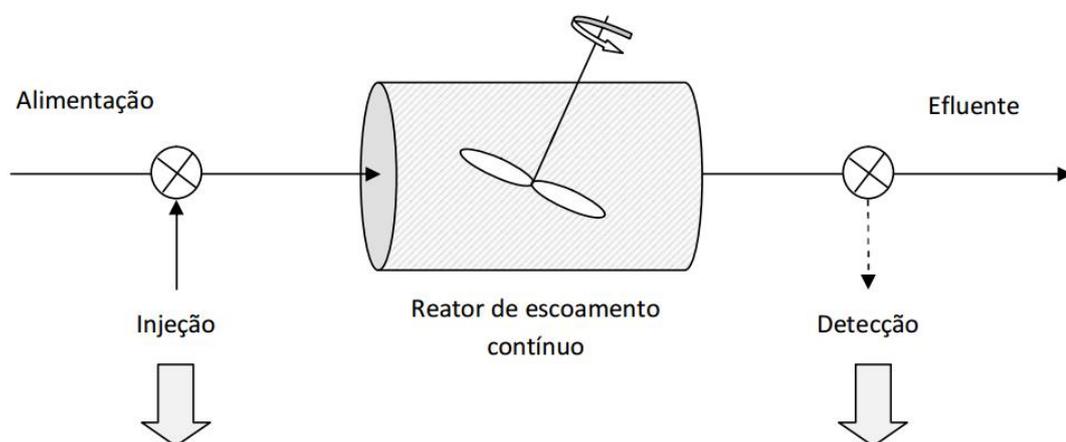
3.2.1 Técnica da distribuição de tempos de residência

A técnica de distribuição de tempos de residência – DTR, é amplamente utilizada para a modelagem de reatores não ideais. Esta técnica descreve quanto tempo os diferentes elementos do fluido permanecem dentro do reator e seu resultado caracteriza o reator, indicando o tipo de mistura que ocorre em seu interior. A DTR é particular para cada reator e varia conforme suas características, como tipo de reator, geometria, vazão, entre outros (FOGLER, 2009; WENZEL, 2015).

3.2.1.1 Medidas de determinação da DTR

A forma mais usual de determinação da função DTR consiste na injeção de um traçador inerte. Esta pode ocorrer através de técnicas como perturbação em pulso, degrau positivo, degrau negativo, métodos de frequência resposta, entre outras. As mais difundidas são a perturbação em pulso e degrau positivo, devido a maior facilidade de realização, nas quais o traçador é injetado no tempo zero, na entrada do reator, e posteriormente medida sua concentração na saída, em função do tempo. A Figura 1 representa o processo de injeção do traçador (FOLGER 2009; WENZEL, 2015).

Figura 1- Reator contínuo com injeção de traçador para medidas de DTR

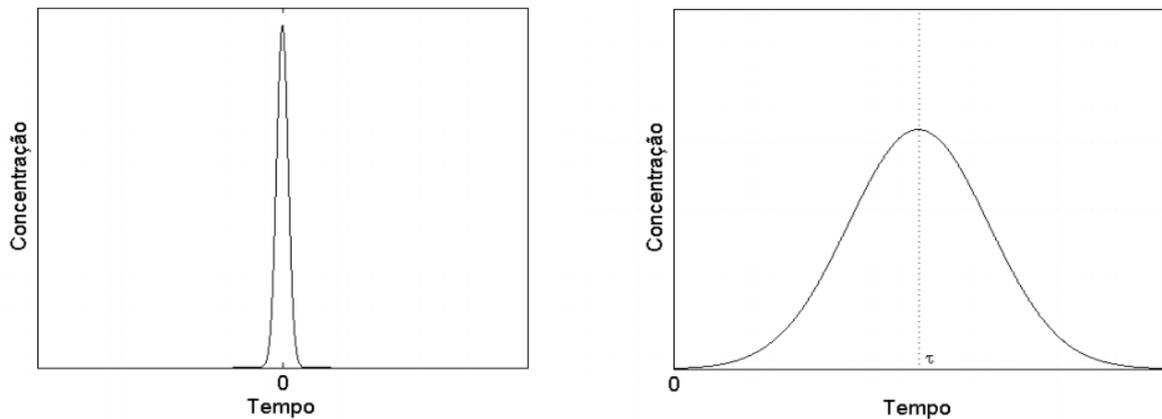


Fonte: Adaptado de (WENZEL, 2015; FOLGER, 2009)

3.2.1.1.1 Perturbação em pulso

Esta técnica consiste em uma única injeção de traçador no tempo zero, na alimentação do reator, com o menor espaço de tempo possível. A figura 2 apresenta curvas típicas de concentração-tempo para injeções de traçador em pulso, na entrada e saída do reator (FOGLER, 2009).

Figura 2 – Curvas típicas de concentração-tempo para injeção de traçador em pulso



Fonte: Adaptado de (WENZEL, 2015; FOGLER, 2009)

A curva $E(t)$, demonstrada através da Equação 3.5, representa a função DTR, e é utilizada para determinação do desvio da idealidade do reator.

$$E(t) = \frac{C}{\int_0^{\infty} C dt} \quad (3.5)$$

A Equação 3.6 é utilizada para calcular a fração do material que sai do reator em um intervalo de tempo $\Delta t = t_2 - t_1$.

$$[\text{Fração de material que sai do reator em } \Delta t] = \int_{t_1}^{t_2} E(t) dt \quad (3.6)$$

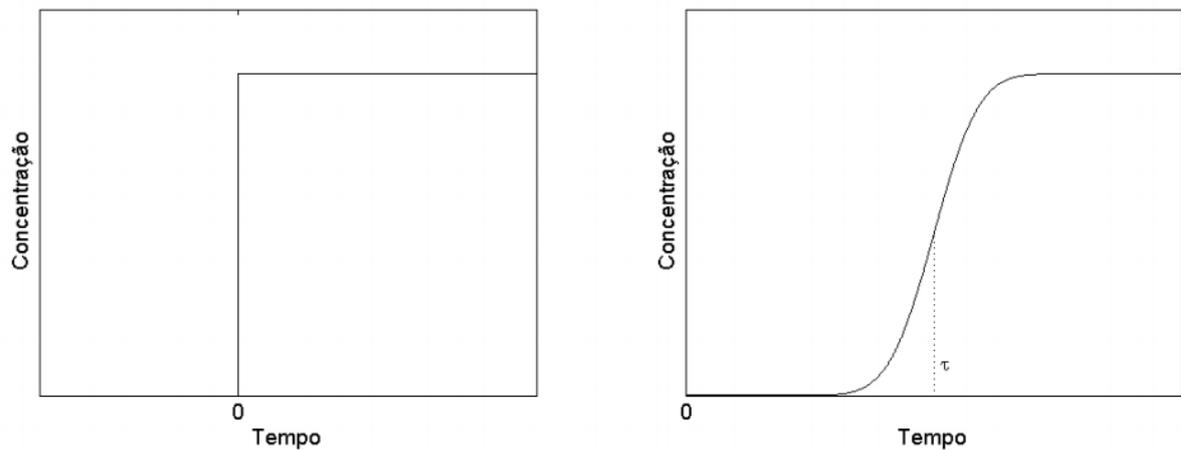
3.2.1.1.2 Perturbação tipo degrau positivo

Esta técnica consiste em uma injeção de traçador no tempo zero, na alimentação do reator, sendo mantida durante toda corrida experimental. A figura 3

apresenta curvas típicas de concentração-tempo para injeções de traçador em degrau positivo, na entrada e saída do reator, onde pode-se perceber que a curva-resposta é crescente até o momento que se atinge a concentração de traçador aplicada.

Diferente da injeção em pulso, a injeção em degrau positivo não necessita conhecimento prévio da concentração de traçador na alimentação ao longo do experimento, porém incorre em uma quantidade maior de traçador a ser utilizado, o que aumenta o custo e também envolve uma diferenciação dos dados, o que pode conduzir a maiores erros (FOGLER, 2009).

Figura 3 – Curvas típicas de concentração-tempo para injeção de traçador em degrau positivo



Fonte: Adaptado de (WENZEL, 2015; FOLGER, 2009)

A Perturbação tipo degrau positivo fornece a função $F(t)$ – função DTR cumulativa, a qual é representada pela Equação 3.7.

$$F(t) = \frac{C}{C_0} \quad (3.7)$$

A função $E(t)$ é calculada a partir da função $F(t)$, Através da equação 3.8.

$$E(t) = \frac{d}{dt} F(t) \quad (3.8)$$

3.2.1.2 Características da DTR

A Equação 3.9 representa o tempo de residência para reatores ideais. Para reatores ideais com vazão volumétrica constante, quando não há ocorrência de volume morto, o tempo de residência médio é igual ao tempo de residência do reator ideal

$$t_m = \tau = \frac{V}{v_0} \quad (3.9)$$

O tempo de residência médio pode ser definido como a média ponderada da fração de material que deixa o reator pelo instante de tempo correspondente, representado pela Equação 3.10.

$$t_m = \int_0^{\infty} t E(t) dt \quad (3.10)$$

A Equação 3.11 apresenta a variância da distribuição (σ^2). Quanto maior sua magnitude, maior a dispersão da distribuição.

$$\sigma^2 = \int_0^{\infty} (t - t_m)^2 E(t) dt \quad (3.11)$$

A Equação 3.12 apresenta a assimetria da distribuição (s^3).

$$s^3 = \frac{1}{\sigma^{3/2}} \int_0^{\infty} (t - t_m)^3 E(t) dt \quad (3.12)$$

A assimetria representa a proximidade da distribuição quanto à uma distribuição normal. Quanto maior a assimetria, mais o reator se aproxima de um CSTR, e quanto menor, mais o reator se aproxima de um PFR. (FOGLER, 2009; WENZEL, 2015).

3.2.1.2.1 Funções normalizadas

As funções normalizadas, diversas vezes, são utilizadas na modelagem de reatores não-ideais. A adimensionalização das equações permite a comparação direta de reatores de diferentes tamanhos (FOGLER, 2009).

O tempo normalizado, definido pela Equação 3.13, representa a fração correspondente ao tempo de retirada da amostra do reator real em relação ao tempo de residência do reator ideal.

$$\theta = \frac{t}{\tau} \quad (3.13)$$

O tempo normalizado médio, definido pela Equação 3.14, representa a fração correspondente ao tempo de residência médio do reator real em relação ao tempo de residência do reator ideal. No caso de inexistência de volume morto, $\theta_m = 1$.

$$\theta_m = \frac{t_m}{\tau} \quad (3.14)$$

A função DTR normalizada, $E(\theta)$ é representada pela equação 3.15

$$E(\theta) = t * E(t) \quad (3.15)$$

A Equação 3.16 apresenta a variância normalizada, resultante da adimensionalização da Equação 3.11.

$$\sigma^2 = \int_0^{\infty} (t - t_m)^2 E(t) dt$$

$$\sigma_{\theta}^2 = \int_0^{\infty} (\theta - \theta_m)^2 E(\theta) d\theta$$

$$\sigma_{\theta}^2 = \frac{\sigma^2}{\tau^2} \quad (3.16)$$

A Equação 3.17 apresenta a assimetria normalizada, resultante da adimensionalização da Equação 3.12.

$$s^3 = \frac{1}{\sigma^{3/2}} \int_0^{\infty} (t - t_m)^3 E(t) dt$$

$$s_{\theta}^3 = \frac{1}{\sigma_{\theta}^{3/2}} \int_0^{\infty} (\theta - \theta_m)^3 E(\theta) d\theta$$

$$s_{\theta}^3 = \frac{s^3}{\tau^{3/2}} \quad (3.17)$$

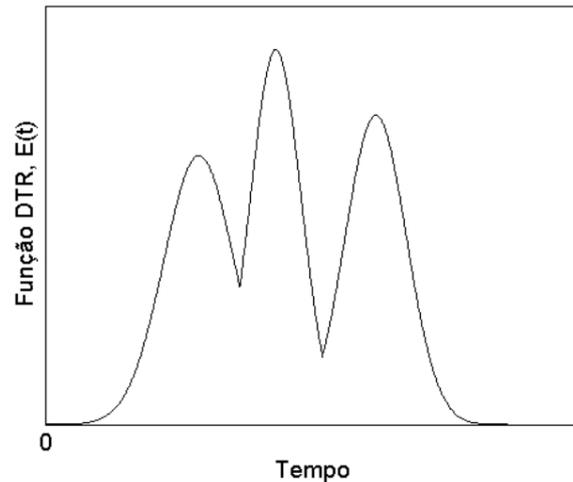
3.2.1.2.1 Anomalias

Segundo Azeredo (1985), os modelos não-ideais procuram incorporar as anomalias e desvios da idealidade no interior dos reatores, sendo os principais:

- Escoamento preferencial – ocorre devido a falhas de geometria do reator, resultando em parte dos elementos do fluido passarem pelo reator em tempo menor que o ideal;
- Curto-circuito (*by-pass*) – elementos do fluido não percorrem o interior do reator, reduzindo sua eficiência;
- Zonas mortas – o fluido fica isolado em uma região do reator onde não interage com as regiões ativas, sem que haja troca e matéria;
- Zonas estagnantes – similar às zonas mortas, porém há interação com as zonas ativas, com troca lenta de matéria.
- Recirculação – parcelas de fluido retornam à pontos anteriores do reator.

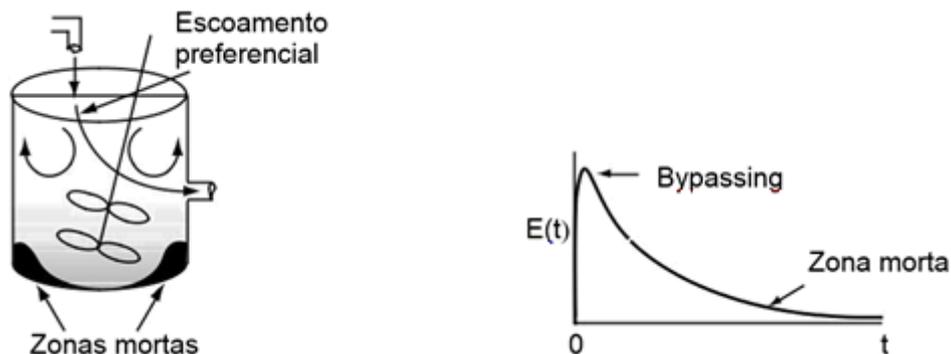
A DTR é uma ferramenta de fundamental importância para identificação de anomalias no escoamento. A Figura 4 apresenta a função DTR para um reator tubular, onde podem ser constatadas anomalias, como recirculação e/ou curto circuito, identificados pela presença de picos múltiplos. Já a figura 5 apresenta a função DTR para um reator de tanque agitado, onde a cauda mais alongada que o ideal, indica a presença de zona morta no reator

Figura 4 – Identificação de anomalias em um reator tubular real a partir da função DTR



Fonte: WENZEL, 2015

Figura 5 – Esquema de um reator CSTR com presença de zonas mortas e escoamento preferencial



Fonte: Adaptado de (FOGLER, 2009)

3.3 MODELOS DE NÃO IDEALIDADES EM REATORES

3.3.1 Modelos sem parâmetros ajustáveis

Os principais modelos de previsão de conversão a partir de dados da DTR sem parâmetros ajustáveis são: i) Modelo de segregação; ii) Modelo de mistura máxima e iii) Modelo de escoamento laminar (FOGLER, 2009; LEVENSPIEL, 2000).

