

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

JOSÉ BRASÍLIO SCHEREMETA LINO

PROCEDIMENTOS DE BASE APLICADOS A UM MODELO DE REATOR EM UM  
SISTEMA DE AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DE SINAIS PARA DIAGNÓSTICO  
HIDRODINÂMICO

PONTA GROSSA

2021

JOSÉ BRASÍLIO SCHEREMETA LINO

PROCEDIMENTOS DE BASE APLICADOS A UM MODELO DE REATOR EM UM  
SISTEMA DE AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DE SINAIS PARA DIAGNÓSTICO  
HIDRODINÂMICO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade da Universidade Estadual de Ponta Grossa como requisito para obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Rogério Szeliga

PONTA GROSSA  
2021

L758 Lino, José Brasília Scheremeta  
Procedimentos de base aplicados a um modelo de reator em um sistema de aquisição e processamento de sinais para diagnóstico hidrodinâmico / José Brasília Scheremeta Lino. Ponta Grossa, 2021.  
104 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária e Ambiental - Área de Concentração: Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos), Universidade Estadual de Ponta Grossa.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Rogério Szeliga.

1. Aquisição e processamento de sinais. 2. Traçador eletrolítico. 3. Diagnóstico hidrodinâmico. I. Szeliga, Marcos Rogério. II. Universidade Estadual de Ponta Grossa. Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos. III.T.

CDD: 628.4



**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
EM ENGENHARIA SANITÁRIA E  
AMBIENTAL**

Certificado nº 01/2021 PPGESA



**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO - DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

Título da Dissertação: **“PROCEDIMENTOS DE BASE APLICADOS A UM MODELO DE REATOR EM UM SISTEMA DE AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DE SINAIS PARA DIAGNÓSTICO HIDRODINÂMICO”**

Nome: **JOSÉ BRASÍLIO SCHEREMETA LINO**

Orientador: **Prof. Dr. Marcos Rogério Széliga**

Aprovado pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Marcos Rogério Széliga  
UEPG – Ponta Grossa – PR

Prof. Dr. José Junji Ota  
UFPR – Curitiba – PR

Prof. Dr. Guilherme Araújo Vuitik  
UEPG – Ponta Grossa – PR

Ponta Grossa, 30 de abril de 2021.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Estadual de Ponta Grossa, à coordenação e aos professores do curso.

Ao Prof. Dr. Marcos Rogério Szeliga, pela amizade, dedicação e imensa contribuição com seus conhecimentos na orientação deste trabalho, pela confiança em mim depositada e pelo auxílio diante de todas as dificuldades, sem o que jamais teria conseguido superar esta etapa.

Aos meus pais Marinete e Delane, à minha irmã Manoela e aos meus sobrinhos – Mariana, Mateus e João Pedro – por todo afeto, apoio, incentivo e pelos momentos de alegria, desde o início desta caminhada.

Aos colegas do curso, pelo companheirismo, pelos debates e pelas experiências compartilhadas durante as aulas.

Aos professores do Programa junto à Universidade Estadual do Centro-Oeste (UNICENTRO), Campus de Irati, pelas disciplinas ministradas e por compartilhar seus conhecimentos.

Aos amigos Heder e Carlos, pelo auxílio no desenvolvimento dos ensaios no laboratório.

À colega Larissa A. pela contribuição na formatação deste trabalho.

Aos demais que direta ou indiretamente contribuíram para o desenvolvimento desta pesquisa.

A Deus, pela vida, por cuidar dos meus passos e iluminar minha trajetória.

Só sabemos com exatidão quando sabemos pouco; à medida que vamos adquirindo conhecimentos, instala-se a dúvida.

(Johann Wolfgang von Goethe)

## RESUMO

Tecnologias de aquisição e processamento de dados que proporcionem maior e melhor entendimento de processos físicos úteis para o desenvolvimento de produtos aplicados em processos industriais contemplam requisições básicas para suprimento de necessidades no desenvolvimento da sociedade. Nesta linha, este trabalho consistiu em investigar e operar experimentalmente um sistema de aquisição de sinais, processamento de dados e saída de informações para o diagnóstico hidrodinâmico do escoamento no interior de um modelo base de um reator utilizado no tratamento de águas e efluentes. O sistema compreende uma malha de sensores com sinais elétricos capturados no interior do modelo de reator ao qual foi imposto um escoamento de diluição contínua e injeção de traçador eletrolítico. A propagação da massa de traçador é registrada em intervalos de tempo e traduzida na forma de descritivos gráficos, numéricos e por produção computacional de imagens internas do volume estudado. Com o emprego dessa metodologia foi possível validar ensaios, constando de recuperação de massa, modelagem de concentrações e suas distribuições, avaliações de tempo de permanência da massa, bem como proporcionar ferramentas de visualização do deslocamento da massa no volume interno do modelo de reator na intenção de detectar características internas do escoamento e das eventuais interferências que possam ser úteis na melhoria da eficiência dos equipamentos.

**Palavras-Chave:** Aquisição e processamento de sinais, Traçador eletrolítico; Diagnóstico Hidrodinâmico.

## ABSTRACT

Technologies for data acquisition and processing that provide greater and better understanding of physical processes useful for the development of products applied in industrial processes include basic requirements for meeting needs in the development of society. Thus, this work consisted of investigating and experimentally operating a system of sign acquisition, data processing and information output for the hydrodynamic diagnosis of flow in a base model of a reactor used in the treatment of water and effluents. The system comprises a net of sensors with electrical signals captured inside the reactor model, to which was imposed a flow of continuous dilution and injection of an electrolytic tracer. The propagation of the tracer mass is recorded in time intervals and translated into graphic, numerical descriptive and computational production of internal images of the studied volume. With the use of this methodology, it was possible to validate tests, consisting of mass recovery, modeling of concentrations and their distributions, evaluations of time of permanence of the mass, as well as providing tools to visualize the displacement of the mass in the internal volume of the reactor model in the intention to detect internal flow characteristics and any interference that may be useful in improving the efficiency of the equipment.

**Keywords:** Signal acquisition and processing, Electrolytic tracer; Hydrodynamic Diagnosis.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – (A) Vista externa da bancada em fase de montagem para operação; (B) Vista interna com as conexões e a malha de eletrodos .....	31
Figura 2 – Coordenadas de eletrodos no nível 0 – 0 cm da base do tanque .....	32
Figura 3 – Coordenadas de eletrodos no nível 1 – 7,5 cm da base do tanque .....	32
Figura 4 – Coordenadas de eletrodos no nível 2 – 15 cm da base do tanque .....	33
Figura 5 – Coordenadas de eletrodos no nível 3 – 22,5 cm da base do tanque .....	33
Figura 6 – Coordenadas de eletrodos no nível 4 – 30 cm da base do tanque .....	34
Figura 7 – Controle por comutação e registro de sinais .....	34
Figura 8 – Esquema de instalação da bancada de ensaios .....	35
Figura 9 – Reprodução de tela do Software Hydro 1.01 .....	41
Figura 10 – Regressão polinomial de segunda ordem para dados de sinal elétrico e correlação com a concentração com dados de um ensaio de calibração para o nó N0C1 da malha de eletrodos .....	44
Figura 11 – Validação Ensaio/Metodologia - Ensaio Ens 01_10L_h .....	47
Figura 12 – Validação Ensaio/Metodologia - Ensaio Ens 02_10L_h .....	48
Figura 13 – Validação Ensaio/Metodologia - Ensaio Ens 03_10L_h .....	48
Figura 14 – Tempo de detenção e percentual de massa recuperada – Ensaio Ens 01_10L_h. ....	50
Figura 15 – Tempo de detenção e percentual de massa recuperada – Ensaio Ens 02_10L_h .....	51
Figura 16 – Tempo de detenção e percentual de massa recuperada – Ensaio Ens 03_10L_h .....	51
Figura 17 – Parcelas de massas ejetadas no decorrer do tempo – Ens 01_10L_h ..	52
Figura 18 – Parcelas de massas ejetadas no decorrer do tempo – Ens 02_10L_h ..	53
Figura 19 – Parcelas de massas ejetadas no decorrer do tempo – Ens 03_10L_h ..	54
Figura 20 – Concentrações médias e modelos - Ens 01_10L_h .....	56
Figura 21 – Concentrações médias e modelos - Ens 02_10L_h .....	56
Figura 22 – Concentrações médias e modelos - Ens 03_10L_h .....	57
Figura 23 – Coeficiente de Variação para o ensaio Ens 01_10L_h .....	58
Figura 24 – Coeficiente de Variação para o ensaio Ens 02_10L_h .....	59
Figura 25 – Coeficiente de Variação para o ensaio Ens 03_10L_h .....	59
Figura 26 – Imageamento das concentrações da solução – Ensaio Ens01_10L_h ..	61
Figura 27 – Imageamento das concentrações da solução Ensaio Ens02_10L_h ..	62
Figura 28 – Imageamento das concentrações da solução – Ensaio Ens03_10L_h ..	64
Figura 29 – Validação Ensaio/Metodologia – Ensaio Ens 01_15L_h .....	66
Figura 30 – Validação Ensaio/Metodologia – Ensaio Ens 02_15L_h .....	66
Figura 31 – Validação Ensaio/Metodologia – Ensaio Ens 03_15L_h .....	67
Figura 32 – Tempo de detenção e percentual de massa recuperada – Ensaio Ens 01_15L_h .....	68
Figura 33 – Tempo de detenção e percentual de massa recuperada – Ensaio Ens 02_15L_h .....	69
Figura 34 – Tempo de detenção e percentual de massa recuperada – Ensaio Ens03_15L_h .....	69
Figura 35 – Parcelas de massas ejetadas no decorrer do tempo – Ens 01_15L_h ..	70