O modelo de segregação considera o escoamento através do reator como uma série contínua de glóbulos, os quais não trocam matéria entre si e permanecem por intervalos diferentes de tempo dentro do reator. Este modelo visa agregar as moléculas que tem o mesmo tempo de residência no reator em um mesmos glóbulo.

Considerando que não há troca molecular entre os glóbulos, cada um pode ser modelado como um reator em batelada, cujo tempo de reação é igual ao tempo que o glóbulo permanece no reator, e a DTR entre os glóbulos é dada pela DTR do reator (FOGLER, 2009).

O modelo de mistura máxima considera um reator tubular com entradas laterais em que o fluido entra somente ao longo de seu comprimento, sendo completamente misturado radialmente com o fluido já presente no reator, de modo que a DTR desse reator é igual a DTR do reator real. A mistura ocorre no momento mais antecipado possível, de modo que o efeito da mistura ocorre o mais cedo possível no reator, sendo esta situação denominada condição de mistura máxima (FOGLER, 2009).

O modelo de escoamento laminar considera que para um tubo suficientemente longo, pelo qual passa um fluido com elevada viscosidade, há ocorrência de um fluxo laminar com perfil de velocidade parabólico. Este modelo considera que devido à elevada viscosidade do fluido, existe apenas uma ligeira difusão radial entre os elementos mais rápidos e os mais lentos. (LEVENSPIEL, 2000)

3.3.2 Modelo de tanques em série

O modelo de tanques em série, consiste em analisar a DTR para determinar o número de tanques em série que dará a melhor aproximação quanto ao reator real.

A Equação 3.18 apresenta a função DTR para uma série de n CSTRs em série

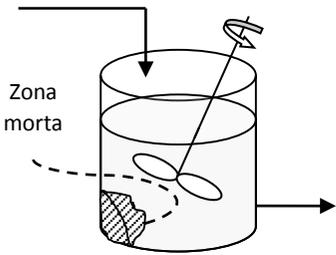
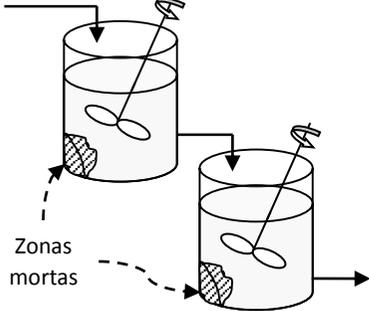
$$E(t) = \frac{t^{(n-1)}}{(n-1)! \tau_i^n} e^{-t/\tau_i} \quad (3.18)$$

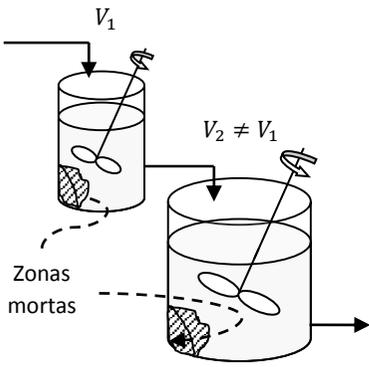
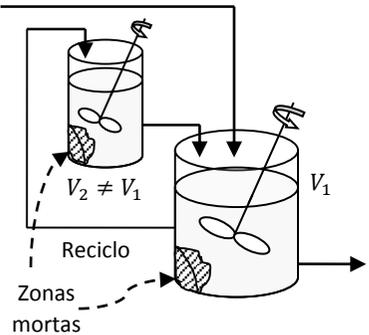
O número de reatores em série pode ser determinado a partir da variância normalizada, obtida através dos dados experimentais pela Equação 3.16, como é demonstrado pela equação 3.19.

$$n = \frac{1}{\sigma_\theta^2} \quad (3.19)$$

Wenzel, Mumbach e Lenz (2015) desenvolveram modelos para descrever o comportamento hidrodinâmico de um protótipo de lagoa anaeróbia com base em um sistema de CSTRs em série. Os principais modelos estão sintetizados no Quadro 3.1.

Quadro 1- Modelos de DTR para configurações de CSTRs em série

Modelo	Configuração	Parâmetros do modelo	Função $E(\theta)$	Propriedades da função DTR adimensionalizada
CSTR com zonas mortas		$\alpha = \text{zonas mortas}$	$E(\theta) = \frac{1}{\alpha} e^{-\frac{1}{\alpha}\theta}$	$\theta_m = \alpha$ $\sigma_\theta^2 = \alpha^2$ $s_\theta^3 = 2 \alpha^{\frac{5}{3}}$
2 CSTRs em série com volumes iguais e zonas mortas		$\alpha = \text{zonas mortas}$	$E(\theta) = \left(\frac{2}{\alpha}\right)^2 \theta e^{-\frac{2}{\alpha}\theta}$	$\theta_m = \alpha$ $\sigma_\theta^2 = \frac{1}{2} \alpha^2$ $s_\theta^3 = \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{1}{3}} \alpha^{\frac{5}{3}}$

Modelo	Configuração	Parâmetros do modelo	Função $E(\theta)$	Propriedades da função DTR adimensionalizada
2 CSTRs em série com volumes diferentes e zonas mortas		$\alpha = \text{zonas mortas}$ $\beta = \text{proporção dos reatores}$	$E(\theta) = \frac{1}{\alpha(2\beta - 1)} \left[e^{-\frac{1}{\beta}\alpha\theta} - e^{-\frac{1}{(1-\beta)\alpha}\theta} \right]$	$\theta_m = \alpha$ $\sigma_{\theta}^2 = \frac{1}{2} \alpha^2 (x + 1)$ $s_{\theta}^3 = \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{1}{3}} \alpha^{\frac{5}{3}} f_1(x)$ $x = 1 - 4\beta(1 - \beta)$ $f_1(x) = 1 + 2.16x - 0.658x^2$
2 CSTRs intercambiando, com volumes diferentes, zonas mortas e reciclo		$\alpha = \text{zonas mortas}$ $\beta = \text{proporção dos reatores}$ $R_I = \text{taxa de reciclo}$	$E(\theta) = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 \left(A - u^{\frac{1}{2}} \right) - \lambda_1 \left(A + u^{\frac{1}{2}} \right)} \left[\left(u^{\frac{1}{2}} - A \right) e^{\lambda_1 \theta} + \left(u^{\frac{1}{2}} + A \right) e^{\lambda_2 \theta} \right]$ $\lambda_1 = \frac{1}{2\alpha\beta(1-\beta)} \left(u^{\frac{1}{2}} - 1 - R_I + \beta \right)$ $\lambda_2 = -\frac{1}{2\alpha\beta(1-\beta)} \left(u^{\frac{1}{2}} + 1 + R_I - \beta \right)$ $u = \beta^2(1 + 4R_I) - 2\beta(1 + 3R_I) + (1 + R_I)^2$ $A = (1 + R_I) - \beta(1 + 2R_I)$	$\theta_m = \alpha$ $\sigma_{\theta}^2 = \alpha^2(x + 1)$ $s_{\theta}^3 = 2\alpha^{\frac{5}{3}} f_2(x)$ $x = 32 \frac{\beta R_I}{[u - (1 + R_I - \beta)^2]^2} \left[\left(1 + \frac{R_I}{2} \right) - \beta(4 + R_I) + \beta^2 \left(6 + \frac{R_I}{2} \right) - 4\beta^3 + \beta^4 \right] - 1$ $f_2(x) = 1 + 1.57x + 0.043x^2$

Fonte: Adaptado de (WENZEL; MUMBACH; LENZ, 2016)

3.3.3 Modelo de dispersão

O modelo de dispersão é comumente utilizado na descrição de reatores tubulares não ideais. De acordo com este modelo, há uma dispersão axial do material, de forma análoga à Lei de Fick da difusão. Ocorre movimento pelo escoamento da massa fluida e cada componente é transportado através de qualquer seção transversal, resultante das difusões molecular e convectiva (FOGLER, 2009).

Tem-se por conceito de dispersão longitudinal, o processo de difusão sobreposto, que caracteriza o espalhamento do pulso de traçador, de acordo com este modelo. Esse processo é caracterizado pelo coeficiente de dispersão D_a [m²/s], que corresponde a velocidade de propagação por espalhamento do traçador (LEVENSPIEL, 2000).

O número de Peclet é um termo adimensional utilizado no modelo de dispersão. De acordo com Fogler (2009), é definido como a taxa de transporte por convecção dividida pela taxa de transporte por difusão ou dispersão.

3.3.3.1 Dispersão de pequena intensidade

O modelo de dispersão de pequena intensidade, descrito por Levenspiel (2000), considera que a curva do traçador não muda de forma significativa durante o tempo de medição. Este modelo proporciona a obtenção de uma curva de DTR simétrica, que representa uma família de curvas gaussianas.

Ao se considerar pequenas intensidades de dispersão, a DTR não depende das condições de contorno, quer seja um recipiente aberto ou fechado. As Equações 3.20 e 3.21 apresentam a função $E(\theta)$ e o número de Peclet para este modelo.

$$E(\theta) = \frac{e^{\left[\frac{-(1-\theta)^2 Pe}{4}\right]}}{2\sqrt{\frac{\pi}{Pe}}} \quad (3.20)$$

$$\sigma_\theta^2 = \frac{2}{Pe} \quad (3.21)$$

3.3.3.2 Dispersão de grande intensidade

O modelo de dispersão de grande intensidade, conforme Levenspiel (2000), considera que a curva do traçador se modifica de forma significativa durante o tempo de medição, apresentando um prolongamento em forma de cauda. Para estas condições de escoamento, considera-se que as condições de contorno influenciam na curva da DTR obtida.

Para este modelo, são consideradas três condições de contorno possíveis: i) Sistema open-open – ocorre dispersão tanto à montante quanto à jusante da seção de reação; ii) Sistema semi-open – não há dispersão na entrada da seção, porém há dispersão na saída e; iii) sistema closed-closed – não ocorre dispersão fora da seção de reação (FOGLER, 2009; LEVENSPIEL, 2000).

Naméche e Vassel (1996) apresentam equações para o modelo dispersivo de pistão, determinando a função $E(\theta)$ a partir do número de Peclet (Pe). É apresentada uma equação para cada condição de contorno (open-open, semi-open e closed-closed), assim como a determinação do número de Peclet a partir dos dados experimentais como função da variância normalizada. As Equação 3.22 e 3.23 apresentam a função $E(\theta)$ e o número de Peclet para o sistema open-open e as equações 3.24 e 3.25 para o sistema semi-open.

$$E(\theta) = \frac{e^{\left[\frac{-(1-\theta)^2 Pe}{4\theta}\right]}}{2\sqrt{\frac{\pi\theta}{Pe}}} \quad (3.22)$$

$$\sigma_{\theta}^2 = \frac{2Pe + 8}{Pe^2} \quad (3.23)$$

$$E(\theta) = \frac{e^{\left[\frac{-(1-\theta)^2 Pe}{4\theta}\right]}}{2\sqrt{\frac{\pi\theta^3}{Pe}}} \quad (3.24)$$

$$\sigma_{\theta}^2 = \frac{2Pe + 3}{Pe^2} \quad (3.25)$$

As equações para o modelo dispersivo de sistema closed-closed, são apresentadas por Mavros, 1992, onde assim como nos demais modelos, a função $E(\theta)$ é determinada a partir do número de Peclet (Pe). As equações 3.26 a 3.28 apresentam a função $E(\theta)$ e o número de Peclet para o sistema closed-closed.

$$E(\theta) = e^{\left[\frac{Pe}{2}\left(1-\frac{\theta}{2}\right)\right]} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\lambda_n [Pe \operatorname{sen}(\lambda_n) + 2\lambda_n \cos(\lambda_n)] e^{-\frac{\lambda_n^2}{Pe}\theta}}{\left(\frac{Pe^2}{4} + Pe + \lambda_n^2\right)} \quad (3.26)$$

$$\operatorname{tg}(\lambda_n) = \frac{4\lambda_n + Pe^2}{4Pe} \quad (3.27)$$

$$\sigma_{\theta}^2 = \frac{2}{Pe^2} (Pe - 1 + e^{-Pe}) \quad (3.28)$$

3.3.3.2.1 Sistema open-open

Para o sistema open-open, considera-se que há continuidade de fluxo nos contornos em $z=0$, resultando na condição de contorno na entrada, expressa pela Equação 3.29 (FOGLER, 2009).

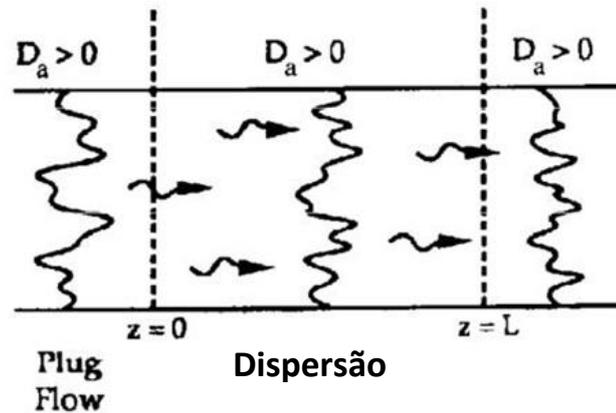
$$-D_a \frac{\partial C_A}{\partial z} \Big|_{z=0^-} + UC_A(0^-) = -D_a \frac{\partial C_A}{\partial z} \Big|_{z=0^+} + UC_A(0^+) \quad (3.29)$$

Em $z=L$, considera-se a continuidade de concentração, como representado pela condição de contorno na saída, expressa pela Equação 3.30.

$$\frac{dC_A}{dz} = 0 \quad (3.30)$$

A Figura 6 representa graficamente o sistema open-open e suas condições de contorno.

Figura 6 – Sistema open-open



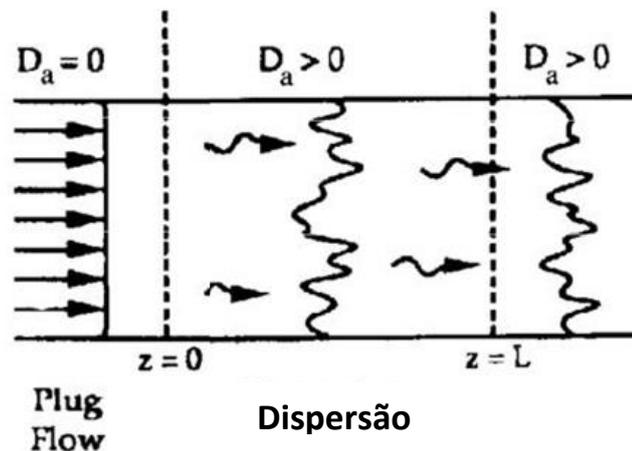
Fonte: Adaptado de FOGLER, 2009

3.3.3.2.2 Sistema semi-open

O sistema semi-open considera que ocorre o escoamento sem dispersão imediatamente antes da seção de reação, iniciando-se a ocorrência de dispersão na seção e prosseguindo após a saída do reator.

A Figura 7 representa graficamente o sistema semi-open e suas condições de contorno.

Figura 7 – Sistema semi-open



Fonte: Adaptado de (FOGLER, 2009)

3.3.3.2.3 Sistema closed-closed

Para o sistema closed-closed, ocorre o escoamento sem dispersão imediatamente antes e após a seção de reação, porém considera-se que há dispersão na seção, entre $z=0^+$ e $z=L^-$. As respectivas condições de contorno são expressa pela Equação 3.31, para a concentração de entrada, e as Equações 3.32 e 3.33, para a concentração de saída (FOGLER, 2009).