Figura 36 – Parcelas de massas ejetadas no decorrer do tempo – Ens 02_15L_h ..	71
Figura 37 – Parcelas de massas ejetadas no decorrer do tempo – Ens 03_15L_h ..	71
Figura 38 – Concentrações médias e modelos – Ens 01_15L_h .....	73
Figura 39 – Concentrações médias e modelos – Ens 02_15L_h .....	73
Figura 40 – Concentrações médias e modelos – Ens 03_15L_h .....	74
Figura 41 – Coeficiente de Variação para o ensaio – Ens 01_15L_h.....	75
Figura 42 – Coeficiente de Variação para o ensaio - Ens 02_15L_h .....	76
Figura 43 – Coeficiente de Variação para o ensaio – Ens 03_15L_h.....	76
Figura 44 – Imageamento das concentrações da solução – Ensaio Ens 01_15L_h ..	78
Figura 45 – Imageamento das concentrações da solução – Ensaio Ens 02_15L_h ..	79
Figura 46 – Imageamento das concentrações da solução – Ensaio Ens 03_15L_h ..	80
Figura 47 – Validação Ensaio/Metodologia - Ensaio Ens 01_20L_h .....	82
Figura 48 – Validação Ensaio/Metodologia - Ensaio Ens 02_20L_h .....	82
Figura 49 – Validação Ensaio/Metodologia - Ensaio Ens 03_20L_h .....	83
Figura 50 – Tempo de detenção e percentual de massa recuperada – Ensaio Ens 01_20L_h .....	84
Figura 51 – Tempo de detenção e percentual de massa recuperada – Ensaio Ens 02_20L_h .....	85
Figura 52 – Tempo de detenção e percentual de massa recuperada – Ensaio Ens 03_20L_h .....	85
Figura 53 – Parcelas de massas ejetadas no decorrer do tempo – Ens 01_20L_h ..	86
Figura 54 – Parcelas de massas ejetadas no decorrer do tempo – Ens 02_20L_h ..	87
Figura 55 – Parcelas de massas ejetadas no decorrer do tempo – Ens 03_20L_h ..	87
Figura 56 – Concentrações médias e modelos – Ens 01_20L_h .....	89
Figura 57 – Concentrações médias e modelos – Ens 02_20L_h .....	89
Figura 58 – Concentrações médias e modelos – Ens 03_20L_h .....	90
Figura 59 – Coeficiente de Variação para o ensaio – Ens 01_20L_h.....	91
Figura 60 – Coeficiente de Variação para o ensaio – Ens 02_20L_h.....	92
Figura 61 – Coeficiente de Variação para o ensaio – Ens 03_20L_h.....	92
Figura 62 – Imageamento das concentrações da solução – Ensaio Ens 01_20L_h ..	94
Figura 63 – Imageamento das concentrações da solução – Ensaio Ens 02_20L_h ..	95
Figura 64 – Imageamento das concentrações da solução – Ensaio Ens 03_20h .....	96

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Ensaio operacionais .....	43
Tabela 2 – Parâmetros dos nós da malha de aquisição de dados para conversão sinal - concentração.....	45
Tabela 3 – Características básicas – Módulo 1 .....	46
Tabela 4 – Modelos matemáticos para a concentração média. ....	55
Tabela 5 – Características básicas – Módulo 2.....	65
Tabela 6 – Modelos matemáticos para a concentração média. ....	72
Tabela 7 – Características básicas – Módulo 3.....	81
Tabela 8 – Modelos matemáticos para a concentração média. ....	88

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
1.1	OBJETIVOS.....	13
1.1.1	Objetivo Geral.....	13
1.1.2	Objetivos Específicos.....	14
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>15</b>
2.1	TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS .....	15
2.2	REATOR UASB.....	16
2.3	HIDRODINÂMICA DOS REATORES .....	18
2.4	CLASSIFICAÇÃO DOS REATORES.....	19
2.4	TESTES COM TRAÇADORES E DISTRIBUIÇÃO DOS TEMPOS DE RESIDÊNCIA.....	20
2.5	MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO HIDRÁULICO DE REATORES.....	23
2.6	DISPERSÃO DE TRAÇADORES EM MEIO AQUOSO – DIFUSÃO E DISPERSÃO.....	24
2.7	DIFUSÃO DE TRAÇADORES EM MEIO AQUOSO.....	25
2.8	DISPERSÃO DE TRAÇADORES POR CONVECÇÃO EM MEIO AQUOSO .....	26
2.9	MEDIÇÃO DE CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS DE REATORES DE FLUXO COM USO DE TRAÇADORES.....	26
2.10	PESQUISAS DE MEDIÇÕES COM UTILIZAÇÃO DE TRAÇADORES NO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL .....	27
2.11	SOFTWARE MATLAB .....	28
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>30</b>
3.1	BANCADA DE ENSAIOS.....	30
3.1.1	Equipamento físico. ....	30
3.2	PRÍNCÍPIOS DE OPERAÇÃO DO SISTEMA.....	35
3.3	CALIBRAÇÃO DO SISTEMA.....	36
3.4	MODELOS PARA A CONCENTRAÇÃO .....	37
3.4.1	Concentração uniformemente distribuída. ....	37
3.4.2	Modelo para a concentração média aferida.....	39
3.5	UNIFORMIDADE DA DISTRIBUIÇÃO DA MASSA .....	39
3.6	IMAGEAMENTO .....	40
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>42</b>
4.1	CALIBRAÇÃO DO SISTEMA.....	43
4.2.1	Validação dos ensaios e a metodologia empregada. ....	46
4.2.2	Tempo de Detenção da massa injetada .....	49
4.2.3	Modelos para as concentrações .....	55
4.2.4	Análise de uniformidade. ....	58
4.2.5	Análise de imageamento .....	60
4.3	MÓDULO 2.....	65
4.3.1	Validação dos ensaios e a metodologia empregada. ....	65
4.3.2	Tempo de Detenção da massa injetada (TD) .....	68
4.3.3	Modelos para as concentrações .....	72
4.3.4	Análise de uniformidade. ....	75
4.3.5	Análise de imageamento .....	77
4.4	MÓDULO 3.....	81

4.4.1	Validação dos ensaios e a metodologia empregada. ....	82
4.4.2	Tempo de Detenção da massa injetada .....	84
4.4.3	Modelos para as concentrações .....	88
4.4.4	Análise de uniformidade. ....	91
4.4.5	Análise de imageamento .....	93
4.5	DISCUSSÃO – INFLUÊNCIA DA VAZÃO .....	97
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>99</b>
<b>6</b>	<b>PROPOSTAS PARA ESTUDOS FUTUROS.....</b>	<b>101</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>102</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A utilização de traçadores para identificar características hidrodinâmicas em dispositivos hidráulicos é uma prática comum em pesquisas, desenvolvimento de tecnologias e inovação. A investigação sobre o comportamento hidrodinâmico pode ser essencial para a definição da geometria de equipamentos, de dispositivos de controle e de maior eficiência energética, física e química no caso dos reatores para tratamento de água e efluentes.

Os testes comuns em reatores utilizando traçadores compreendem o monitoramento da massa de traçador que entra no sistema e da massa que sai do sistema (HOWE, et. al., 2016). Nesta linha, porém estendendo o monitoramento para todo o interior do sistema, além da entrada e saída, para assim obter informações de toda a propagação interna do traçador, esta pesquisa se concentrou na montagem e aplicação de um sistema de aquisição de dados para obtenção de informações da propagação da massa no interior de um modelo base de reator para tratamento de efluentes operando um sistema de fluxo contínuo com injeção de pulso de traçador. O traçador utilizado foi o NaCl, dissolvido em água pura, proporcionando uma solução eletrolítica que se propaga no reator, o qual tem uma instalação de sensores em uma rede adaptada a um sistema tridimensional de coordenadas. Os sinais elétricos decorrentes da condutividade proporcionada pelo traçador em cada “nó” da rede de aquisição, são registrados em ensaios padronizados, sistematizados, processados computacionalmente e se traduzem em saídas gráficas e numéricas que proporcionam ferramentas para a análise e o diagnóstico hidrodinâmico do espaço e escoamento estudados.

Após a montagem e definições do sistema de aquisição, com a instalação de seus componentes, testes de funcionalidade, sensibilidade e calibração do sistema para as vazões e concentrações de traçador a serem efetivadas em ensaios finais, foram realizados 3 módulos de testes com faixas de vazão distintas e 3 repetições em cada módulo. Os dados obtidos foram registrados e sistematizados de forma a se tornarem acessíveis para ferramentas gráficas e numéricas de apresentação, além de software específico para geração imagens do volume de estudo, propiciando a interpretação, análise e diagnóstico hidrodinâmico do espaço de estudo: o modelo base de reator para tratamento de efluentes.