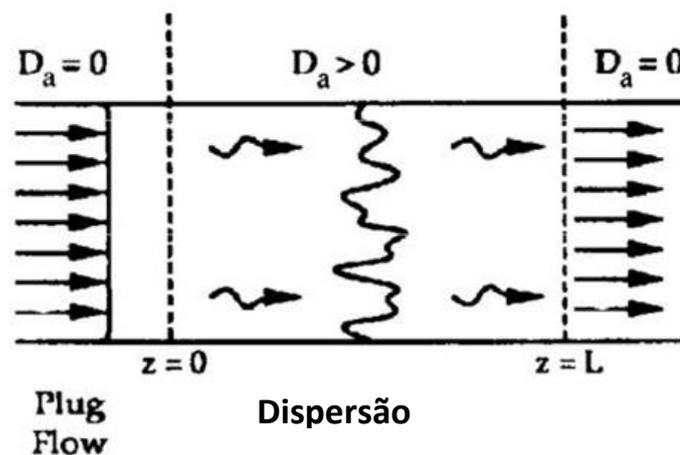
$$C_{A0} = -\left(\frac{D_a}{U}\right)_{z=0^+} + C_A(0^+) \quad (3.31)$$

$$C_A(L^-) = C_A(L^+) \quad (3.32)$$

$$\frac{\partial C_A}{\partial z} = 0 \quad (3.33)$$

A Figura 8 representa graficamente o sistema closed-closed e suas condições de contorno.

Figura 8 – Sistema closed-closed



Fonte: Adaptado de (FOGLER, 2009)

3.3.4 Modelos baseados em combinações de reatores ideais

Um reator real pode ser modelado como combinações de reatores ideais, através de um número quase ilimitado de combinações. Ao limitar o número de parâmetros ajustáveis a dois, como exemplo *by-pass* e volume morto, facilita-se o tratamento matemático da situação.

Os parâmetros são determinados de modo a se obter a maior proximidade possível entre o modelo teórico e os resultados experimentais. Para uma boa adequação do modelo, o erro máximo admissível não pode ultrapassar o erro estimado pelo teste com traçador, assim como não devem haver tendências observáveis ao longo do tempo na diferença entre o modelo e o reator real (FOGLER, 2009).

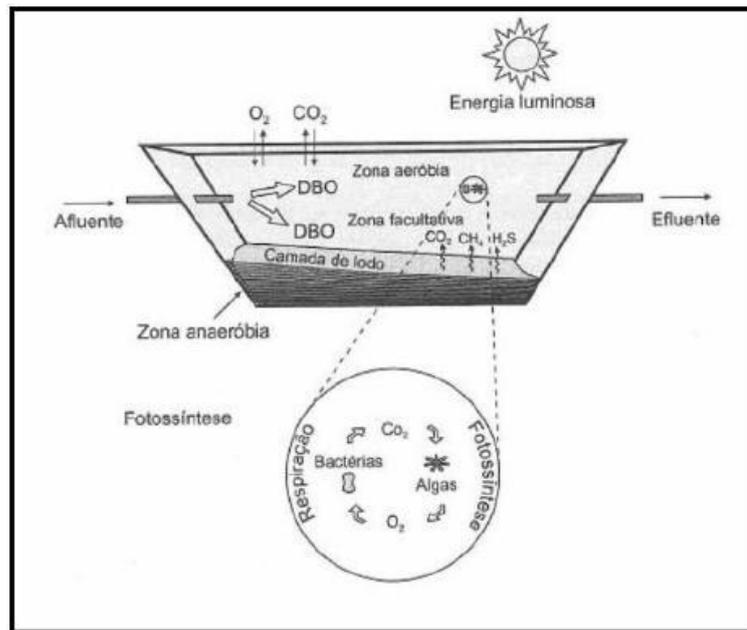
3.4 LAGOAS DE ESTABILIZAÇÃO

3.4.1 Lagoa facultativa

Trata-se do sistema mais simples de lagoas de estabilização. Consiste em um processo essencialmente natural, com taxas de aplicação mais lentas e tempos de detenção hidráulica acima de 20 dias. A DBO solúvel e a DBO particulada, sofrem ação de bactérias aeróbias dispersas no meio líquido, sendo estabilizadas enquanto a DBO suspensa sedimenta, e é convertida por microrganismos anaeróbios no fundo da lagoa. Uma de suas principais desvantagens é a grande área requerida, a qual muitas vezes, não é disponível (VON SPERLING, 2005).

A Figura 9 apresenta o esquema simplificado de uma lagoa facultativa.

Figura 9 – Esquema simplificado de uma lagoa facultativa



Fonte: VON SPERLING, 2005

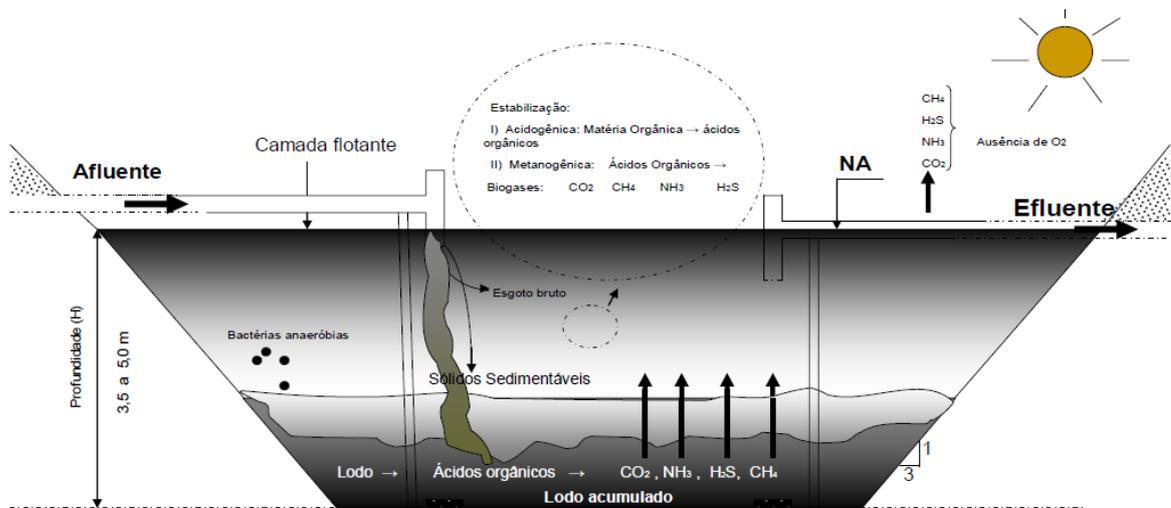
3.4.2 Lagoa anaeróbia

Consiste em uma lagoa de área superficial reduzida, porém mais profunda (geralmente 4 a 5 m). As condições anaeróbias são propiciadas pelo consumo muito maior que a produção de oxigênio, devido às dimensões reduzidas (VON SPERLING, 2005).

Os sólidos sedimentados ao fundo da lagoa são digeridos pelas bactéria anaeróbias. Microrganismos acidogênicos produzem ácidos, anteriormente à redução da DBO. Estes ácidos posteriormente são convertidos em CH_4 , CO_2 e água (SILVA FILHO, 2007).

A Figura 10 apresenta o desenho esquemático de uma lagoa anaeróbia.

Figura 10 – Desenho esquemático de uma lagoa anaeróbia



Fonte: SILVA FILHO, 2007

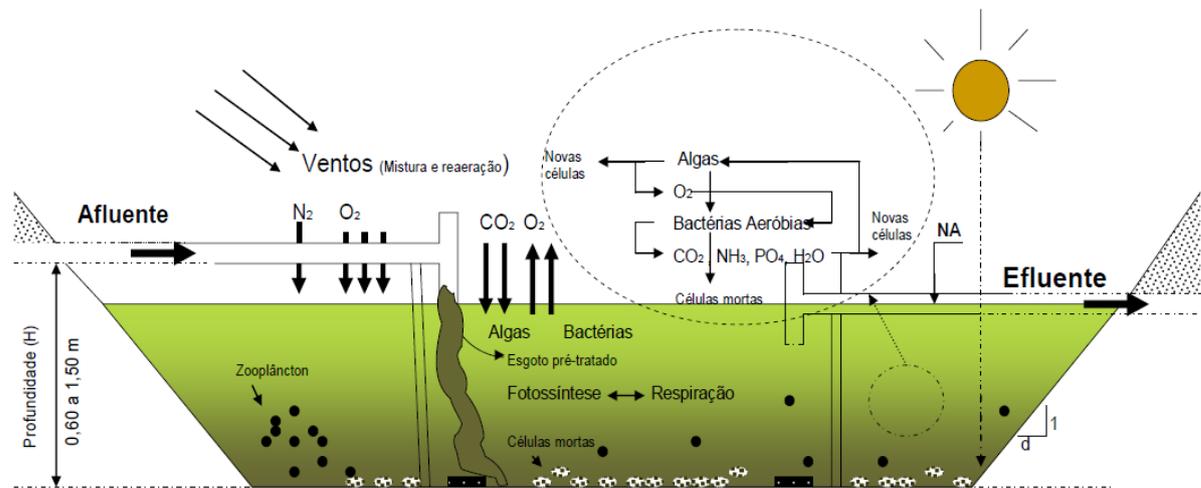
3.4.3 Lagoa de maturação

Lagoas de maturação são geralmente utilizadas para o polimento de efluentes provenientes de sistemas anteriores, cujo principal objetivo é a remoção de microrganismos patogênicos.

A profundidade destas lagoas geralmente é de 1 m ou inferior. Essa configuração, mais rasa em comparação aos outros tipos de lagoa, visa otimizar os mecanismos de remoção de microrganismos patogênicos, tais como radiação solar, pH superior a 8,5 e elevado oxigênio dissolvido (OD). As configurações típicas são três ou quatro lagoas em série, ou uma única lagoa com chicanas (VON SPERLING, 2005).

A Figura 11 apresenta o desenho esquemático de uma lagoa de maturação.

Figura 11 – Desenho esquemático de uma lagoa de maturação



Fonte: SILVA FILHO, 2007

3.5 LAGOAS COM CHICANAS

O tempo de residência é um parâmetro fundamental quanto ao tratamento de efluentes em lagoas de estabilização, e quando inferior ao teórico ideal, reduz a qualidade do tratamento devido à presença de zonas mortas. (SILVA, JÚNIOR e OLIVEIRA, 2001).

A inserção de chicanas em lagoas de estabilização pode aproximar o comportamento hidrodinâmico ao limite teórico ideal, correspondente ao fluxo de pistão. A utilização de chicanas propicia uma redução no tempo de residência necessário para o atendimento de um determinado grau de tratamento e redução dos custos de implantação, devido ao menor volume necessário (KILANI E OGUNROMBI, 1984; SILVA, JÚNIOR e OLIVEIRA, 2001, CAETANO, 2009).

Kilani e Ogunrombi (1984) investigaram o efeito de chicanas na performance de lagoas facultativas, através de experimentos com 3, 6 e 9 chicanas horizontais, além de uma lagoa controle sem chicanas.

Com os resultados obtidos, estes autores observaram que o aumento no número de chicanas acarreta em um aumento do volume morto, redução do índice de curto-circuitos e redução no índice de dispersão.

Abbas, Nasr e Seif (2006) em estudo intitulado "Study on easte stabilization pond geometry for the wastewater treatment efficiency", utilizaram hidrodinâmica computacional para investigar a combinação de diversos fatores, com vistas a prever

o comportamento de lagoas de estabilização. Foram analisadas configurações de lagoas com razão comprimento/largura ($L1/L2$) iguais a 1,2,3 e 4, sendo estas sem chicanas, com 2 chicanas e com 4 chicanas, resultando em 12 configurações distintas, onde foram analisados diferentes valores de profundidade.

Dentre as configurações avaliadas, conforme os autores, as que apresentam melhores desempenhos quanto à hidrodinâmica da lagoa e remoção de DBO são $L1/L2=4$ com 2 chicanas transversais e $L1/L2=4$ com 4 chicanas transversais, respectivamente.

Nielson, Middlebrooks e Porcella (1973) investigaram o efeito de chicanas em lagoas anaeróbias. Para tanto, monitoraram o desempenho de três lagoas anaeróbias: i) com chicanas verticais (três superiores e três inferiores); ii) com chicanas horizontais (três chicanas paralelas ao comprimento da lagoa) e; iii) com chicanas longitudinais (três chicanas). Os resultados obtidos foram comparados a uma lagoa sem chicanas.

Foram avaliados três modelos cinéticos: i) Modelo de Marias-Shaw; ii) Modelo de Monod e; iii) Modelo plug-flow de primeira ordem. O modelo de Marias-Shaw mostrou-se o mais preciso conforme os dados experimentais, porém outras informações foram obtidas através do modelo de Monod. O modelo plug-flow não apresentou uma boa simulação.

Dentre os resultados obtidos, cabe destacar: i) As taxas de degradação biológica foram significativamente superiores nos reatores chicanados; ii) A lagoa com chicanas longitudinais apresentou maior redução de carbono orgânico solúvel; iii) A lagoa com chicanas verticais apresentou aumento na taxa de sedimentação e flotação de sólidos em suspensão, os quais ficaram presos nas chicanas e tiveram de ser removidos; iv) Caso os modelos aplicados sejam aplicados a sistemas em larga escala, a lagoa sem chicanas requer quase o dobro de espaço que a lagoa com chicanas longitudinais para uma eficiência similar.

Olikanni e Ducoste (2011) desenvolveram um modelo de otimização baseado em fluidodinâmica computacional para lagoas de estabilização, incorporando parâmetros de área, profundidade, número de chicanas (horizontais) e comprimento das chicanas, visando redução de custos e maximização da eficiência.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 MATERIAIS E APARATO EXPERIMENTAL

Para realização deste estudo, foi utilizado um protótipo de lagoa anaeróbia, com geometria típica de lagoas aplicadas na Região Sul do Brasil. As relações entre as dimensões adotadas foram: i) Relação entre altura e largura (H/D) = 1:4; ii) Relação entre comprimento e largura (L/D) = 2:1 e; iii) inclinação do talude (ϕ) = 1:2. O reator foi confeccionado em madeira *pinus*, sendo revestido com geomembrana de PVC de 8 mm, típico para lagoas de estabilização. Foram inseridas chicanas verticais, espaçadas igualmente conforme o comprimento de fundo do reator.

O volume do reator foi determinado em função da vazão a ser aplicada pela bomba, sendo calculado pela Equação 4.1.