Foram gerados instrumentos de validação de ensaios comparando resultados com meios alternativos de medição, gráficos e modelos matemáticos de concentração, avaliações do tempo de permanência da massa no reator, materiais de análise da dispersão da matéria no volume e imagens do interior do volume para observações de comportamentos específicos. Por meio dos instrumentos foi possível estabelecer comparações das situações reais com as ideais, identificar os espaços de ocupação e escassez do traçador nas regiões do reator e a heterogeneidade dessa ocupação, notar os efeitos de acréscimos de vazões de diluição e verificar efeitos do aspecto intrusivo no escoamento pelo próprio sistema de aquisição de dados.

Segundo Castro (2010), há muito conhecimento acumulado a respeito dos reatores, porém, falta consenso sobre forma e configuração interna mais eficiente e a maioria dos estudos analisa a eficiência na remoção de matéria orgânica, sólidos e melhoria de outros parâmetros, deixando de lado a hidrodinâmica. Conhecer a hidrodinâmica possibilita detectar problemas na operação desses sistemas, sobretudo quanto à deficiência na distribuição do afluente dentro do reator, com a observação de zonas mortas, caminhos preferenciais e curtos-circuitos

Justifica-se a presente pesquisa pelo aspecto de emprego de componentes tecnológicos de fronteira, objetivos de utilizar recursos técnicos para esclarecimento de comportamentos hidrodinâmicos e obtenção de melhor eficiência e eficácia na produção de dispositivos que possam conferir utilidade aos variados processos de tratamento de efluentes, águas, e tantos outros meios utilizados em processos industriais.

Com essa premissa, este trabalho se caracteriza pela base de procedimentos para a implantação futura de um sistema que reproduza as operações e respostas de maneira automatizada.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

Investigar dados de sinais de condutância obtidos de uma malha tridimensional de aquisição instalada em um modelo base de reator com fluxo contínuo e injeção de traçador, sistematizar e desenvolver as ferramentas para

adaptação do sistema de aquisição, interpretação, diagnóstico e avaliação hidrodinâmica do escoamento.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

Analisar o sistema de aquisição de dados, montado e operado em triplicata, de acordo com os requisitos para descrição do comportamento hidrodinâmico do modelo de reator, variando as vazões de diluição contínua aplicadas ao reator;

Avaliar os parâmetros de calibração do sistema para que os sinais possam ser convertidos em dados de concentração de traçador em coordenadas específicas da malha de aquisição;

Formatar, sistematizar, adaptar os registros de dados e proceder o processamento numérico para proporcionar resultados gráficos e descritivos dos ensaios de aquisição;

Validar os ensaios por meio de confrontos comparativos com outros meios de medição.



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Sendo um dos quatro elementos que formam o planeta, a água possui um elevado grau de relevância para que a natureza e o homem possam sobreviver. Contudo, no dia a dia, grande parte da sociedade e organizações consomem a água de maneira inadequada, colocando em risco o futuro de todo o mundo, pois em inúmeros casos a água não é reutilizada e o descarte das águas servidas é feito de maneira inadequada, comprometendo a qualidade da água disponível para abastecimento.

Segundo Santos (1993), a reutilização da água ou utilização de águas residuárias não é um método novo e é praticada há muitos séculos. De acordo com o autor, na Grécia Antiga existia a disposição de esgotos e seu uso na irrigação. Entretanto, a necessidade da água para a sobrevivência do planeta fez da reutilização de águas residuárias um assunto atual e de grande significância.

Deve-se considerar o reuso de água como parte de uma atividade mais abrangente que é o uso racional ou eficiente da água, o qual compreende, também, o controle de perdas e desperdícios, e a minimização da produção de resíduos e do consumo de água (IBGE, 2007).

De acordo com Dorigon e Tessaro (2010), diante do problema de carência hídrica no mundo, se tornou essencial diminuir o seu consumo, utilizá-la de forma racional priorizando formas sustentáveis. É de grande relevância administrar os recursos hídricos aplicados atualmente, para que possam atender às necessidades sem causar danos ao meio ambiente.

### 2.1 TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS

O tratamento de águas residuárias são processos artificiais de depuração, remoção de poluentes e adequação dos parâmetros das águas servidas, de forma que se torne própria para lançamento e disposição final, objetivando manter as condições e padrões de qualidade dos corpos de água receptores (CARVALHO *et al*, 2008).

Nunes (2010) explica que os processos de tratamento de águas residuárias são classificados em três tipos, sendo físicos, químicos e biológicos:

- Processos físicos: aqueles em que são aplicados fenômenos de natureza física, como gradeamento, peneiramento, sedimentação, floculação, decantação, filtração, osmose reversa, resfriamento, entre outros;
- Processos químicos: aqueles obtidos por meio da utilização de produtos químicos, como coagulação, neutralização, homogeneização, precipitação, oxidação, eletrodialise, redução, adsorção, entre outros;
- Processos biológicos: realizados por meio de atividades bioquímicas ou biológicas, podendo ser aeróbio, anaeróbio ou anóxico, como, lodos ativados, lagoas de estabilização, lagoas aeradas, filtros biológicos, biodiscos, entre outros.

Pode-se afirmar que o processo de tratamento de águas residuárias consiste em um grupo de processos unitários que funcionam organizadamente com a finalidade de eliminar poluentes, atendendo as condições e padrões de lançamento e de qualidade das águas receptoras de acordo com sua classe, condições para reutilização ou lançamento no solo por meio de infiltração para irrigação de culturas.

O conjunto de unidades, órgãos auxiliares, acessórios, dispositivos e equipamentos é geralmente denominado de estação de tratamento (NUNES, 2010).

## 2.2 REATOR UASB

O reator UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) se trata de um reator anaeróbico de fluxo ascendente, de grande eficácia. De maneira geral, utiliza-se o reator UASB em processos iniciais para estabilizar a matéria orgânica primária. Pode ser aplicado seja em estações de tratamento de esgoto sanitário, seja em estações de tratamento de efluentes industriais (RISSOLI, 2004).

No instante em que se encontra no reator anaeróbio de manta de lodo o efluente adentra à parte inferior em fluxo ascendente, percorrendo o caminho por meio de um leito denso de lodo, de grande atividade.

É importante destacar que o perfil de sólidos no reator conta com grande variação, sendo bastante denso e com partículas granulares de grande capacidade de sedimentação, na região próxima ao leito de lodo, até um lodo mais leve, à medida que se aproxima do topo do reator (PIRES e RIBEIRO, 1992).

De acordo com Barbosa Filho, Costa e Giordano (2014), a matéria orgânica se estabiliza em praticamente todas as zonas de reação, como leito e manta de lodo, tendo a mistura do sistema motivada pelo fluxo ascendente de líquido e também de bolhas de gás. O efluente industrial ou sanitário abandonará o reator através da parte flutuante de um decantador interno, encontrado na parte superior do reator.

Situado na parte inferior do decantador, um dispositivo que separa gases e sólidos evitará que o fluxo ascendente dos gases formados nos processos de estabilização transporte as partículas que se soltam da manta de lodo, possibilitando que as mesmas voltem para a câmara de digestão, não sendo transportados para fora do sistema.

A formação de biomassa com grande atividade microbiológica é o princípio essencial do processo de tratamento, permitindo grande rendimento nos processos de estabilização, levando em consideração os limites para as reações anaeróbias e também um período de detenção hidráulica curto.

Como qualquer processo, existem vantagens e desvantagens sobre a utilização do reator UASB. De acordo com Rissoli (2004), as principais vantagens e desvantagens:

Vantagens:

- Alto grau de estabilização do efluente;
- Pequena produção de lodo;
- Baixa necessidade de nutrientes;
- A eficácia do tratamento não se limita à transferência de oxigênio;
- Obtém-se metano como produto final;
- Pouca necessidade de área e baixos custos na implementação;
- Possibilita manter a biomassa sem alimentação do reator;
- Pouco consumo de energia.

Desvantagens:

- Pouca retirada de nitrogênio, fósforo e patógenos;
- Demanda pós-tratamento;
- Lentidão no crescimento das bactérias metanogênicas;
- Período maior no ajuste a novos despejos e variação de condições ambientais;

- Pode ocorrer corrosão e maus odores.

## 2.3 HIDRODINÂMICA DOS REATORES

Segundo Pires e Ribeiro (1992), através das pesquisas da melhor aplicação do reator UASB, o conhecimento mais desenvolvido sobre a hidrodinâmica do reator se tornou essencial, visto que grande parte dos estudos se detém a tratar da eficácia na remoção de matéria orgânica, com baixo conhecimento sobre as características hidrodinâmicas dos reatores UASB.

A hidrodinâmica dos reatores UASB pode se relacionar a diversos fatores, como o tipo de efluente, tempo de detenção, altura do leito e da manta de lodo e a taxa de produção de biogás (PEÑA, 2006).

Metcalf & Eddy (2003) destacam que os processos biológicos utilizados no tratamento de esgoto se classificam em aeróbios, anóxicos, anaeróbios e a combinação destes. Existe diferença em cada processo no que se refere ao crescimento biológico, sendo suspenso ou aderido e no que se refere ao fluxo, contínuo ou intermitente no que se refere à hidráulica, como mistura completa, fluxo de pistão ou fluxo arbitrário.

A hidrodinâmica pode ser avaliada por meio de um sinal em pulso ou degrau. A entrada em pulso representa uma quantidade de traçador introduzido de forma rápida na corrente de alimentação do reator. Esta concentração do traçador no efluente é medida no decorrer do tempo para se obter a curva de concentração pelo tempo (SOUZA, 2012).

Ainda, segundo o autor acima citado, na entrada em degrau o traçador é aplicado na corrente do efluente e mantido no período do ensaio, obtendo-se dessa forma uma curva crescente, até o instante em que se atinge a concentração de traçador aplicado.

De acordo com Metcalf & Eddy (2003), o método principal para analisar os resultados dos ensaios é a pesquisa da distribuição do tempo de residência. A partir das curvas adquiridas pelas pesquisas de estímulo e resposta da distribuição do tempo de residência, observa-se o período de continuidade das moléculas individuais do fluido que escoam no reator ou tempo médio de detenção hidráulica.

A posição do coletor de gás possui grande relevância no que se refere ao comportamento hidráulico em reatores UASB. No momento que a barreira física se

encontra mais próxima do manto de lodo, reduz a fração de zonas mortas, visto que era aplicada uma zona de equalização de fluxo da vazão em pesquisas realizadas com traçadores nestes reatores (MORGAN-SAGASTUME *et al.*, 1997).

## 2.4 CLASSIFICAÇÃO DOS REATORES

De maneira geral, reatores químicos são recipientes onde acontecem as reações químicas, transferências de massa e calor (FOGLER, 1992).

Os reatores químicos são tanques criados para contenção de reações químicas de escala industrial. O projeto de um reator se relaciona com diversos aspectos da engenharia química, onde os responsáveis trabalham para conquistar a maximização dos valores para a reação apresentada.

Deve-se assegurar que a reação ocorra com maior eficácia para o produto de saída demandado, desenvolvendo maior rendimento do produto e apresentando o mínimo custo de aquisição e operação. As despesas da atividade podem incluir fonte de energia, remoção de energia, custo de matérias-primas, trabalho humano, entre outros.

As transferências de energia podem surgir na forma de aquecimento ou resfriamento para expandir a pressão, a perda de pressão pelo atrito, como a queda de pressão por meio de 90° na tubulação ou uma placa de orifício, agitação, entre outros (LEVENSPIEL, 1972).

Atualmente existem diversos tipos de reatores e também diversas formas para suas classificações. No que se refere ao formato mais básico do espaço físico onde ocorrem as reações, estão presentes duas formas principais básicas:

- Reatores em tanques;
- Reatores em tubos.

Segundo Fogler (1992), os reatores reais são versões não perfeitas de alguns reatores ideais, sendo classificados em três modelos básicos, aplicados para estimar as variáveis de processo mais relevantes.

- Reator em batelada: de grande utilização na indústria química, porém limitado a processos industriais maiores, visto que não possibilita a produção continuada;

- Reator perfeitamente agitado;
- Reator de fluxo em pistão.

Na prática, os reatores trabalham em regimes intermediários entre os dois últimos tipos básicos citados.

No que se refere aos reatores catalíticos, necessitam de tratamento separado, visto que são reatores em batelada, reatores perfeitamente agitados ou reatores de fluxo em pistão. De acordo com Fogler (1992), as variáveis de processo podem incluir:

- Tempo de residência;
- Volume;
- Temperatura;
- Pressão;
- Concentrações de espécies químicas;
- Coeficientes de transferência de calor.

Os reatores podem ser classificados quanto a natureza das fases participantes como reatores homogêneos de meios gasosos ou líquidos e reatores heterogêneos, com os reagentes estando nas inúmeras combinações de fases, como gás-líquido, gás-sólido, líquido-sólido e gás-líquido-sólido. Destaca-se que reatores de reações químicas sólido-sólido são relativamente raros.

## 2.5 TESTES COM TRAÇADORES E DISTRIBUIÇÃO DOS TEMPOS DE RESIDÊNCIA

Levenspiel (1999) explica que a caracterização hidráulica de reatores é realizada através do método de modelagem sistêmica, e que através de um modelo forte é possível se verificar como se comporta o escoamento, utilizando traçadores e se obtendo parâmetros hidráulicos, como a distribuição dos tempos de residência das partículas de traçador.

O comportamento hidrodinâmico do reator é fator fundamental na taxa de retirada de poluentes. O traçador opera como um indicador da hidrodinâmica do sistema, possibilitando, por meio da análise dos resultados obtidos, analisar os caminhos de preferência, zonas mortas de escoamento e o período de detenção do sistema em questão.

Os traçadores devem ser quimicamente estáveis e devem contar com uma densidade próxima do líquido em que serão introduzidos. Os traçadores devem ser detectados de forma simples e não devem possuir interação química com a forma em que se apresentam (SILVA et al., 2009).

A utilização de softwares é uma solução apresentada para desenvolver o entendimento do escoamento em reatores. Le Moulec et al. (2010) apresentam que um dos softwares utilizados, *Computacional Fluid Dynamics* – CFD, separa o reator em uma malha para elaborar a simulação do escoamento dentro de todos os pontos do sistema. Assim, obtém-se um mapeamento adequado e concreto do comportamento do escoamento do líquido dentro do reator.

Segundo Di Bernardo e Dantas (2006), entre os elementos que se pode utilizar como traçadores, são destacados os radioisótopos, corantes, sais e bases. O cloreto de sódio e o cloreto de cálcio são aplicados de forma frequente.

No momento em que o sal de cozinha refinado é utilizado, sua concentração na água não deve ser maior que 200 g/L, pela saturação do meio. Para a quantificação do traçador pode-se aplicar uma correlação entre condutividade elétrica e a sua concentração através de uma equação pré-determinada (DI BERNARDO; DANTAS, 2006).

Matos et al. (2015) elaboraram uma pesquisa para investigar a eficácia da utilização de traçador salino no estudo de colmatação em sistema de alagados construídos. A pesquisa destaca que o cloreto de sódio pode ser aplicado para esta finalidade, visto que a recuperação do traçador, isto é, a massa de traçador medida na saída do sistema posteriormente sua utilização em diferentes sistemas de alagados construídos, teve resultado maior que 98%.

Bodin e Persson (2012) destacam o tempo de detenção hidráulica como fator essencial a se considerar no dimensionamento de um sistema de alagados construídos para se tratar os efluentes. O tempo de detenção hidráulica é caracterizado como período médio que um líquido se encaminha dentro de um sistema de tratamento.

Segundo os autores, para adquirir um reator adequado, o período de detenção hidráulica nominal ( $t_n$ ) é representador por:

$$t_n = \frac{V}{Q} \quad (1)$$

O  $t_n$  representa o período de detenção hidráulica nominal,  $V$  representa o volume total do sistema e  $Q$  se refere à vazão que transcorre através do sistema. No tocante ao período de detenção hidráulica nominal afirma-se que todo o volume do sistema do reator está associado ao afluyente, isto é, o sistema demonstra condições hidráulicas adequadas.

Em um sistema real, as condições de escoamento ideais não ocorrem e cada parte do líquido encontrará um período distinto dentro do sistema. As frações de líquido se encontrarão por um período menor dentro do sistema, visto que as demais parcelas serão depositadas em zonas mortas de escoamento, se mantendo por períodos maiores. Considerando que as partículas se encontram em períodos tempo distintos dentro do sistema, uma das maneiras de averiguar o comportamento hidráulico é através da distribuição do tempo de residência.

Di Bernardo e Dantas (2006) destacam que a utilização do traçador no sistema pode ser continuada ou através de pulsos. Na utilização continuada existe a preparação de uma solução de traçador com concentração pré-fixada, onde é colocada com uma vazão contínua no período de atividade do sistema. Na aplicação através de pulsos, prepara-se a solução de traçador em um recipiente, sendo seu conteúdo inserido no sistema no menor tempo possível.

Se, ao longo do tempo, a quantidade de traçador que deixa o sistema seja igual à quantidade com que o sistema está sendo alimentado, a injeção se caracteriza como de forma continuada (FOGLER, 2008).

Levenspiel (1999) explica que a curva de distribuição do tempo de residência é representada de forma que a área sob a curva seja unitária, isto é, a curva de concentração de traçador na saída do sistema é convertida objetivando adquirir uma distribuição do tempo de residência com área unitária.

A distribuição do tempo de residência (DTR) para as partículas do traçador é obtida analisando a medida da concentração de traçador que deixa o tanque em intervalos de tempo. Introduce-se o traçador em um pulso com uma estabelecida vazão em um determinado período. A massa total de traçador introduzida é representada por  $M$ . Assim, através da equação descrita a seguir é possível se obter a distribuição do tempo de residência em função da concentração do traçador na saída do sistema ( $C_{saída}$ ), da massa de traçador injetada ( $M$ ) e da vazão de alimentação do sistema ( $Q$ ).

$$DTR = \frac{C_{saída}}{M \cdot Q} \quad (2)$$



## 2.5 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO HIDRÁULICO DE REATORES

Segundo Carvalho et al. (2008), um fator a ser levado em consideração objetivando assegurar uma eficácia de reatores é conhecer o seu comportamento hidrodinâmico. Sua relevância ocorre pela influência sobre a velocidade das reações biológicas, por meio de transformações na taxa de transferência de massa e a distribuição das reações no decorrer do reator.