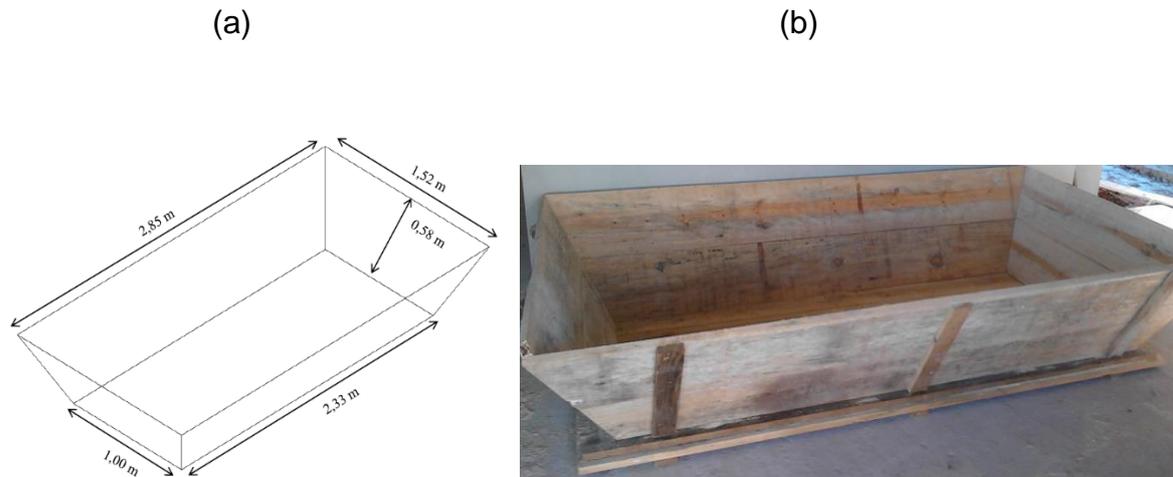
$$V = D^3 \left\{ (H/D) \left[(L/D) - (L/D)(H/D) \frac{1}{\text{tg}(\phi)} - (H/D) \frac{1}{\text{tg}(\phi)} + 2(H/D)^2 \frac{1}{\text{tg}(\phi)} \right] \right\} \quad (4.1)$$

Após estimado o volume do reator em função das características da bomba peristáltica, obteve-se o valor da largura D , através da Equação 4.2, e os valores de comprimento L , através da relação (L/D) = 2:1 e a altura H , através da relação (H/D) = 1:4.

$$D = \left(\frac{V}{\left\{ \left(\frac{H}{D} \right) \left[\left(\frac{L}{D} \right) - \left(\frac{L}{D} \right) \left(\frac{H}{D} \right) \frac{1}{\text{tg}(\phi)} - \left(\frac{H}{D} \right) \frac{1}{\text{tg}(\phi)} + 2 \left(\frac{H}{D} \right)^2 \frac{1}{\text{tg}(\phi)} \right] \right\}} \right)^{1/3} \quad (4.2)$$

As dimensões teóricas do protótipo foram determinadas como: $H_{\text{Inclinada}} = 0,58$ m; $H_{\text{Máxima}} = 0,52$ m; $D_b = 1,00$ m; $D_{\text{Máxima}} = 1,52$ m; $L_b = 2,33$ m; $L_{\text{Máxima}} = 2,85$ m. Mas após construído e com a geomembrana, apresentou as seguintes dimensões até a altura da cota d'água: $H_{\text{Coluna d'água}} = 0,33$ m; $D_b = 0,98$ m; $D_c = 1,30$ m; $L_b = 2,29$ m; $L_c = 2,60$ m. A Figura 12a representa as dimensões do reator e a Figura 12b apresenta o reator confeccionado com madeira *pinus*.

Figura 12 - Estrutura do protótipo (a) com as dimensões e (b) após construído.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2015

A geomembrana de PVC, utilizada para simular as condições normais de uma lagoa foi encaixada no reator, onde os cantos foram soldados, conforme é demonstrado na Figura 13.

Figura 13 – Protótipo de reator tipo lagoa anaeróbia revestido com geomembrana



Fonte: Elaborado pelo autor, 2015

As chicanas verticais foram impermeabilizadas através de revestimento com lona e fixadas no reator com cola silicone, deixando uma abertura de 25% da altura. A Figura 14 demonstra o reator com duas chicanas inseridas, sendo uma inferior e uma superior.

Figura 14 – Protótipo de reator tipo lagoa anaeróbia com duas chicanas verticais.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016

A entrada do fluido ficou posicionada a uma altura de 10% em relação à cota máxima atingida pelo líquido, e a saída ficou posicionada na cota máxima atingida pelo líquido e foi utilizado um reservatório de 360 L, do qual a água era bombeada para o reator.

Para obtenção das vazões adequadas de entrada no reator utilizou-se uma bomba peristáltica DCM-100 (Figura 15), com precisão de 0,01 mL/min, a qual foi calibrada anteriormente a cada corrida experimental. Para tanto, utilizou-se um béquer, uma balança analítica de precisão 1×10^{-3} g e um cronômetro de precisão de 1ms.

Figura 15 – Bomba peristáltica DCM-100.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016

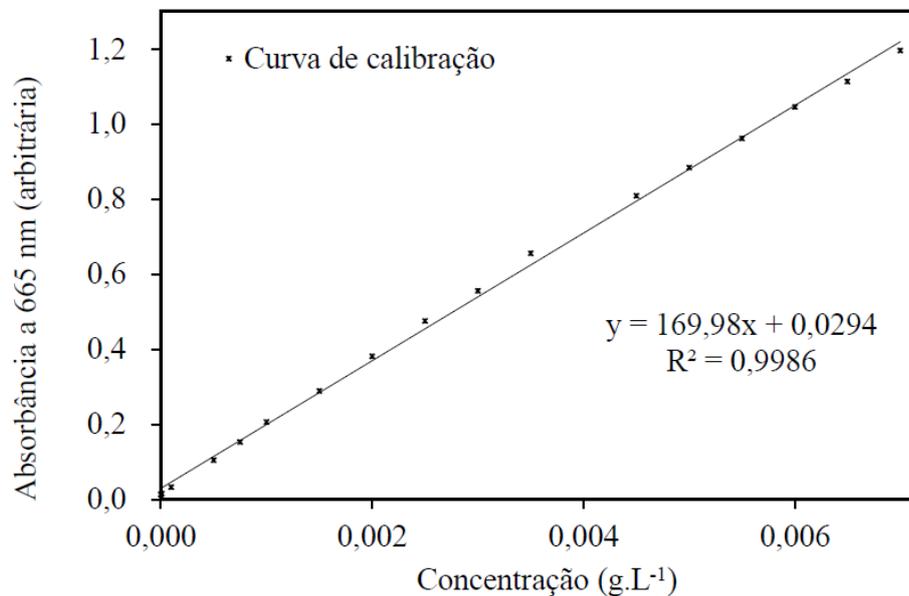
A seleção do traçador para realização das corridas experimentais deve compreender um elemento inerte e que proporcione uma coloração acentuada, facilmente detectada pelo espectrofotômetro, na região do visível. Para tanto, o traçador utilizado foi o azul de metileno, de fórmula molecular $C_{16}H_{18}ClN_3O$ e massa molar de 319,85 g/mol. Preparou-se uma solução onde foram diluídas 30 g de azul de metileno em 1 L de água de abastecimento, a qual foi mantida em estufa a 30 °C.

Com objetivo de medição da concentração de traçador, utilizou-se um espectrofotômetro UV-vis com precisão de 1×10^{-4} .

4.2 MÉTODO ANALÍTICO

Com objetivo de medição da concentração de traçador, utilizou-se um espectrofotômetro UV-vis com precisão de 1×10^{-4} para realização de varredura para determinação do melhor comprimento de onda, correspondente ao maior valor de absorvância. O melhor comprimento de onda observado para o traçador foi de 665 nm. A Figura 16 apresenta a curva de calibração, bem como a equação da reta e o coeficiente de determinação R^2 , o qual mostrou-se estatisticamente adequado.

Figura 16 – Curva de calibração para o traçador azul de metileno a 665 nm.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2015

Foram realizadas corridas experimentais correspondentes aos tempos de residência de 72 horas (3 dias), 144 horas (6 dias), 216 horas (9 dias) e 288 horas (12 dias).

Com a bomba peristáltica calibrada, realizou-se a medição do volume real do reator sem as chicanas, correspondente a 0,92 m³. Após, calculou-se o volume das chicanas através de suas dimensões e descontou-se do volume total do reator, resultando em um volume de 0,905 m³. Para que a concentração de saída fosse detectável pelo espectrofotômetro, foi selecionado um volume de 100 ml de solução de azul de metileno de 30 g/L.

As vazões determinadas para as corridas experimentais foram de 209,7 mL/min, para tempo de residência de 3 dias, 104,6 e 105,0 mL/min para 6 dias, 70,1 mL/min para 9 dias e 49,7 mL/min para 12 dias.

O intervalo entre as coletas foi determinado com base na variação da concentração de saída do reator: quanto menor a variação da concentração, menor o período entre as análises. As medidas de absorbância foram realizadas no espectrofotômetro UV-vis em triplicata, e a concentração foi determinada por meio da curva de calibração.

4.3 MODELAGEM DAS NÃO-IDEALIDADES

A avaliação dos dados experimentais consiste na aplicação de modelos desenvolvidos a partir das equações da continuidade, sendo as soluções para o cálculo da DTR determinadas de forma analítica.

Foram aplicados modelos baseados em expressões teóricas desenvolvidas a partir do modelo de dispersão: i) modelo de dispersão de pequena intensidade; ii) sistema open-open ; iii) sistema semi-open; e iv) sistema closed-closed.

A elaboração das curvas e avaliação dos modelos foi realizada através do uso de um software matemático de simulação numérica, possibilitando a comparação das curvas geradas com os resultados experimentais. A técnica de otimização não-linear através do método dos mínimos quadrados, foi utilizada para estimar os valores dos parâmetros dos modelos. Para tanto foi aplicado o algoritmo *Trust-region-reflective optimization algorithm*, proposto por Coleman e Li (1996).

As equações para determinação da função $E(\theta)$ para o modelo dispersivo, tem implícita a presença de um parâmetro de volume morto, ao considerar $\theta = t/t_m$, diferente da notação apresentada neste trabalho, que considera $\theta = t/\tau$. Para ajustar as equações, foi inserido um parâmetro de volume morto, α , permitindo reescrever as equações 3.20, 3.22, 3.24 e 3.26, como as equações 4.3 a 4.6.

$$E(\theta) = \frac{e^{\left[\frac{-(1-\frac{\theta}{\alpha})^2 Pe}{4}\right]}}{2\sqrt{\frac{\pi}{Pe}}} \quad (4.3)$$

$$E(\theta) = \frac{e^{\left[\frac{-(1-\frac{\theta}{\alpha})^2 Pe \alpha}{4\theta}\right]}}{2\sqrt{\frac{\pi\theta}{Pe \alpha}}} \quad (4.4)$$

$$E(\theta) = \frac{e^{\left[\frac{-(1-\frac{\theta}{\alpha})^2 Pe \alpha}{4\theta}\right]}}{2\sqrt{\frac{\pi\theta^3}{Pe \alpha^3}}} \quad (4.5)$$

$$E(\theta) = e^{\left[\frac{Pe}{2}\left(1 - \frac{\theta}{2\alpha}\right)\right]} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\lambda_n [Pe \operatorname{sen}(\lambda_n) + 2\lambda_n \cos(\lambda_n)] e^{-\frac{\lambda_n^2}{Pe} \theta}}{\left(\frac{Pe^2}{4} + Pe + \lambda_n^2\right)} \quad (4.6)$$

Para as equações de determinação do número de Peclet, as equações 3.21, 3.23, 3.25 e 3.28 foram reescritas para inserir o parâmetro de volume morto, fazendo uma analogia para a variância, de acordo com as equações de Wenzel, Mumbach e Lenz (2016), para configurações de CSTRs em série, na forma das equações 4.7 a 4.10.

$$\frac{\sigma_{\theta}^2}{\alpha^2} = \frac{2}{Pe} \quad (4.7)$$

$$\frac{\sigma_{\theta}^2}{\alpha^2} = \frac{2Pe + 8}{Pe^2} \quad (4.8)$$

$$\frac{\sigma_{\theta}^2}{\alpha^2} = \frac{2Pe + 3}{Pe^2} \quad (4.9)$$

$$\frac{\sigma_{\theta}^2}{\alpha^2} = \frac{2}{Pe^2} (Pe - 1 + e^{-Pe}) \quad (4.10)$$

Os parâmetros de entrada para o ajuste, foram o número de Peclet e parâmetro de volume morto. O número de Peclet foi determinado a partir da variância normalizada, para cada experimento e modelo, a partir das equações 3.21, 3.23, 3.26 e 3.28, sendo a raiz da equação determinada pelo método numérico da posição falsa. O parâmetro de volume morto foi determinado com base no tempo de residência normalizado médio para cada experimento, sendo determinado pela equação 4.11

$$\alpha = \theta_m \quad (4.11)$$

Para a aplicação do modelo closed-closed, a determinação das raízes da equação 3.24 se deu através do polinômio desenvolvido por Mavros, 1992, expresso

pela equação 4.12, cujos coeficientes são apresentados no Quadro 2. Conforme o autor, a obtenção das dez primeiras raízes já apresenta resultados satisfatórios.

$$\lambda_i = \sum_{j=0}^4 a_{ij} Pe^j \quad (4.12)$$

Quadro 2 – Coeficientes do polinômio para obtenção das raízes da equação 3.24

λ_i	a_{i0}	a_{i1}	a_{i2}	a_{i3}	a_{i4}
1	0,37897	0,58488	-0,07985	0,00535	-0,00013
2	3,14662	0,30406	-0,02304	0,00111	-0,00002
3	6,28252	0,16079	-0,00491	0,00006	0,00000
4	9,42456	0,10659	-0,00142	-0,00003	0,00000
5	12,56632	0,07969	-0,00055	-0,00003	0,00000
6	15,70796	0,06338	-0,00027	-0,00002	0,00000
7	18,84956	0,05305	-0,00015	-0,00001	0,00000
8	21,99115	0,04547	-0,00009	-0,00001	0,00000
9	25,13274	0,03979	-0,00006	-0,00001	0,00000
10	28,27434	0,03536	-0,00004	0,00000	0,00000

Fonte: MAVROS, 1992

Para a avaliação da determinação da curva ajustada através do algoritmo, utilizou-se o coeficiente de determinação R^2 , definido pela Equação 4.3.

$$R^2 = 1 - \frac{RSS_{mod}}{SS_{exp}} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{nt} [E(\theta)_{mod} - E(\theta)_{exp}]^2}{\sum_{i=1}^{nt} [E(\theta)_{mod} - \overline{E(\theta)_{exp}}]^2} \quad (4.3)$$

Onde:

- $\overline{E(\theta)_{exp}}$ = média experimental da função $E(\theta)$;
- RSS_{mod} = somatório dos quadrados do resíduo entre o modelo e os dados experimentais;
- SS_{exp} = somatório total dos quadrados dos desvios da média experimental.

O coeficiente de determinação ajustado foi utilizado para avaliar a influência da quantidade de parâmetros associados, através da Equação 4.4.

$$R_{ajustado}^2 = 1 - \left(\frac{n_{exp} - 1}{n_{exp} - n_p} \right) \frac{RSS_{mod}}{SS_{exp}} \quad (4.4)$$

Onde:

- n_{exp} = número total de experimentos;
- n_p = número total de parâmetros;

Ao passo que o coeficiente de determinação revela o ajuste de modelo aos dados experimentais, o coeficiente de determinação ajustado, ao incorporar o número de parâmetros utilizados, permite a comparação entre os diferentes modelos.