Diante das diferenças de distribuição da biomassa e do encadeamento das reações bioquímicas, as regiões do reator demonstram comportamentos distintos, em função da forma de escoamento estabelecida (CARVALHO et al., 2008).

Dantas et al. (2000) destacam que por meio de pesquisas sobre o comportamento hidrodinâmico de um reator, pode-se prever os regimes de fluxo e a detecção da existência de anomalias nos processos ocorrentes dentro do reator, que podem reduzir a eficácia deste.

A compreensão dos dados adquiridos por meio do comportamento hidrodinâmico se apresenta mais clara por meio de sua análise em modelos matemáticos uni paramétricos, onde são projetadas curvas de distribuição do tempo de residência.

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

Torna-se essencial, então, optar por um método eficaz para determinar o comportamento hidrodinâmico. Um destes métodos é a utilização de traçadores que, posteriormente à sua aplicação, traduzem o regime de fluxo do efluente dentro do reator. De Nardi et al. (1999) explica que a utilização de traçadores, através do método de estímulo e resposta, necessita de uma maior atenção dos responsáveis, visto que a natureza dos traçadores influenciará a forma das curvas de distribuição dos tempos de detenção hidráulica.

## 2.6 DISPERSÃO DE TRAÇADORES EM MEIO AQUOSO – DIFUSÃO E DISPERSÃO

Segundo Bird et al. (2006), quando um fluido se encontra em um escoamento, as suas partículas internas mudam de posição. Determina-se a mudança de posição no intervalo de tempo a como velocidade de escoamento. Em um ambiente aquoso, cada partícula apresenta uma velocidade distinta em rumos distintos. Assim, a velocidade de escoamento para uma partícula de um líquido é representada pela soma dos componentes x, y e z em um sistema cartesiano de coordenadas.

$$\vec{V} = V_x \cdot \vec{i} + V_y \cdot \vec{j} + V_z \cdot \vec{k} \quad (3)$$

Conforme a velocidade, podem ocorrer transformações na forma em que acontece um escoamento. Segundo Porto (2001) a primeira pesquisa sobre a estrutura interna dos escoamentos foi executada por Reynolds. Na pesquisa, concluiu-se que os métodos de escoamento dos fluidos podem ser caracterizados em laminar, transição e turbulento.

No escoamento laminar, as partículas do fluido se movem em camadas ou lâminas, de modo suave, ao passo que no escoamento turbulento, ocorre uma mistura rápida das partículas do fluido à medida que elas se movem com as suas componentes de velocidades tridimensionais (PORTO, 2001).

O número de Reynolds é dependente da viscosidade cinemática do líquido, da velocidade média de escoamento, assim como do comprimento característico do tubo de escoamento.

$$Rey = \frac{V \cdot D}{\nu} \quad (4)$$

No que se refere às tubulações, segundo Netto e Fernandez (2001), escoamentos que contam com um número de Reynolds menor que 2000 são caracterizados como laminares, escoamentos com números de Reynolds superiores a 2000 e inferiores ou iguais a 4000 são caracterizados como escoamentos de transição e, quando o número de Reynolds for maior que 4000, classifica-se o escoamento como turbulento.

O regime de escoamento em que um líquido encontra influencia diretamente na forma que acontece a transferência de massa do soluto dentro do solvente (BIRD et al., 2006).

## 2.7 DIFUSÃO DE TRAÇADORES EM MEIO AQUOSO

Bird et al. (2006) explicam que a difusão é o caminho molecular de uma substância no que se refere a uma outra substância. A difusão é também denominada difusão mássica, difusão por gradiente de concentração ou mesmo como difusão ordinária.

O coeficiente de difusão infinita de um traçador é importante para a realização de simulações, projeto e operação de reatores para os mais diversos tipos de tratamento (LITO et al., 2013).

De acordo com Roma (2003), o coeficiente de difusão infinita pode ser definido como o elemento que indicará a intensidade que o transporte de massa pode acontecer e é função do soluto e do solvente da solução.

A difusividade representa uma propriedade binária, ou seja, é dependente de duas espécies químicas envolvidas. A unidade do coeficiente de difusividade é representada em  $m^2/s$  no sistema internacional. A variação da difusividade para as variadas substâncias demonstra uma grande faixa de domínio, tendo sua atividade de  $3,5 \cdot 10^{-9} \text{ cm}^2/s$  para o cádmio em cobre e alcançando  $1,32 \text{ cm}^2/s$  para o hidrogênio em gás hélio.

A difusão binária, ou seja, a difusão de um elemento no momento que se encontra dissolvido em outro é regida pela lei de Fick, de 1855. Uma substância com alta concentração em uma estabelecida forma, tende a difundir as suas moléculas até que elas ocupem de maneira homogênea todo o espaço disponível.

A movimentação das moléculas ocorre através da diferença de concentração em regiões distintas do soluto dentro do solvente. O processo de difusão molecular tem sua equação representada por:

$$M_A = -D_{AB} \frac{dC_A}{dL} \quad (5)$$

Onde  $D_{AB}$  é o coeficiente de difusividade da substância A no meio B,  $dC_A/dL$  é a medida de concentração da substância A em relação à distância L conforme o rumo do fluxo de massa  $M_a$  da substância A.

## 2.8 DISPERSÃO DE TRAÇADORES POR CONVECÇÃO EM MEIO AQUOSO

De acordo com Roma (2003), no que se refere ao processo de transporte por convecção, transportam-se as partículas do soluto através do solvente em movimento, por meio de suas linhas de fluxo, com velocidade semelhante à percolação do solvente. Sendo assim, no momento que existe o movimento macroscópico da forma que contém o soluto, adiciona-se a transferência de massa do processo convectivo ao da transferência de massa por difusão molecular:

$$M_A = -(D_{AB} + D_T) \frac{dC_A}{dL} \quad (6)$$

O  $D_T$  representa o componente de difusividade turbulenta. De uma forma geral, a componente turbulenta é maior que a componente de difusividade. Assim, em escoamentos altamente turbulentos, poderá negligenciar a componente  $D_{AB}$ .

## 2.9 MEDIÇÃO DE CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS DE REATORES DE FLUXO COM USO DE TRAÇADORES

Segundo Howe et.al. (2016) reatores de fluxo de mistura completa e reatores de fluxo pistão, em escala de bancada, podem ter efeitos de dispersão negligenciados. A melhor maneira de determinar as características hidráulicas destes reatores são por meio de medidas com testes de traçadores. Um teste de traçador é realizado com a injeção de um produto químico conservativo na entrada do reator e com medições de concentração na saída do reator. Nestas medições pode ser usado um espectrofotômetro, no caso dos corantes, ou um medidor de condutividade, no caso de traçadores eletrolíticos – sais.

O tempo médio de permanência,  $t$ , é a quantidade de tempo que a água permanece no reator conforme testes de traçador. Se a concentração puder ser descrita por uma função contínua, então o tempo médio de permanência pode ser calculado pela expressão:

$$t = \frac{\int_0^{\infty} C(t) dt}{\int_0^{\infty} C dt} \quad (7)$$

O tempo médio hipotético –  $t_H$  – de permanência da massa no interior do reator pode ser calculado pela expressão,

$$t_H = \frac{V}{Q} \quad (8)$$

onde  $V$  é o volume e  $Q$  a vazão de diluição (Howe, et. al., 2016), como já visto anteriormente nessa seção.

## 2.10 PESQUISAS DE MEDIÇÕES COM UTILIZAÇÃO DE TRAÇADORES NO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

Silveira, et. al. (2016) com o trabalho “Aplicação do modelo de tanques em série na caracterização hidrodinâmica de reator anaeróbio de leito fluidificado” estudou a hidrodinâmica de um Reator Anaeróbio de Leito Fluidizado, em escala de bancada, no que tange à formação de caminhos preferenciais e de zonas mortas, de maneira a comprovar que parte do material afluyente a um reator não atinge o tempo de permanência suficiente para o tratamento adequado. O estudo se baseou no comportamento do traçador cloreto de sódio; em regime pulso no modelo de tanques em série, sem e com biomassa.

Sandaka (2018) com o trabalho “Hidrodinâmica de um sistema de alagado construído utilizado no tratamento de rejeito salino” utilizou eletrodos posicionados em uma malha tridimensional em um modelo de SAC – Sistema de Alagado Construído – com a finalidade de obter um sinal elétrico de condutividade em cada coordenada da malha. Com o sistema foi possível averiguar diversas características nas configurações de escoamento testadas, entre elas o tempo de detenção real, ocorrência de curtos-circuitos, deposição densimétrica e a verificação da continuidade pela detecção de massa propagada.

O atual trabalho desenvolvido com a metodologia de captura de sinais elétricos a partir de eletrodos instalados em uma malha tridimensional coerente com um sistema de coordenadas, operando em um tanque com características básicas de um reator, vem contemplar a continuidade dos estudos com traçadores eletrolíticos, apresentando:

- Avanços na metodologia;
- Aplicação em modelo base de reator de fluxo contínuo;
- Adequações no sistema de aquisição de sinais com a implantação de placas comutadoras;

- Correções e aprimoramentos no método de conversão de sinal elétrico para concentração na correlação condutividade com a concentração SDT – Sólidos Dissolvidos Totais;
- Adequações nas concentrações de traçador eletrolítico – solução de Cloreto de Sódio puro – para minimizar o efeito densimétrico;
- Utilização de teste em pulso de traçador e utilização de água pura no fluxo contínuo de teste dinâmico, com vazão controlada eletronicamente;
- Desenvolvimento e aplicação de software especializado, com imageamento dedicado à compreensão das interferências internas no volume de estudo;
- Concentração na produção de modelos matemáticos descritivos do comportamento hidrodinâmico;
- Variação dos modos de operação para diagnóstico hidrodinâmico e definição de elementos e procedimentos otimizados de operação.

## 2.11 SOFTWARE MATLAB

O MATLAB foi aplicado inicialmente por engenheiros de projeto de controle e automação, e de forma rápida passou a ser utilizado por demais campos de aplicação. Na Engenharia é aplicado para apresentar e solucionar modelos matemáticos de sinais e algoritmos. Atualmente, aplica-se o programa também nas áreas de educação, especialmente no ensino da álgebra linear e análise numérica, e é bastante comum sua utilização entre cientistas relacionados com o processamento e transformação de imagens.

O software oferece a possibilidade de alternância entre inúmeras maneiras de representar um mesmo instrumento, fazendo o usuário responsável pela sua elaboração e representação.

Proveniente do inglês *Matrix Laboratory*, o MATLAB é um programa interativo que trabalha com cálculos numéricos e gráficos científicos. Sua força se encontra na manipulação e cálculos matriciais, como a resolução de sistemas lineares, cálculos de autovalores e autovetores, fatoração de matrizes, entre outros. Diversas funções especializadas fazem parte do programa, de forma que em diversos casos não existe a necessidade de se elaborar muitas coisas.

Outras funções do MATLAB são a elaboração e manipulação de gráficos científicos e a probabilidade de extensão através de pacotes comerciais ou escritos pelo usuário. Comumente, a operacionalidade do MATLAB e o usuário caminham juntos, visto que com o decorrer do tempo, o programa escreve suas próprias funções, unindo capacidades determinadas.

É um programa utilizado em cálculos matemáticos, modelagens e simulações, análises numéricas e processamentos, elaboração e visualização de gráficos, desenvolvimento de algoritmos e uma imensidade de outras funções. É amplamente utilizado em centros de pesquisa, universidades e também nas indústrias (GILAT, 2006).

Hanselman e Littlefield (2003) destacam que o elemento de informação do MATLAB é uma matriz. Os autores explicam que além de oferecerem operações usuais com matrizes, o programa apresenta a operação com vetores, de forma a possibilitar a manipulação de dados de inúmeras formas.

É possível, através do MATLAB, a incorporação de pacotes elaborados para cálculos pré-definidos, ou ainda, a junção de diversos códigos para se gerar uma nova rotina de cálculo (HANSELMAN; LITTLEFIELD, 2003).

### 3 METODOLOGIA

A seguir são descritos os procedimentos de base para obtenção de resultados, incluindo as montagens para a bancada de ensaios e sua operação, a sistematização de aquisição de dados e seus registros, a adequação de dados para leitura e processamento, o embasamento matemático de operações em conversão de sinais e obtenção de modelos matemáticos.

#### 3.1 BANCADA DE ENSAIOS

O sistema de aquisição de sinais é instalado em um modelo base de reator de fluxo contínuo. Este modelo base compreende um tubo de PVC de 300 mm de diâmetro, 400 mm de altura, nível máximo de água no interior na cota 300 mm e volume útil regulado para 23,5 L. A base é vedada e o topo aberto, entrada de fluxo em nível superior e saída inferior por meio de sifão com o efeito de garantir regularização de nível de água, o qual deve permanecer fixo durante a operação dos ensaios. Neste modelo é instalada uma malha de fios guia, em cuja interseção se encontram os nós da malha tridimensional de coordenadas, a qual confere precisão matemática para a distribuição de pontos de medição no espaço de estudo. Nestes pontos de medição são instalados eletrodos que são energizados bipolarmente e individualmente em um instante de medição. Os eletrodos, ao estarem imersos em um meio condutor, permitem, quando acionados, produção de corrente elétrica entre seus terminais com proporcionalidade à condutividade do meio. O sinal elétrico é transmitido para um condutímetro que acusa o sinal e é registrado. Para cada coordenada da malha de eletrodos tem-se um registro de sinal e estes registros são obtidos neste espaço de estudo e nos intervalos de tempo predefinidos e registrados, em sucessivas rodadas de aquisição, compondo assim a fonte de dados para sistematização e posterior processamento.

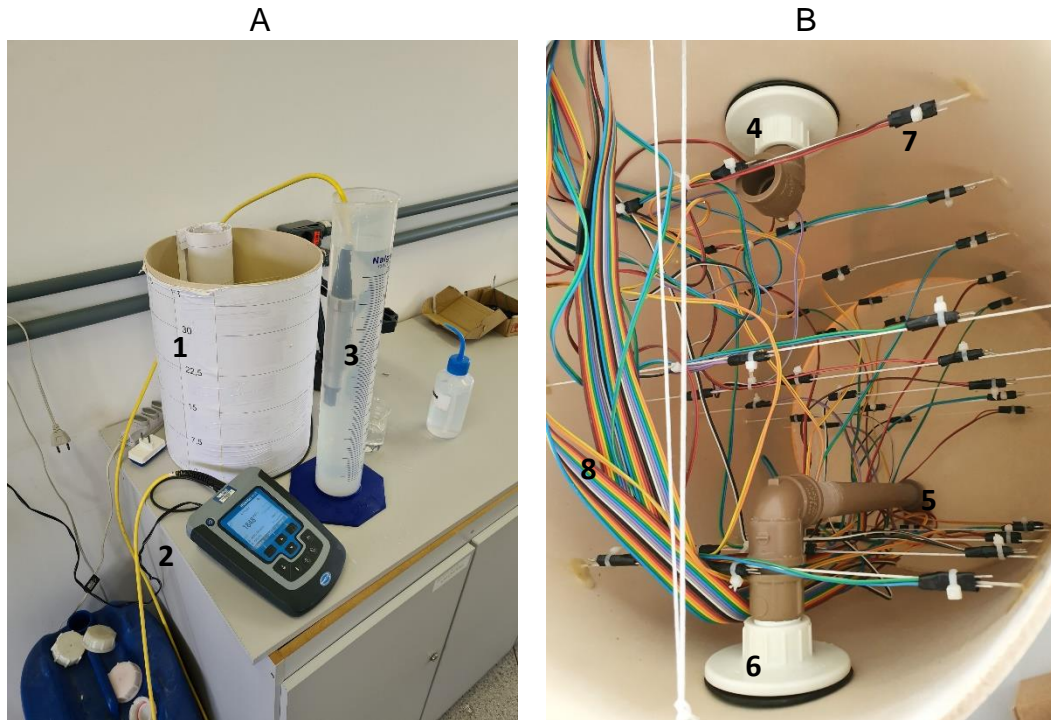
##### 3.1.1 Equipamento físico

A Figura 1 contém fotos da bancada de ensaios e indicações de componentes. (1) Tanque de ensaio; (2) Sonda SDT; (3) Proveta de recepção da água efluente; (4)



Conexão de entrada; (5) Entrada do sifão – Saída do tanque; (6) Conexão de saída; (7) Eletrodo; (8) Fiação de conexão dos eletrodos ao painel de comutação.

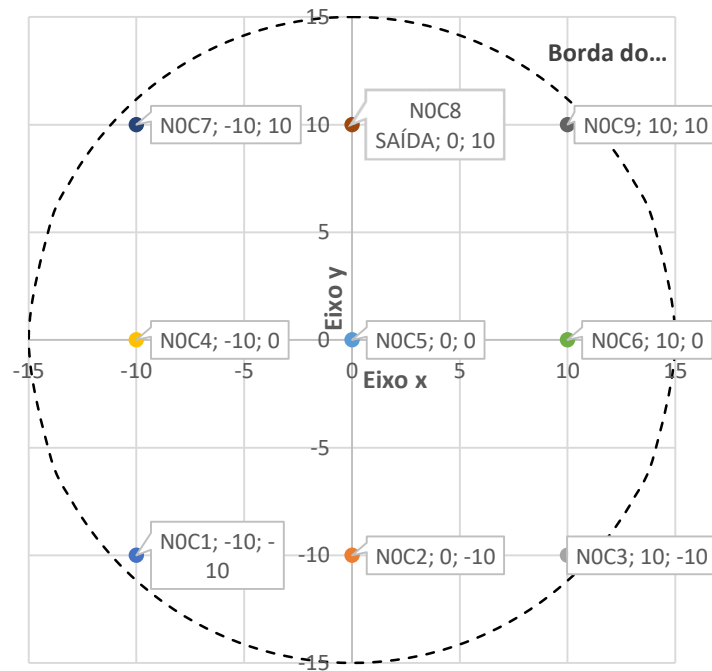
Figura 1 – (A) Vista externa da bancada em fase de montagem para operação; (B) Vista interna com as conexões e a malha de eletrodos