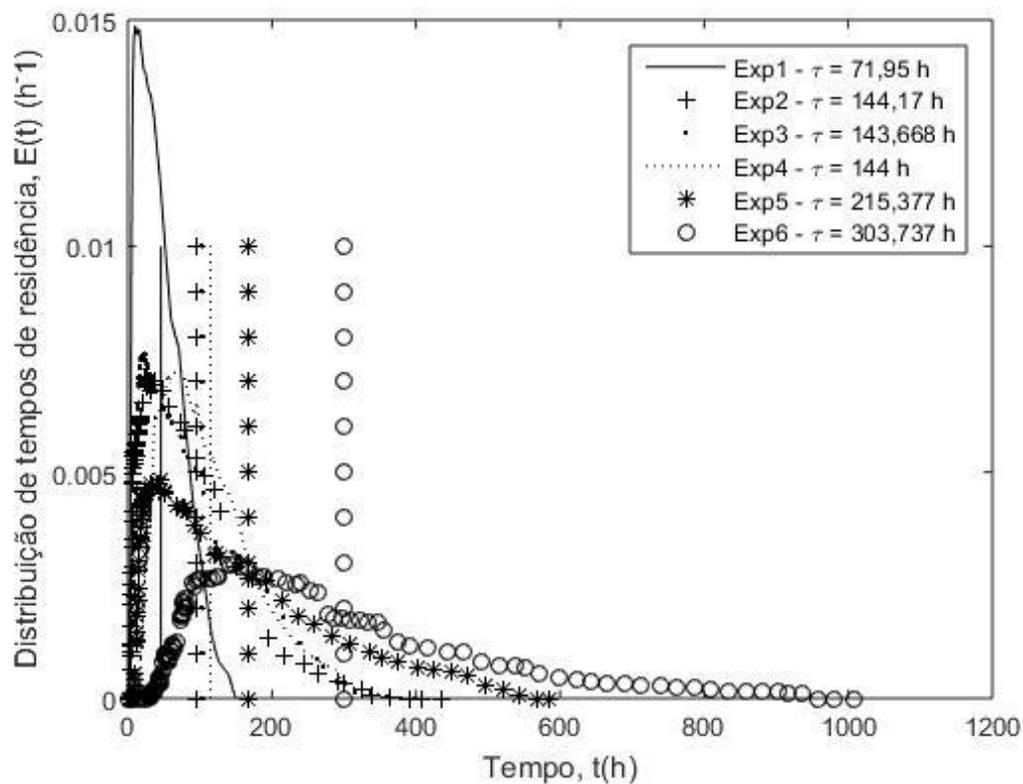
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

5.1.1 Distribuição de tempos de residência e suas propriedades

A partir da análise dos dados experimentais, foi determinada a função $E(t)$ para cada experimento realizado, através da equação 3.5, e o tempo de residência médio através da equação 3.10, sendo estes expressos graficamente através da Figura 17.

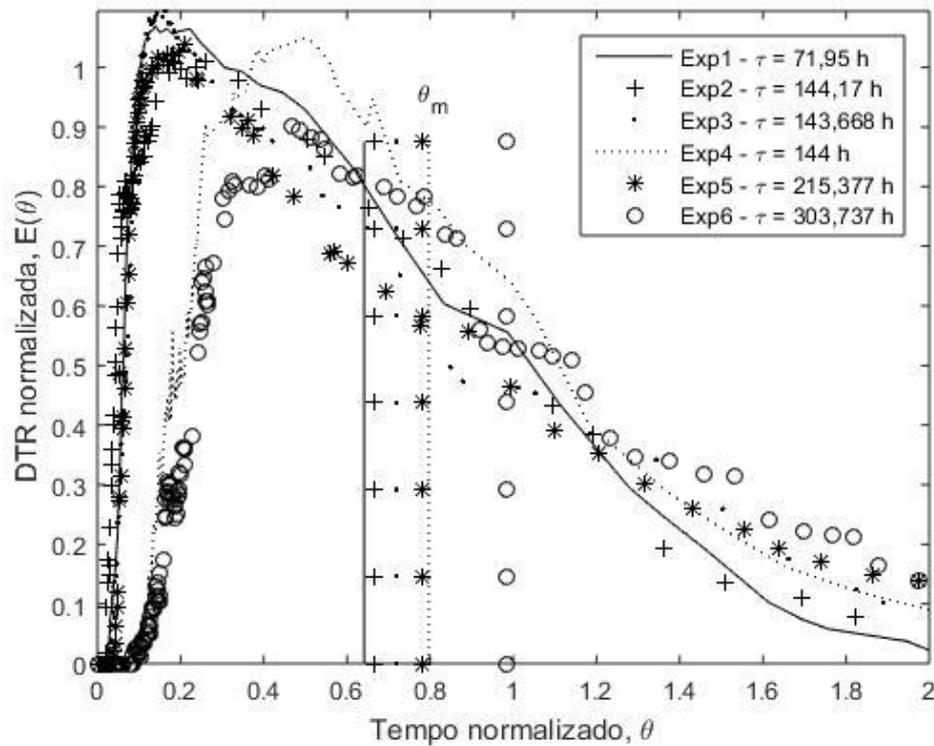
Figura 17 – Gráfico da função DTR, $E(t)$, para as corridas experimentais realizadas



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016

Através da equação 3.14 determinou-se o tempo de residência normalizado médio, e a função DTR normalizada pela equação 3.15, os quais são expressos pela Figura 18.

Figura 18 – Gráfico da função DTR normalizada, $E(\theta)$, para as corridas experimentais realizadas



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016

As Tabelas 1 e 2 apresentam as propriedades da função DTR e DTR normalizada, respectivamente.

Tabela 1 – Parâmetros experimentais e propriedades da função DTR

Parâmetros	Corridas Experimentais					
	1	2	3	4	5	6
Parâmetros experimentais						
τ (h)	71,95	144,17	143,67	144,00	215,38	303,74
τ (dias)	3,00	6,01	5,99	6,00	8,97	12,66
Propriedades da função DTR						
t_m (h)	46,12	96,17	103,30	114,69	168,02	299,19
σ^2 (h ²)	896,82	4389,44	5083,14	4239,19	14923,06	35188,89
s^3 (h ³)	120,99	523,13	486,52	489,21	1211,64	2804,87

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016

Tabela 2 – Parâmetros experimentais e propriedades da função DTR normalizada

Parâmetros	Corridas Experimentais					
	1	2	3	4	5	6
Parâmetros experimentais						
τ (h)	71,95	144,17	143,67	144,00	215,38	303,74
τ (dias)	3,00	6,01	5,99	6,00	8,97	12,66
Propriedades da função DTR normalizada						
θ_m	0,64	0,67	0,72	0,80	0,78	0,98
σ_θ^2	0,17	0,21	0,25	0,20	0,32	0,38
s_θ^3	0,20	0,30	0,28	0,28	0,38	0,53

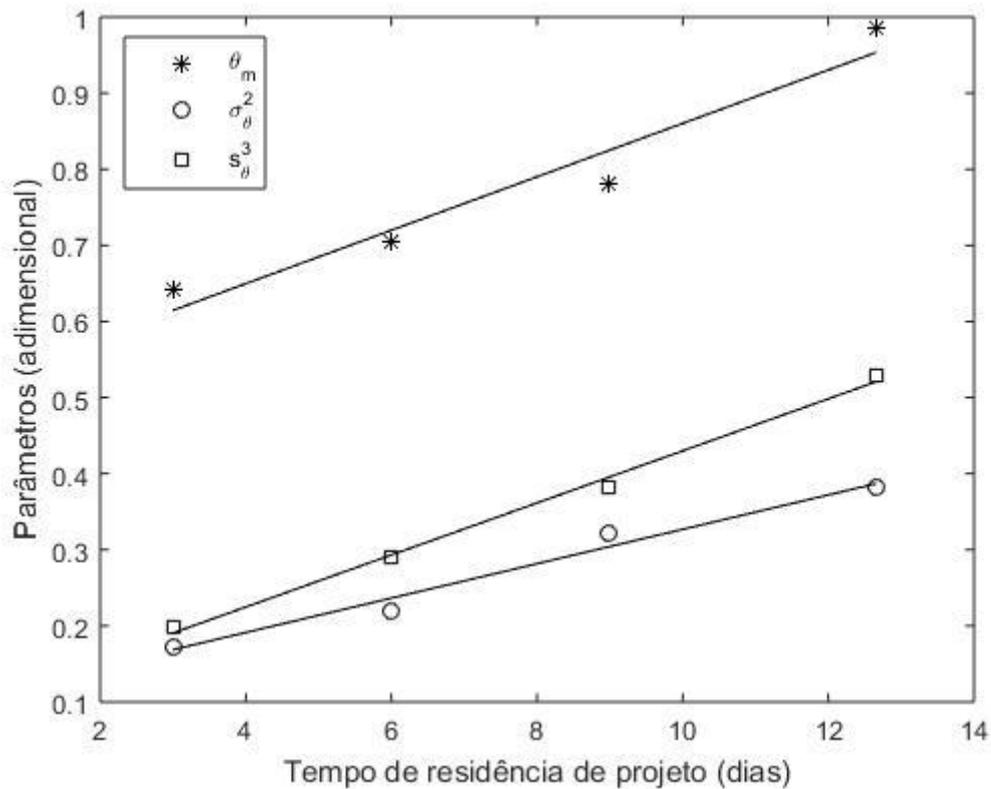
Fonte: Elaborado pelo autor, 2016

Ao avaliar-se o tempo de residência médio normalizado obtido experimentalmente, constata-se que o mesmo é inferior a 1 para todas as corridas experimentais realizadas, indicando uma provável existência de volume morto do reator. Percebe-se um aumento das propriedades normalizadas da função DTR, tanto para tempo de residência, quanto para variância e assimetria. O aumento do tempo de residência normalizada indica um provável aumento do volume morto com o aumento do tempo de residência de projeto. Já o aumento da variância normalizada indica que quanto maior o tempo de residência de projeto, maior é a dispersão da distribuição. Por fim, o aumento da assimetria normalizada, representa que, quanto maior o tempo de residência de projeto, mais o reator se aproxima de um CSTR em detrimento de um PFR, visto que um reator CSTR apresenta assimetria máxima, enquanto um reator PFR apresenta assimetria nula.

5.1.2 Análise Estatística

A Figura 19 apresenta um gráfico onde constam os dados obtidos experimentalmente para as propriedades normalizadas da função DTR e as retas ajustadas por regressão linear, pelo método dos mínimos quadrados. Para os experimentos 2,3 e 4, e como estes correspondem ao mesmo tempo de residência, na análise estatística foi utilizado o valor médio dos parâmetros.

Figura 19 – Regressão linear para as propriedades da DTR normalizada em função do tempo de residência de projeto



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016

As Equações 5.1 a 5.3 apresentam as equações das retas exibidas na Figura 19, assim com os coeficientes de determinação R^2 . O valor do tempo de residência de projeto deve ser inserido na equação em dias, para obtenção do parâmetro na forma adimensional.

$$\theta_m = 0,509 + 0,035 \tau \quad R^2 = 0,942 \quad (5.1)$$

$$\sigma_\theta^2 = 0,101 + 0,023 \tau \quad R^2 = 0,976 \quad (5.2)$$

$$s_\theta^3 = 0,088 + 0,034 \tau \quad R^2 = 0,995 \quad (5.3)$$

Para todos os parâmetros avaliados, houve um coeficiente de determinação R^2 considerado satisfatório, indicando que as propriedades da função DTR analisadas

podem ser determinadas por equação de primeira ordem, como função do tempo de residência de projeto, para o intervalo entre 3 e 12 dias.

Foi realizada uma análise de Variância (ANOVA), de modo a analisar o efeito do parâmetro experimental de tempo de residência de projeto, na função DTR adimensional. Os parâmetros da DTR normalizado utilizados para esta análise foram o tempo de residência médio, variância e assimetria. Para o estabelecimento do erro experimental, foram utilizados os dados das corridas experimentais 2,3 e 4, os quais foram conduzidos com tempo de residência de projeto de 6 dias.

Os testes realizados corresponderam a: Teste (a) - τ , comparação entre 3 e 6 dias (experimento 1 vs. média dos resultados dos experimentos 2,3 e 4); Teste (b) - τ , comparação entre 9 e 6 dias (experimento 5 vs. média dos resultados dos experimentos 2,3 e 4), Teste (c) - τ , comparação entre 12 e 6 dias (experimento 6 vs. média dos resultados dos experimentos 2,3 e 4) e Teste (d) - τ , comparação entre 3 e 12 dias (experimento 1 vs. experimento 6). As variâncias associadas ao erro de cada uma das propriedades da DTR foram comparadas com a variância associada a alteração no parâmetro de tempo de residência de projeto.

A Tabela 3 apresenta os testes estatísticos aplicados e os parâmetros avaliados.

Tabela 3 – Testes estatísticos para comparação da variância associada a alteração no tempo de residência de projeto do reator com a variância experimental

Parâmetro	Fonte de Variação				Erro experimental
	Teste (a)	Teste (b)	Teste (c)	Teste (d)	
Tempo de residência normalizado - θ_m					
Soma dos quadrados	0,0075	0,0028	0,066	0,12	0,0085
Graus de liberdade	1	1	1	1	2
F-valor	1,76	0,65	15,64	27,91	-
p-valor	0,32	0,50	0,58	0,034	-
Decisão*	NS	NS	NS	S	-
Variância normalizada da distribuição - σ_θ^2					
Soma dos quadrados	0,0022	0,010	0,026	0,043	0,0010
Graus de liberdade	1	1	1	1	2
F-valor	4,45	20,24	51,22	85,86	-
p-valor	0,17	0,046	0,019	0,011	-
Decisão*	NS	S	S	S	-
Assimetria normalizada - s_θ^3					
Soma dos quadrados	0,0083	0,0088	0,058	0,11	0,0053
Graus de liberdade	1	1	1	1	2
F-valor	3,10	3,30	21,64	41,12	-
p-valor	0,22	0,21	0,043	0,024	-
Decisão*	NS	NS	S	S	-

* Considerando um nível de confiança de 95%

S - Significativo

NS - Não-significativo

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016

O F-valor indica o Parâmetro de Fisher para razão entre duas variâncias. O p-valor apresenta a probabilidade da hipótese nula (variabilidade associada ao teste não ser significativamente diferente do erro experimental) ser verdadeira. A decisão foi

tomada com base em um nível de confiança de 95% para análise de variância das variáveis resposta. Para os casos de p-valor $> 0,05$, há uma fraca evidência (não-significativa) contra a hipótese nula, de modo que esta não é rejeitada, enquanto para os caso de p-valor $\leq 0,05$, há evidência significativa, de modo que a hipótese nula é rejeitada.

Com base nos resultados apresentados na Tabela 3, as corridas experimentais realizadas foram estatisticamente diferentes entre si, sendo os dados experimentais separados em quatro conjuntos para análise, um referente ao agrupamento dos experimentos 2,3 e 4, que correspondem ao mesmo tempo de residência de projeto (6 dias), e outros três conjuntos, um para cada conjunto de dados experimentais referentes a tempos de residência de projeto distintos (3, 9 e 12 dias).

5.2 MODELAGEM MATEMÁTICA

Os modelos para os quais foram ajustados os resultados experimentais, pertencem ao modelo dispersivo, sendo eles: i) Modelo de dispersão de pequena intensidade; ii) Modelo do sistema open-open; iii) Modelo do sistema semi-open e iv) Modelo do sistema closed closed.

O quadro 3 apresenta um resumo dos modelos aplicados, abordando as respectivas funções $E(\theta)$ e o número de Peclet obtido a partir da variância normalizadas e parâmetro de volume morto (ambos adquiridos experimentalmente).