Fonte: O autor

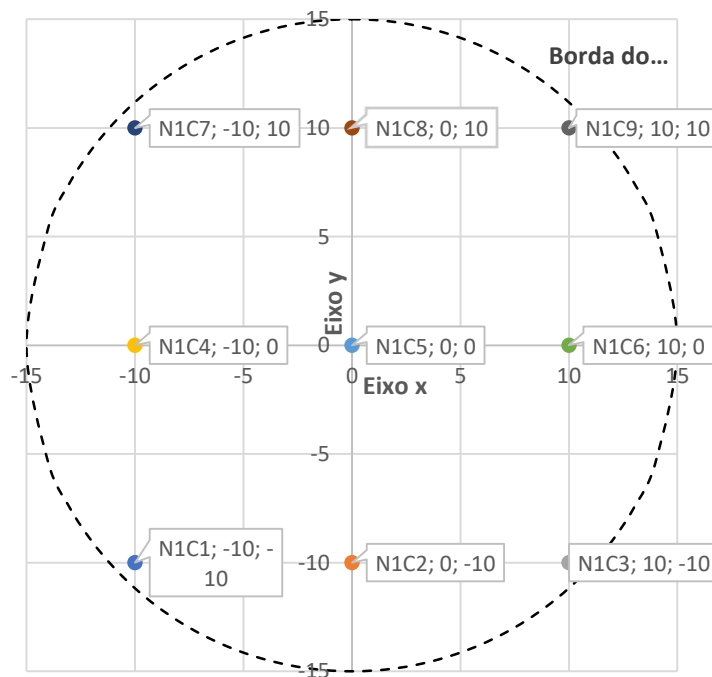
Os eletrodos são fixos em uma fiação de suporte em uma posição correspondente a uma coordenada espacial, um “nó” de uma malha tridimensional. Com as Figuras 2, 3, 4, 5 e 6 indica-se o posicionamento e as coordenadas cartesianas estabelecidas para cada nó da malha de eletrodos.

Figura 2 – Coordenadas de eletrodos no nível 0 – 0 cm da base do tanque  
 Coordenadas de eletrodos - Nível 0 (0 cm)



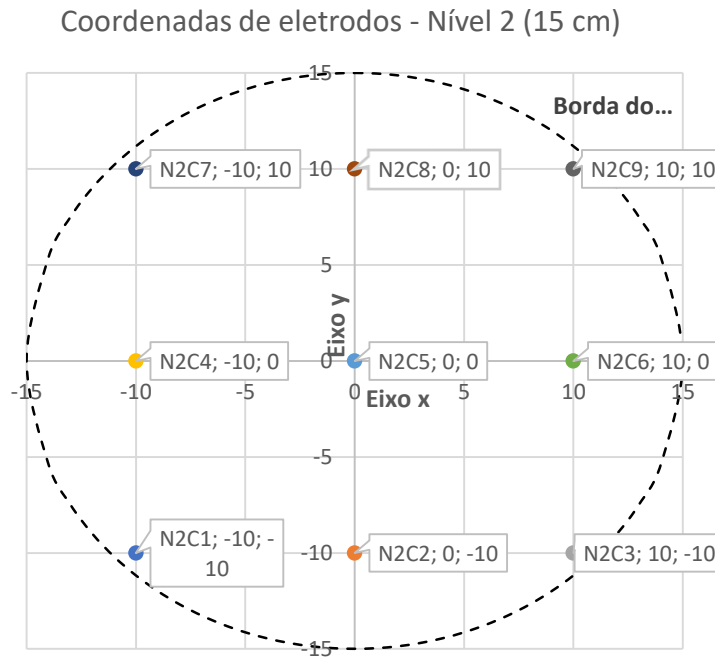
Fonte: O autor

Figura 3 – Coordenadas de eletrodos no nível 1 – 7,5 cm da base do tanque  
 Coordenadas de eletrodos - Nível 1 (7,5 cm)



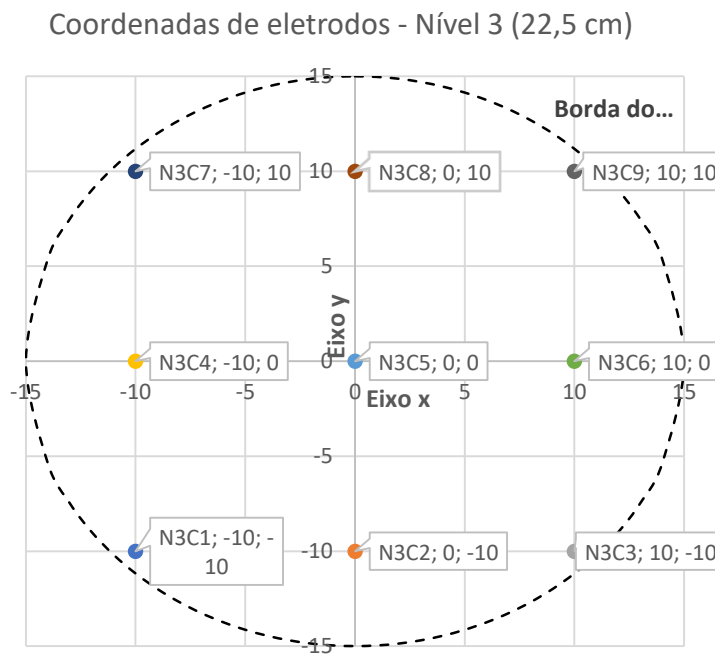
Fonte: O autor

Figura 4 – Coordenadas de eletrodos no nível 2 – 15 cm da base do tanque



Fonte: O autor

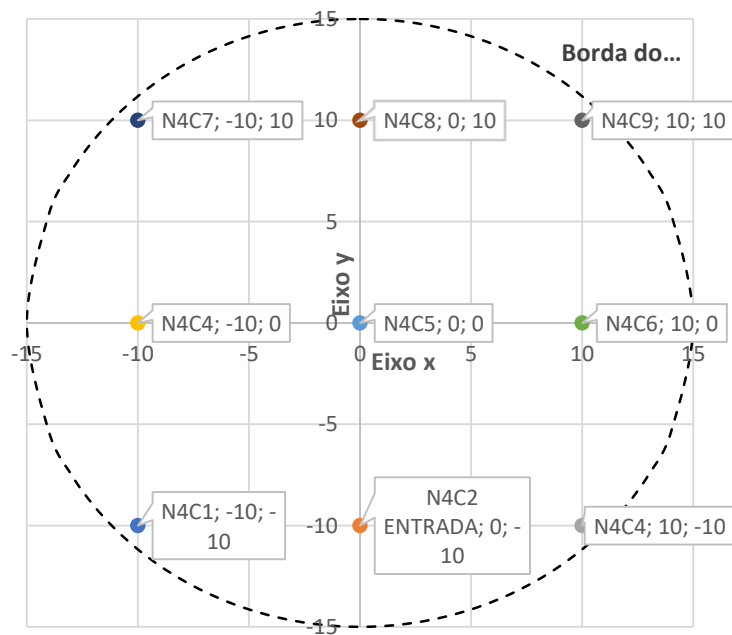
Figura 5 – Coordenadas de eletrodos no nível 3 – 22,5 cm da base do tanque



Fonte: O autor

Figura 6 – Coordenadas de eletrodos no nível 4 – 30 cm da base do tanque

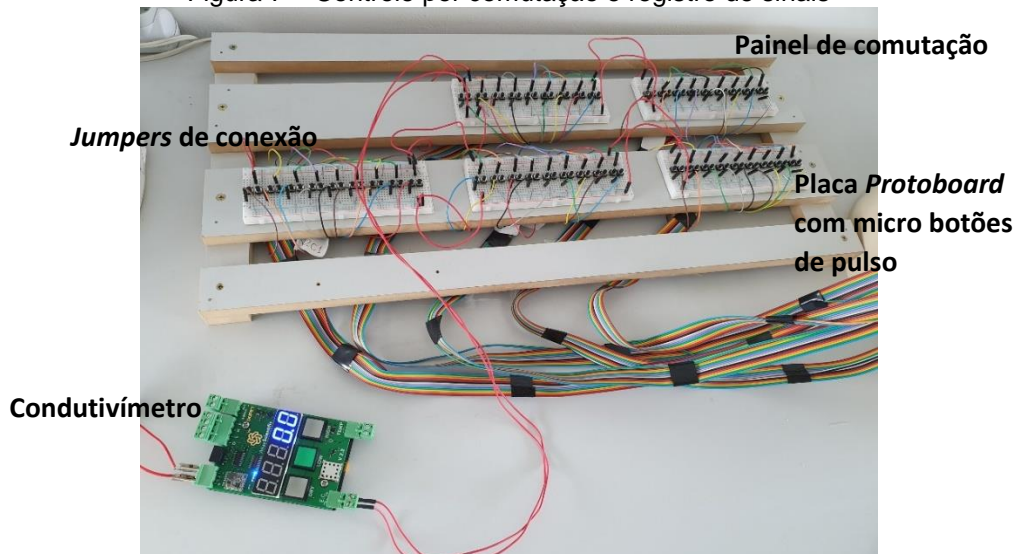
Coordenadas de eletrodos - Nível 4 (30 cm)



Fonte: O autor

São 9 nós de medição em cada nível no interior do reator totalizando 45 pontos de captura de sinais. Cada eletrodo está conectado por sua fiação condutora a uma placa comutadora. Nesta placa controla-se qual eletrodo estará ativo – energizado – no momento de medição. A Figura 7 contém a fotografia do painel de comutação conectado ao condutivímetro.