Quadro 3 – Quadro resumo dos modelos aplicados

Modelo	Função $E(\theta)$	Pe_0
i	$E(\theta) = \frac{e^{\left[-\frac{(1-\frac{\theta}{\alpha})^2 Pe}{4}\right]}}{2\sqrt{\frac{\pi}{Pe}}}$	$\frac{\sigma_\theta^2}{\alpha^2} = \frac{2}{Pe}$
ii	$E(\theta) = \frac{e^{\left[-\frac{(1-\frac{\theta}{\alpha})^2 Pe \alpha}{4\theta}\right]}}{2\sqrt{\frac{\pi\theta}{Pe \alpha}}}$	$\frac{\sigma_\theta^2}{\alpha^2} = \frac{2Pe + 8}{Pe^2}$
iii	$E(\theta) = \frac{e^{\left[-\frac{(1-\frac{\theta}{\alpha})^2 Pe \alpha}{4\theta}\right]}}{2\sqrt{\frac{\pi\theta^3}{Pe \alpha^3}}}$	$\frac{\sigma_\theta^2}{\alpha^2} = \frac{2Pe + 3}{Pe^2}$
iv	$E(\theta)$ $= e^{\left[\frac{Pe}{2}\left(1-\frac{\theta}{2\alpha}\right)\right]} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\lambda_n [Pe \operatorname{sen}(\lambda_n) + 2\lambda_n \operatorname{cos}(\lambda_n)] e^{\left(-\frac{\lambda_n^2}{Pe \alpha} \theta\right)}}{\left(\frac{Pe^2}{4} + Pe + \lambda_n^2\right)}$ $tg(\lambda_n) = \frac{4\lambda_n + Pe^2}{4Pe}$	$\frac{\sigma_\theta^2}{\alpha^2}$ $= \frac{2}{Pe^2} (Pe - 1 + e^{-Pe})$

Fonte: Adaptado de LEVENSPIEL, 2000; MAVROS, 1992 e NAMÈCHE e VASSEL, 1996.

Primeiramente, os modelos foram avaliados utilizando-se o parâmetro de volume morto (obtido experimentalmente) e o número de Peclet (obtido através do variância normalizada experimental). Após, foram aplicados aos modelos os parâmetros obtidos através do ajuste não-linear.

5.2.1 Avaliação dos modelos a partir das propriedades da DTR

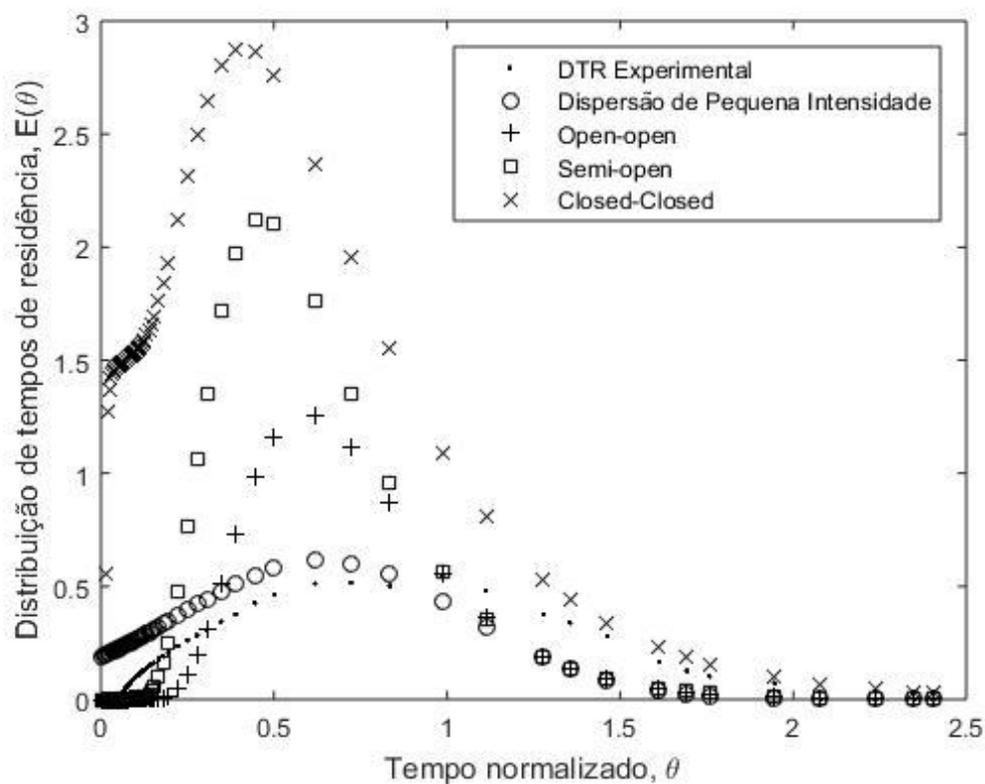
A Tabela 4 apresenta os parâmetros obtidos experimentalmente para os quatro modelos referentes ao experimento 1, enquanto a Figura 20 representa graficamente a função $E(\theta)$ referente aos modelos analisados para o experimento.

Tabela 4 – Ajuste de parâmetros e coeficientes de determinação para os dados da corrida experimental 1

Modelo	Pe	α	R^2	$R^2_{ajustado}$
i	4,75	0,64	-0,064	-0,081
ii	12,28	0,64	-0,60	-0,63
iii	9,25	0,64	-8,30	-8,45
iv	6,21	0,64	-80,59	-81,88

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016

Figura 20 – Gráfico contendo as curvas DTR normalizadas geradas pelos modelos para ajuste dos dados da corrida experimental 1



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016

Para o experimento 1, inserindo os parâmetros obtidos a partir dos dados experimentais, todos os modelos avaliados apresentaram coeficientes de determinação negativos, o que não apresenta sentido físico, sendo então descartados.

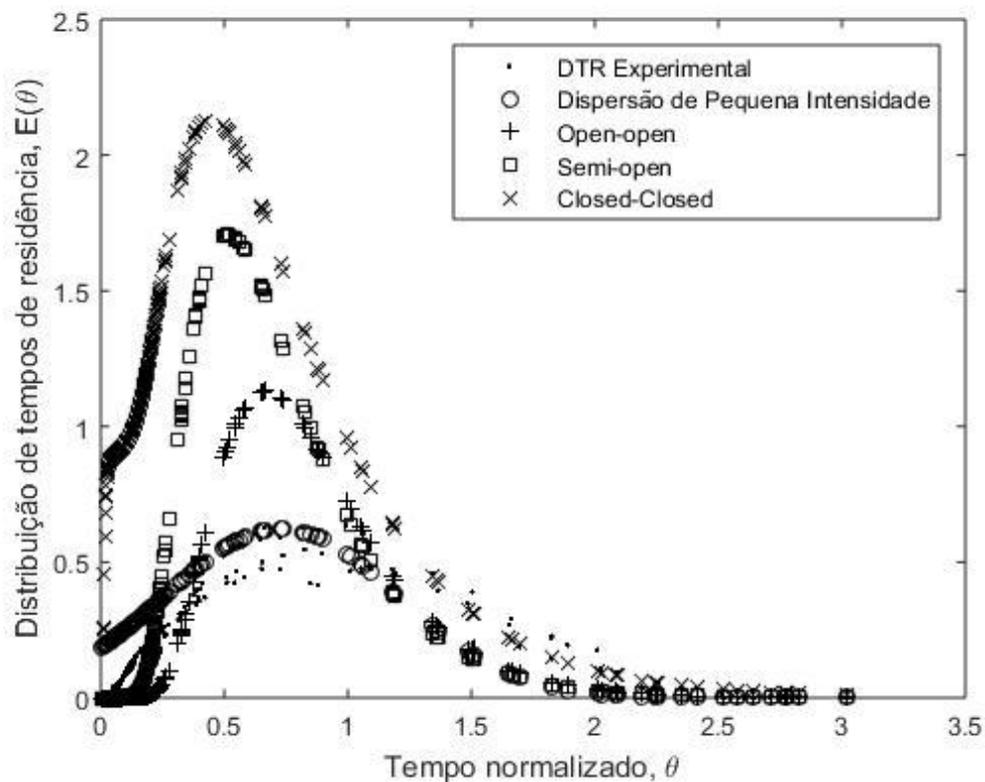
A Tabela 5 apresenta os parâmetros obtidos experimentalmente para os quatro modelos referentes ao agrupamento dos experimentos 2,3 e 4, enquanto a Figura 21 representa graficamente a função $E(\theta)$ referente aos modelos analisados para os experimentos.

Tabela 5 – Ajuste de parâmetros e coeficientes de determinação para os dados da corridas experimentais 2,3 e 4

Modelo	Pe_{mod}	α_{exp}	R^2	$R^2_{ajustado}$
i	4,88	0,73	-0,35	-0,36
ii	11,22	0,73	0,00080	-0,0022
iii	8,34	0,73	-3,63	-3,65
iv	5,42	0,73	-37,45	-37,57

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016

Figura 21 – Gráfico contendo as curvas DTR normalizadas geradas pelos modelos para ajuste dos dados das corridas experimentais 2,3 e 4



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016

Para o agrupamento dos experimentos 2,3 e 4, inserindo os parâmetros obtidos a partir dos dados experimentais, todos os modelos avaliados apresentaram coeficientes de determinação negativos, o que não apresenta sentido físico, sendo então descartados.

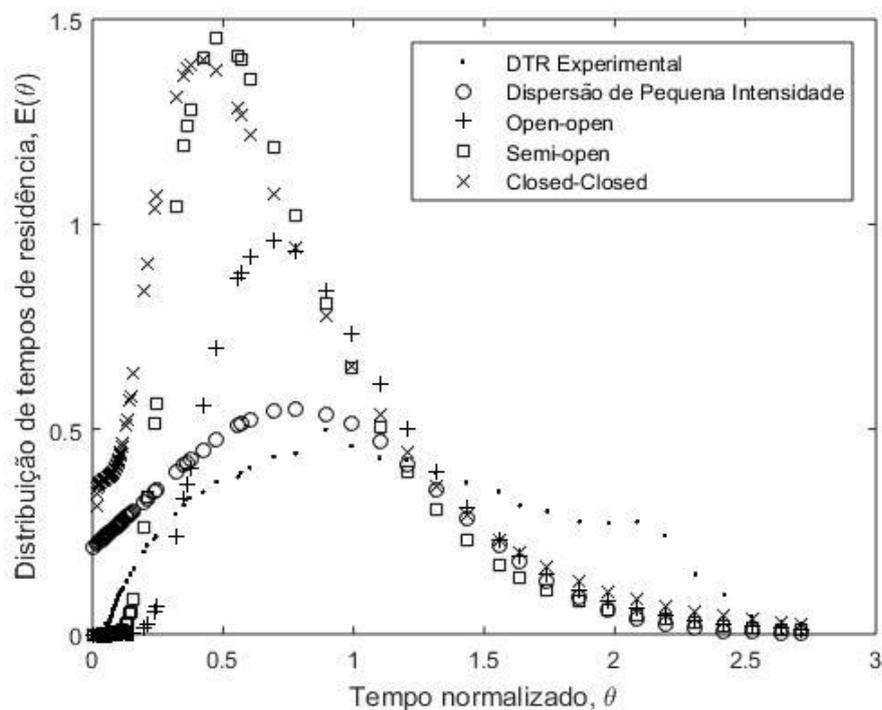
A Tabela 6 apresenta os parâmetros obtidos experimentalmente para os quatro modelos referentes ao experimento 5, enquanto a Figura 22 representa graficamente a função $E(\theta)$ referente aos modelos analisados para o experimento.

Tabela 6 – Ajuste de parâmetros e coeficientes de determinação para os dados da corrida experimental 5

Modelo	Pe_{mod}	α_{exp}	R^2	$R^2_{ajustado}$
i	3,78	0,78	-0,37	-0,39
ii	8,52	0,78	-0,19	-0,21
iii	6,18	0,78	-4,35	-4,41
iv	3,51	0,78	-8,76	-8,88

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016

Figura 22 – Gráfico contendo as curvas DTR normalizadas geradas pelos modelos para ajuste dos dados da corrida experimental 5



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016

Para o experimento 6, inserindo os parâmetros obtidos a partir dos dados experimentais, todos os modelos avaliados apresentaram coeficientes de determinação negativos, o que não apresenta sentido físico, sendo então descartados.

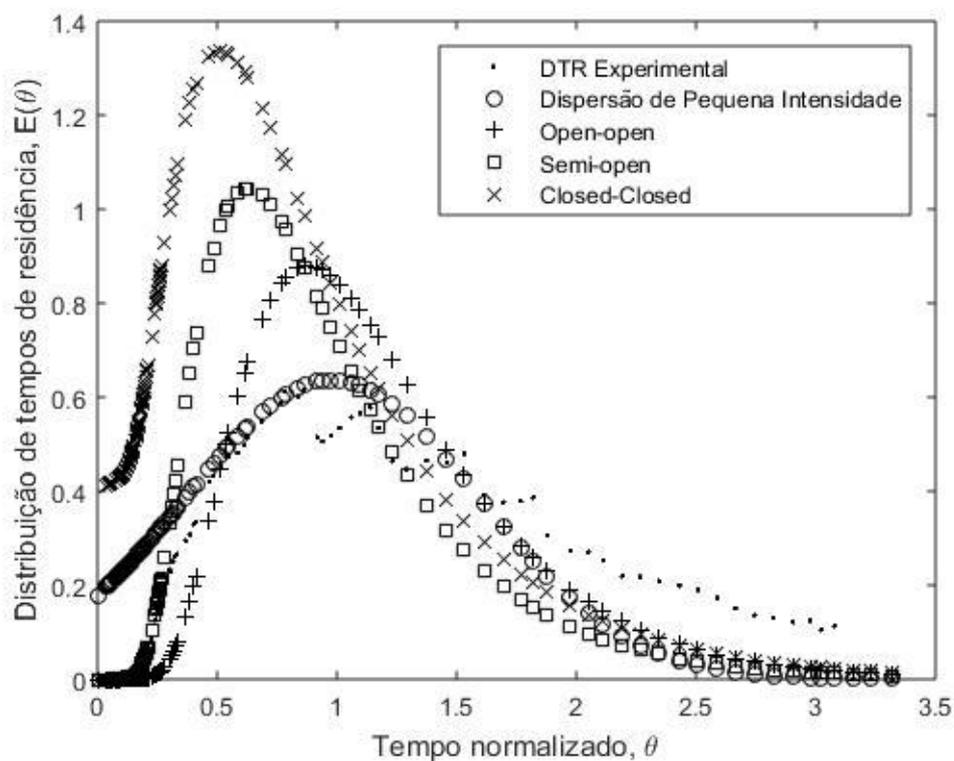
A Tabela 7 apresenta os parâmetros obtidos experimentalmente para os quatro modelos referentes ao experimento 6, enquanto a Figura 23 representa graficamente a função $E(\theta)$ referente aos modelos analisados para o experimento.

Tabela 7 – Ajuste de parâmetros e coeficientes de determinação para os dados da corrida experimental 6

Modelo	Pe_{mod}	α_{exp}	R^2	$R^2_{ajustado}$
i	5,09	0,98	0,14	0,13
ii	9,02	0,98	0,62	0,62
iii	6,55	0,98	0,18	0,17
iv	3,85	0,98	-6,12	-6,17

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016

Figura 23 – Gráfico contendo as curvas DTR normalizadas geradas pelos modelos para ajuste dos dados da corrida experimental 6



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016

Para o experimento 6, inserindo os parâmetros obtidos a partir dos dados experimentais, o modelo do sistema closed-closed apresentou coeficientes de determinação negativos, sendo então descartado. Os demais modelos apresentaram coeficientes de determinação positivos, sendo que o modelo do sistema open-open proporcionou o melhor ajuste, com $R^2_{ajustado} = 0,62$.

5.2.2 Avaliação dos modelos a partir de ajuste não-linear dos parâmetros

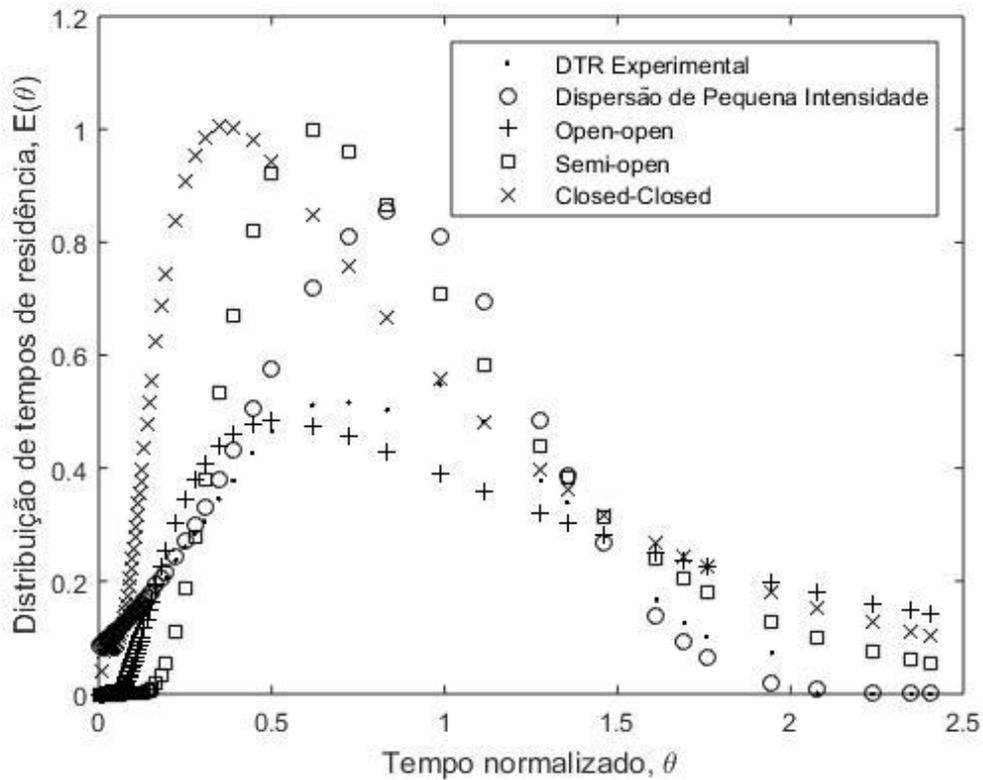
A Tabela 8 apresenta os parâmetros iniciais e os parâmetros ajustados para os quatro modelos referentes aos dados do experimento 1, enquanto a Figura 24 representa graficamente a função $E(\theta)$ referente aos modelos analisados para o experimento.

Tabela 8 – Ajuste de parâmetros e coeficientes de determinação para os dados da corrida experimental 1

Modelo	$Pe_{ajustado}$	$\alpha_{ajustado}$	R^2	$R^2_{ajustado}$
i	9,21	0,85	0,62	0,61
ii	1,94	0,85	0,81	0,81
iii	6,04	1,00	0,07	0,06
iv	1,54	1,00	-2,22	-2,27

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016

Figura 24 – Gráfico contendo as curvas DTR normalizadas geradas pelos modelos para ajuste dos dados da corrida experimental 1



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016

Para o experimento 1, inserindo os parâmetros obtidos a partir do ajuste não-linear, o modelo do sistema closed-closed apresentou coeficientes de determinação negativos, sendo então descartado. Os demais modelos apresentaram coeficientes de determinação positivos, sendo que o modelo do sistema open-open proporcionou o melhor ajuste, com $R_{ajustado}^2 = 0,81$.

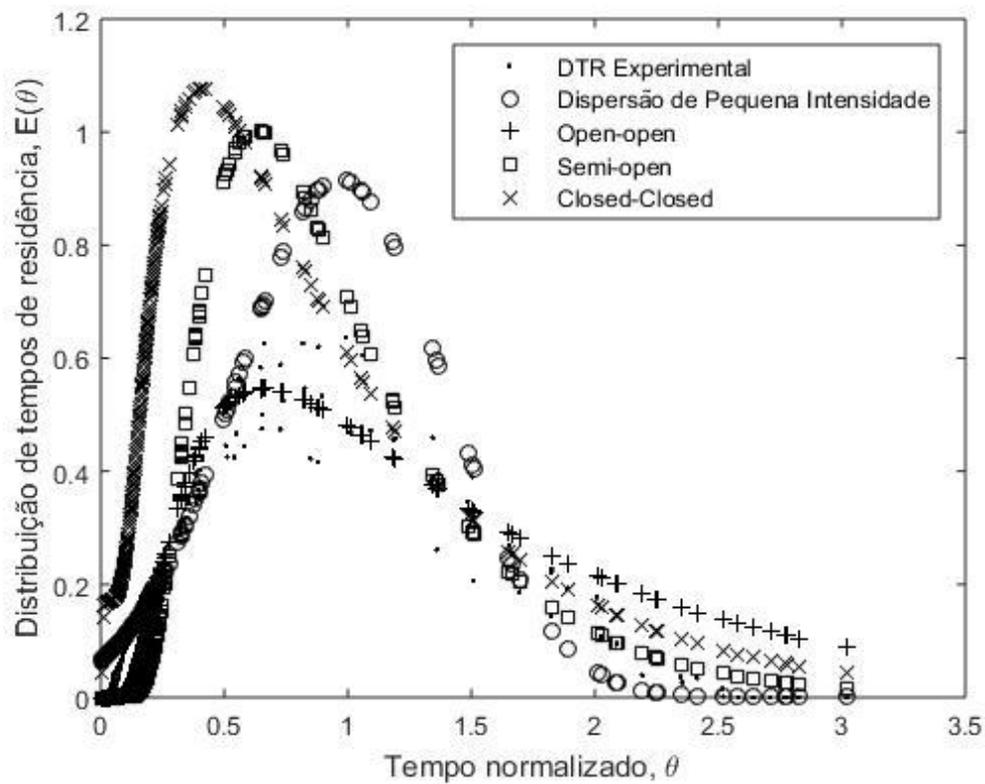
A Tabela 9 apresenta os parâmetros iniciais e os parâmetros ajustados para os quatro modelos referentes ao agrupamento dos dados dos experimentos 2,3 e 4, enquanto a Figura 25 representa graficamente a função $E(\theta)$, referente aos modelos analisados para o conjunto de dados.

Tabela 9 – Ajuste de parâmetros e coeficientes de determinação para os dados da corridas experimentais 2,3 e 4

Modelo	$Pe_{ajustado}$	$\alpha_{ajustado}$	R^2	$R^2_{ajustado}$
i	10,55	0,97	0,55	0,55
ii	2,92	0,92	0,87	0,87
iii	6,20	1,00	0,23	0,23
iv	2,03	1,00	-4,43	-4,45

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016

Figura 25 – Gráfico contendo as curvas DTR normalizadas geradas pelos modelos para ajuste dos dados das corridas experimentais 2,3 e 4



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016

Para o agrupamento dos experimentos 2,3 e 4, inserindo os parâmetros obtidos a partir do ajuste não linear, o modelo do sistema closed-closed apresentou coeficientes de determinação negativos, sendo então descartado. Os demais modelos apresentaram coeficientes de determinação positivos, sendo que o modelo do sistema open-open proporcionou o melhor ajuste, com $R_{ajustado}^2 = 0,87$.

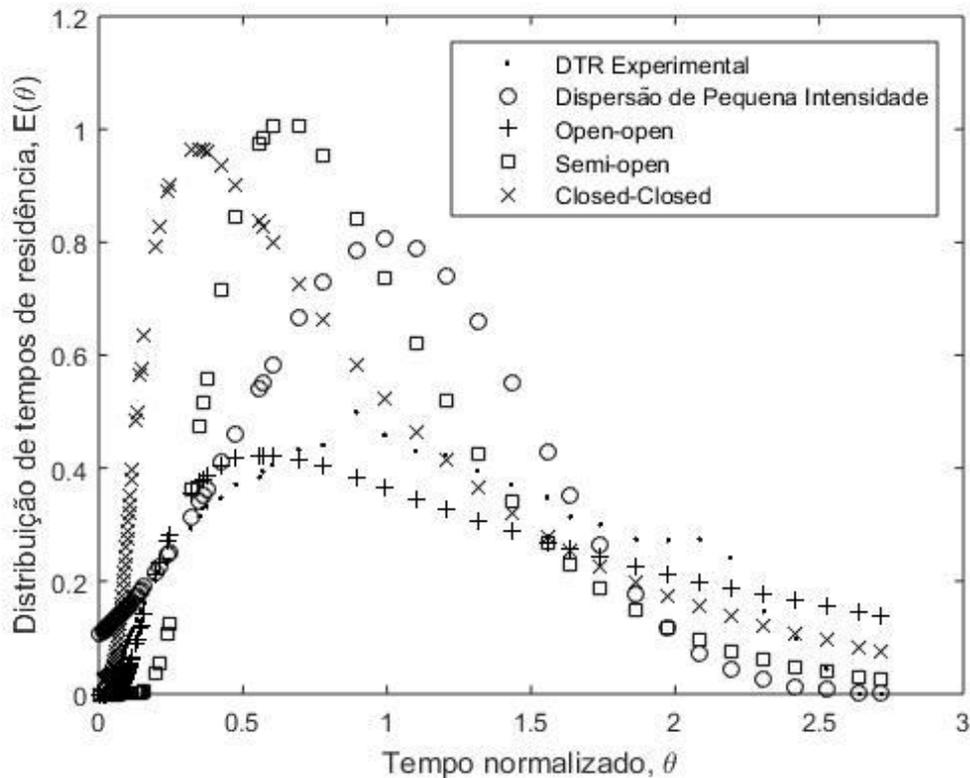
A Tabela 10 apresenta os parâmetros iniciais e os parâmetros ajustados para os quatro modelos referentes aos dados do experimento 5, enquanto a Figura 26 representa graficamente a função $E(\theta)$ referente aos modelos analisados para o experimento.

Tabela 10 - Ajuste de parâmetros e coeficientes de determinação para os dados da corrida experimental 5

Modelo	$Pe_{ajustado}$	$\alpha_{ajustado}$	R^2	$R_{ajustado}^2$
i	8,14	1,00	0,27	0,26
ii	1,67	0,99	0,88	0,88
iii	6,65	1,00	-0,51	-0,52
iv	1,29	1,00	-2,27	-2,31

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016

Figura 26 – Gráfico contendo as curvas DTR normalizadas geradas pelos modelos para ajuste dos dados da corrida experimental 5



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016

Para o experimento 5, inserindo os parâmetros obtidos a partir do ajuste não linear, os modelos dos sistemas semi-open e closed-closed apresentaram coeficientes de determinação negativos, sendo então descartados. Os demais modelos apresentaram coeficientes de determinação positivos, sendo que o modelo do sistema open-open proporcionou o melhor ajuste, com $R_{ajustado}^2 = 0,88$.

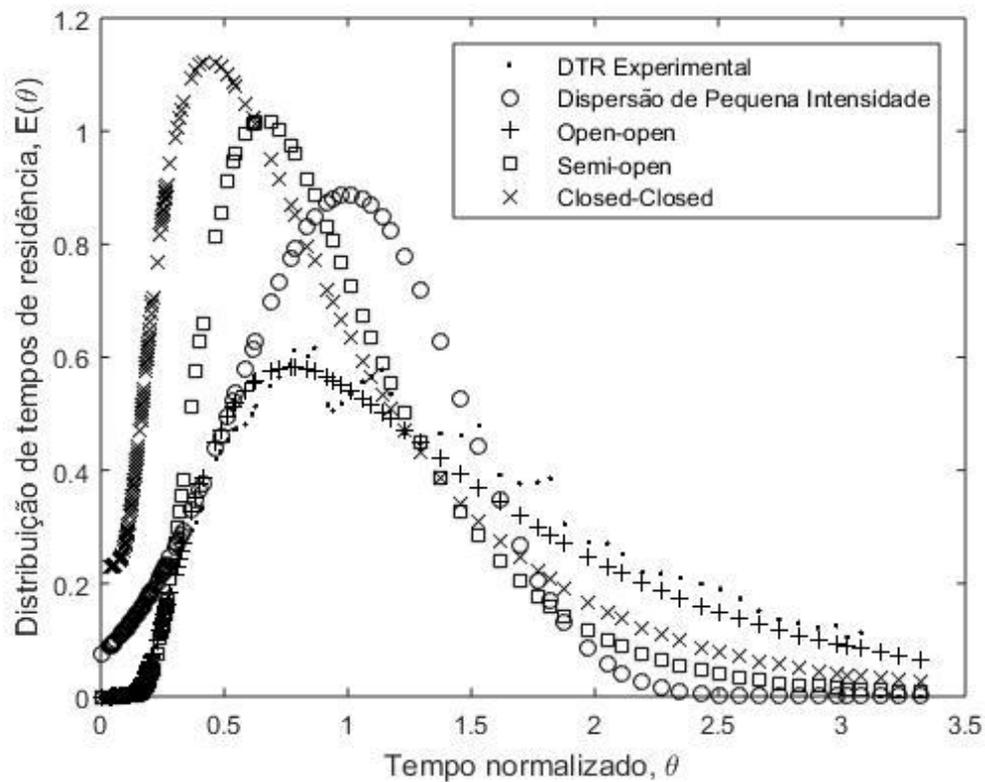
A Tabela 11 apresenta os parâmetros iniciais e os parâmetros ajustados para os quatro modelos referentes aos dados do experimento 6, enquanto a Figura 27 representa graficamente a função $E(\theta)$ referente aos modelos analisados para o experimento.

Tabela 11 - Ajuste de parâmetros e coeficientes de determinação para os dados da corrida experimental 6

Modelo	$Pe_{ajustado}$	$\alpha_{ajustado}$	R^2	$R_{ajustado}^2$
i	9,92	1,00	0,44	0,44
ii	3,73	1,00	0,98	0,98
iii	6,87	1,00	0,29	0,29
iv	2,39	1,00	-4,44	-4,47

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016

Figura 27 – Gráfico contendo as curvas DTR normalizadas geradas pelos modelos para ajuste dos dados da corrida experimental 6



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016

Para o experimento 1, inserindo os parâmetros obtidos a partir do ajuste não linear, o modelo do sistema closed-closed apresentou coeficientes de determinação negativos, sendo então descartado. Os demais modelos apresentaram coeficientes de determinação positivos, sendo que o modelo do sistema open-open proporcionou o melhor ajuste, com $R_{ajustado}^2 = 0,98$.

5.2.3 Determinação do melhor modelo

Ao avaliar-se os parâmetros de volume morto e número de Peclet utilizados, constata-se que, para todos os experimentos realizados e todos os modelos avaliados, os parâmetros obtidos a partir do ajuste não linear, apresentaram melhores coeficientes de determinação em comparação aos parâmetros obtidos a partir das propriedades da DTR experimental, conforme é demonstrado na Tabela 12.

Tabela 12 – Coeficientes de determinação ajustados para os modelos avaliados

Exp	Modelo							
	Dispersão de pequena intensidade		Sistema open- open		Sistema semi- open		Sistema closed-closed	
	$R_{ajus.1}^2$ *	$R_{ajus.2}^2$ **	$R_{ajus.1}^2$	$R_{ajus.2}^2$	$R_{ajus.1}^2$	$R_{ajus.2}^2$	$R_{ajus.1}^2$	$R_{ajus.2}^2$
1	-0,081	0,61	-0,63	0,81	-8,45	0,006	-81,88	-2,27
2,3 e 4	-0,36	0,55	-0,0022	0,87	-3,65	0,23	-37,57	-4,45
5	-0,39	0,26	-0,21	0,88	-4,41	-0,52	-8,88	-2,31
6	0,13	0,44	0,62	0,98	0,17	0,29	-6,17	-4,47

* $R_{ajustado}^2$ para a curva gerada a partir das propriedades da DTR experimental

** $R_{ajustado}^2$ para a curva gerada a partir do ajuste não-linear dos parâmetros

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016

O modelo do sistema open-open, considerando os parâmetros obtidos a partir do ajuste não linear, foi o que apresentou os melhores coeficientes de determinação ajustados para todas as corridas experimentais, entre 0,81 e 0,98. Embora apresente um bom ajuste para a função $E(\theta)$, os parâmetros ajustados para este modelo, número de Peclet e parâmetro de volume morto, são muito distintos dos obtidos experimentalmente. O número de Peclet ajustado mostrou-se, em todos os casos, inferior ao obtido através da variância normalizada, enquanto o parâmetro de volume morto ajustado mostrou-se superior ao experimental em todos os casos.

5.2.4 Correlações entre os parâmetros

Para determinar-se correlações entre os parâmetros ajustados, associados ao modelo do sistema open-open (que foi selecionado como o melhor ajuste), e ao tempo de residência de projeto, utilizou-se interpolação numérica através do método de Lagrange. A Tabela 13 apresenta os parâmetros de volume morto e número de Peclet, obtidos a partir do ajuste não linear para o modelo do sistema open-open.

Tabela 13 – Parâmetros obtidos a partir do ajuste não-linear para o modelo do sistema open-open

Exp	τ (h)	Pe	α
1	3,00	1,94	0,84
2,3 e 4	6,00	2,92	0,92
5	8,97	1,67	0,99
6	12,66	3,73	1,00

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016

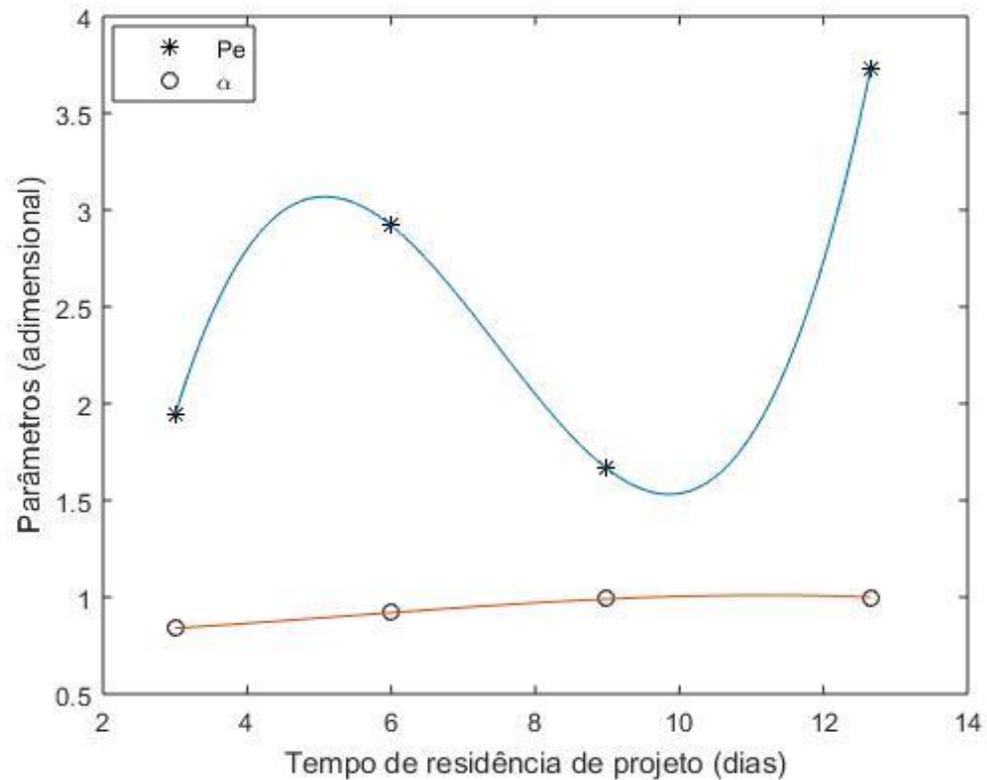
Com a realização da interpolação numérica, foram obtidas as Equações 5.1 e 5.2. A Equação 5.1 corresponde ao polinômio que correlaciona o número de Peclet com tempo de residência de projeto, enquanto a Equação 5.2 corresponde ao polinômio que correlaciona o parâmetro de volume morto com tempo de residência de projeto. O intervalo para o qual estas equações são válidas, corresponde ao tempo de residência de projeto das corridas experimentais, ou seja, entre 3,00 e 12,66 dias.

$$Pe = 0,028 \tau^3 - 0,63 \tau^2 + 4,23 \tau - 5,83 \quad (5.1)$$

$$\alpha = -0,00027 \tau^3 + 0,0043 + 0,0048 \tau + 0,79 \quad (5.2)$$

A Figura 28 representa graficamente os parâmetros ajustados e os polinômios interpoladores obtidos.

Figura 28 – Correlações entre os parâmetros obtidos a partir do ajuste não-linear para o modelo do sistema open-open e tempo de residência de projeto



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016

5.3 APLICAÇÃO DO MODELO PARA O DIMENSIONAMENTO DE REATORES

Para o dimensionamento de reatores tipo lagoa anaeróbia em estudo, foi considerada uma reação de primeira ordem.

Levenspiel (2000) apresenta o balanço material em termos da conversão fracional para um reagente A, considerando a existência de reação química e dispersão, conforme descrito pela Equação 5.3. Esta expressão demonstra que a conversão do reagente A, à medida que este passa pelo reator, é governada por três grupos adimensionais: i) grupo de velocidade de reação ($k\tau C_{A0}^{n-1}$); ii) grupo de dispersão ($\frac{1}{Pe}$); e iii) ordem da reação (n).

$$\frac{1}{Pe} \frac{d^2 X_A}{dz^2} - \frac{dX_A}{dz} + k\tau C_{A0}^{n-1} (1 - x_A)^n = 0 \quad (5.3)$$

Wehner e Wilhelm (1956) resolveram analiticamente a Equação 5.3, considerando reações de primeira ordem. A expressão obtida para a conversão pode ser utilizada independentemente das condições de contorno, sendo demonstrada pelas Equações 5.4 e 5.5.

$$X = 1 - \frac{4 a e^{\left(\frac{Pe}{2}\right)}}{(1+a)^2 e^{\left(\frac{a Pe}{2}\right)} - (1-a)^2 e^{\left(-\frac{a Pe}{2}\right)}} \quad (5.4)$$

$$a = \sqrt{1 + \frac{4k\tau}{Pe}} \quad (5.5)$$

O número de Peclet, presente na equação da conversão, pode ser substituído pelo número de Peclet definido pela Equação 5.1. A partir da definição da conversão (X) que se deseja obter e da constante de velocidade da reação (k), deve-se aplicar algum método numérico para obtenção do tempo de residência de projeto.

Após definido o tempo de residência de projeto, e conhecendo-se a vazão volumétrica do reagente (v_0), pode-se determinar o volume do reator através da Equação 5.6. O parâmetro de volume morto pode ser substituído pelo valor definido pela Equação 5.2.

$$V = \frac{\tau v_0}{\alpha} \quad (5.7)$$

Após definido o volume projetado para o reator, a largura do reator pode ser definida por meio da Equação 4.2. Substituindo-se as correlações geométricas adotadas, esta equação pode ser simplificada, obtendo-se a Equação 5.7.

$$D = 1,6636 V^{\frac{1}{3}} \quad (5.6)$$

Os demais parâmetros geométricos do reator são obtidos a partir das correlações adotadas: $L/D = 2:1$ e $H/D = 1:4$. A inclinação do talude é fixa, correspondendo a $(\phi)=1:2$.

6 CONCLUSÕES

Diante do quadro em que o Brasil está inserido, de déficit sanitário, é fundamental o incentivo ao desenvolvimento e aprimoramento de tecnologias que apresentem viabilidade técnica e financeira. Conforme exposto ao longo do trabalho, a aplicação de lagoas anaeróbias para o tratamento de efluentes de elevada carga orgânica, como o esgoto doméstico e efluentes de suinocultura, trata-se de uma solução atrativa, visto que o custo é acessível e possui simplicidade operacional.

A inserção de chicanas aproxima o comportamento de reatores tipo lagoa ao comportamento do fluxo de pistão, que corresponde ao limite teórico ideal. Com isto, ocorre uma redução no tempo de residência necessário, acarretando em uma minimização do volume da lagoa e redução dos custos de implantação e manutenção.

Diversas anomalias implicam que o comportamento hidrodinâmico de uma lagoa difere de um reator ideal. Deste modo, a execução de corridas experimentais com traçador inerte e diferentes condições de funcionamento do protótipo, permitem investigar como estes desvios da idealidade afetam o comportamento hidrodinâmico do sistema e o desenvolvimento e/ou aplicação de modelos que possam incorporar novos parâmetros e prever com maior precisão a curva da DTR.

Para projetar um reator tipo lagoa é fundamental conhecer e analisar os comportamentos cinético e hidrodinâmico do reator. A DTR foi obtida experimentalmente através da realização de corridas experimentais, abrangendo tempos de residência de projeto entre 3 e 12 dias. Também ocorreu a aplicação de modelos teóricos de dispersão, os quais foram avaliados quanto à sua capacidade de prever o comportamento hidrodinâmico do reator.

Através da realização de análise de variância (ANOVA), pode-se separar os dados obtidos experimentalmente em quatro conjuntos, agrupando os dados referentes ao tempo de residência de projeto de 6 dias, além dos dados correspondentes ao tempo de residência de projeto de 3, 9 e 12 dias, que apresentaram diferença estatisticamente significativa.

O modelos propostos foram avaliados tanto com a inserção de parâmetros obtidos a partir da DTR experimental, quanto com parâmetros obtidos a partir de ajuste não linear. Para avaliar o poder de predição do modelo, foram determinados os

coeficientes de determinação, R^2 , entre a DTR experimental e a curva definida pelo modelo, e $R^2_{ajustado}$, que incorpora o número de parâmetros utilizados.

Dentre os modelos avaliados, o que apresentou um melhor ajuste aos dados experimentais para todas as corridas experimentais realizadas, foi o modelo do sistema open-open, com a inserção dos parâmetros de volume morto e número de Peclet, obtidos a partir do ajuste não linear. Este modelo considera que há continuidade de fluxo, tanto na entrada como na saída do reator, e continuidade de concentração na saída.

A aplicação do modelo proposto, ao passo que apresenta coeficientes de determinação ajustados considerados satisfatórios, na faixa entre 0,81 e 0,98 para as corridas experimentais realizadas, auxilia a um dimensionamento mais preciso de reatores tipo lagoa anaeróbia, ao inserir parâmetros que não são usualmente utilizados (a presença de volume morto e dispersão axial do material). Ignorando-se os efeitos de escala, esta metodologia pode ser aplicada para o projeto de reatores similares.

REFERÊNCIAS

ABBAS, H.; NASR, R.; SEIF, H.. Study of waste stabilization pond geometry for the wastewater treatment efficiency. **Ecological Engineering**, v. 28, n. 1, p. 25-34, 2006.

AZEREDO, S. V. de. **Modelagem hidrodinâmica de decantador primário de esgotos utilizando-se a técnica de traçadores**. 127 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1985.

CAETANO, M. O. **Aplicação de reator de chicanas no tratamento de lixiviados de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos para remoção de nitrogênio amoniacal por "stripping"**. 2009. 150 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós Graduação em Engenharia Civil, Ciência Exatas e Tecnológicas, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2009.

CHEN, Y. R. Kinetic analysis of anaerobic digestion of pig manure and its design implications. **Agricultural Wastes**, v. 8, n. 2, p. 65-81, 1983.

CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores Anaeróbios. In: Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias**, 2 ed. Minas Gerais: Editora UFMG, 2007.

COLEMAN, T.; LI, Y. An interior trust region approach for nonlinear minimization subject to bounds. **SIAM J. Optimization**, v. 6, n. 2, p. 418-445, Maio 1996.

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. **Biomassa para energia**, Campinas, Editora da Unicamp, 2008.

FERRAZ, F. M.; BRUNI, A. T.; DEL BIANCHI, V. L. Performance of an Anaerobic Baffled Reactor (ABR) in treatment of cassava wastewater. **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 40, n. 1, p. 48-53, 2009.

FOGLER, H. S. **Elementos de Engenharia das Reações Químicas**. 4 ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2009.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Atlas de saneamento 2011**. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão, 2011.

KILANI, J. S.; OGUNROMBI, J. A. Effects of baffles on the performance of model waste stabilization ponds. **Water research**, v. 18, n. 8, p. 941-944, 1984.

LEVENSPIEL, O. **Engenharia das reações químicas**. São Paulo: Edgard Blücher Ltda., 2000.

MAVROS, P. Técnico validade nota e limitações da solução analítica-recipiente fechado para o modelo de dispersão axial. **Engenharia Mineral**, v. 5, n. 9, p. 1053-1060, 1992.

NAMECHE, T.; VASSEL, J. L. New method for studying the hydraulic behaviour of tanks in series--application to aerated lagoons and waste stabilization ponds. **Water Science and Technology**, v. 33, n. 8, p. 105-124, 1996

NIELSON, S. B.; MIDDLEBROOKS, E. J.; PORCELLA, D. B. Effects of Baffles on the Performance of Anerobic Waste Stabilization Ponds. 1973.

OLUKANNI, D. O.; DUCOSTE, J. J. Optimization of waste stabilization pond design for developing nations using computational fluid dynamics. **Ecological Engineering**, [s.l.], v. 37, n. 11, p.1878-1888, nov. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.06.003>.

SASSAKI, R. A. **Distribuição de tempos de residência em sistemas alimentados com vazão variável**. 2005. 89 f. Dissertação (Mestre em Ciências em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

SILVA FILHO, P. A. **Desempenho operacional de lagoas de estabilização**. 2007. 169 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós Graduação em Engenharia Sanitária, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2007.

SILVA, J. L. **Desempenho do Reator Anaeróbio Horizontal com Chicanas no tratamento da manipueira em fases separadas e estabilização do pH com conchas de sururu**. 2009. 99 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2009.

SILVA, J. V. N. **Avaliação da influência de chicanas e das estruturas de entrada e saída no desempenho de lagoas de estabilização.** 2007. 169 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2007.

SILVA, S. A.; JÚNIOR, A. G. B.; OLIVEIRA, R. Efeito de chicanas no desempenho de lagoas de estabilização. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 21., 2001, João Pessoa. **Trabalhos técnicos.** João Pessoa: Abes, 2001. p. 1 - 6.

VON SPERLING, M. Níveis, processos e sistemas de tratamento de esgotos. In: VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos.** 3. ed. v. 1 Belo Horizonte: Editora UFMG, 2005. Cap. 4. p. 249-339. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias).

VON SPERLING, M. **Lagoas de estabilização.** 2. ed. v. 3. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2002. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias).

WENZEL, B. M. **Cinética aplicada e cálculo de reatores.** 2015. Notas de aula.

WENZEL, B. M.; MUMBACH, G. D.; LENZ, D. L. G. **Hydrodynamic non-idealities of pond-type (bio)reactors can be modeled as a series of stirred tanks.** Artigo submetido para publicação. 2016.

WEHNER, J. F.; WILHELM, R. H. Boundary conditions of flow reactor. **Chemical engineering science**, v. 6, n. 2, p. 89-93, 1956.