Figura 7 – Controle por comutação e registro de sinais

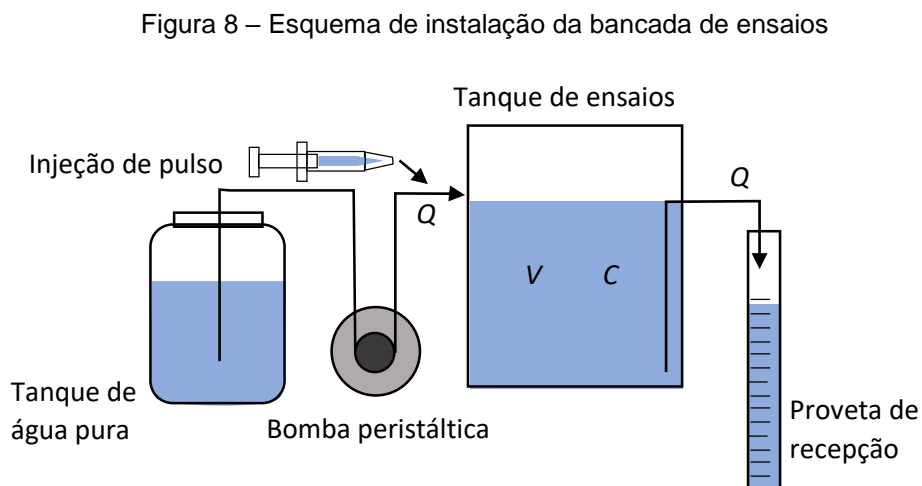


Fonte: O autor

Na operação do sistema as aquisições de sinais são individualizadas, isto é, apenas um único eletrodo é acionado de cada vez, por meio de fechamento de contato entre o eletrodo e o condutivímetro ao ser pressionado o micro botão de pulso. Desta forma evita-se possíveis fugas de corrente nos terminais dos eletrodos. Nesta condição uma rodada completa de medições para os 45 eletrodos tem uma duração média de 3 minutos.

### 3.2 PRÍNCÍPIOS DE OPERAÇÃO DO SISTEMA

A Figura 8 contém um esquema da instalação com o seu circuito hidráulico.



Fonte: O autor

Nota:  $Q$ : Vazão de diluição;  $V$ : Volume útil do reator;  $C$ : Concentração da solução

O sistema é alimentado continuamente com água pura, com uma vazão  $Q$  constante e controlada eletronicamente por meio de uma bomba peristáltica. No instante 0 (zero) da operação um pulso instantâneo com concentração conhecida de solução de NaCl é lançado no tanque na coordenada de entrada – Nó N4C2 (0,-10,30) – e este pulso começa a se propagar no interior do recipiente. Para tanto, preparou-se uma solução com 23,5 g de NaCl dissolvidos em 100 ml de água pura, injetando-se esta solução por meio de duas seringas plásticas (com capacidade de 60 ml cada) providas de agulhas calibrosas, diretamente na mangueira de silicone. A partir do instante 0 se procedem as sucessivas medições de sinais elétricos que são registradas no condutivímetro em rodadas que são menos espaçadas no início da operação, cerca de 5 minutos entre cada uma, e mais espaçadas no decorrer da

operação. O maior período para proceder nova rodada ocorre devido à diluição e a consequente redução de massa no sistema, diante do maior tempo de espera para registro de variações sensíveis da condutividade. No decorrer do ensaio o volume escoado é monitorado continuamente por meio do preenchimento de uma proveta de saída. Medições de volume e tempo são registrados. Nesta proveta também é feita a medição de SDT a cada preenchimento de 2 litros. Outra medição de SDT é feita na saída do reator a cada rodada de medições.

Observações:

- A medição SDT em proveta ocorre em uma amostra homogênea de 2 litros da solução;
- A medição SDT na saída ocorre em uma amostra pontual;
- As medições de sinais elétricos ocorrem em 45 pontos distribuídos no espaço do reator e com duração de obtenção de dados de cerca de 3 minutos.

### 3.3 CALIBRAÇÃO DO SISTEMA

O sinal elétrico obtido a partir da energização de um eletrodo é registrado em um condutímetro. A condutividade de uma solução eletrolítica é um parâmetro de determinação da concentração de Sólidos Dissolvidos Totais – SDT – de uma amostra com íons livres. A partir da concentração de uma amostra é possível obter a massa  $m$  contida na amostra por meio da relação,

$$m = C.V \quad (9)$$

onde  $C$  é a concentração da substância na amostra e  $V$  o volume dessa amostra.

Obter a quantidade de massa propagada em diferentes tempos e espaços, investigar o balanço de massa e, assim, validar os procedimentos e resultados é uma prática comum na avaliação dos escoamentos que envolvem o transporte de massa e essa prática é empregada exaustivamente neste trabalho.

Entretanto, o registro de sinais elétricos que ocorrem nos ensaios do sistema deste trabalho não representa a condutividade em sua unidade padrão, e sim um sinal numérico proporcional a esse padrão. O fato é que um condutímetro comercial é calibrado para a unidade padrão de condutividade com a utilização da sonda de condutividade, que se trata de uma peça com eletrodos especificamente projetados e

dimensionados para atingir o padrão de unidade física para a condutividade ou condutância, o Siemens.

Tendo em vista estas considerações, se fazem necessárias operações de calibração dos dispositivos de aquisição de sinais empregados nestes ensaios para que os sinais colhidos, a partir dos eletrodos empregados, possam ser convertidos em informações plausíveis e confiáveis.

A operação de calibração corresponde à produção de soluções de NaCl diluído em água pura em concentrações previamente conhecidas, sua inserção no tanque de ensaios, homogeneização, e tomadas de medidas de sinais em todos os eletrodos e seus respectivos registros. A operação de calibração é feita em triplicata para cada solução testada.

Para atingir a gama de abrangência de concentrações testadas neste trabalho, as operações de calibração envolveram soluções homogeneizadas de NaCl em água pura, da ordem de 0,0 mg/L (teste de ruído) até 2.500,00 mg/L, em 15 preparos intermediários com temperatura da água e ambiente externo mantidos constantes em 24°C.

Com a obtenção numérica de dados de sinais para cada um dos eletrodos e a respectiva concentração da solução testada, obtém-se a equação de conversão de sinal elétrico para concentração, cujas expressões, traduzidas em polinômios de 2º grau, são apresentadas na seção de Resultados desta dissertação.

### 3.4 MODELOS PARA A CONCENTRAÇÃO

Para efeito comparativo com as situações experimentais, um estudo realizado neste trabalho refere-se a uma hipotética operação com uma distribuição perfeitamente uniforme da concentração do soluto no reator. Também são criados modelos para a descrição da concentração média verificada experimentalmente. Assim, neste item estão descritos os métodos que embasam a formulação destes modelos.

#### 3.4.1 Concentração uniformemente distribuída

Neste caso hipotético de concentração uniforme no volume total do conteúdo no reator, considera-se, de forma idealizada, que a mistura do traçador no volume de

ensaio é instantânea e perfeitamente homogênea, bem como a inserção da vazão de diluição contínua, nos instantes subsequentes, ocorrendo com uma solução perfeitamente e instantaneamente misturada com concentração  $C$  a cada instante  $t$ .

A perda de massa  $\Delta m$  em um intervalo de tempo  $\Delta t$  pode ser calculada pela Equação (10), decorrente do equilíbrio de massa no sistema:

$$\Delta m(t) = -\Delta t Q C(t) \quad (10)$$

Onde  $C(t)$  e  $m(t)$  são, respectivamente, a concentração da solução e a massa do soluto no instante  $t$ , podendo ser relacionadas às diferenças  $C_0 - C$  e  $m_0 - m$ .

Dividindo a Equação (10) pelo volume:

$$\frac{\Delta m(t)}{V} = -\Delta t Q \frac{C(t)}{V} \quad (11)$$

Com  $\Delta m(t)/V = \Delta C(t)$  e rearranjando a equação (11):

$$\frac{\Delta C(t)}{\Delta t} = -Q \frac{C(t)}{V} \quad (12)$$

No limite de  $\Delta t \rightarrow 0$ :

$$\frac{dC}{dt} = -Q \frac{C(t)}{V} \quad (13)$$

Integrando:

$$\int_{C_0}^C \frac{dC}{dC(t)} = -\frac{Q}{V} \int_{t_0}^t dt \quad (14)$$

$$\ln C - \ln C_0 = -\frac{Q}{V} t \quad (15)$$

$$\ln \frac{C}{C_0} = -\frac{Q}{V} t \quad (16)$$

$$C = C_0 e^{-\frac{Q}{V} t} \quad (17)$$

Nesta equação,  $C$  é a concentração no instante  $t$ ,  $C_0$  é a concentração inicial da solução,  $Q$  é a vazão de diluição e  $V$  é o volume total da solução.



As unidades utilizadas neste trabalho são mg para a massa,  $\text{mgL}^{-1}$  para a concentração,  $\text{Lmin}^{-1}$  para a vazão e L para o volume.

A Equação (17) – modelo ideal – é utilizada nos resultados deste trabalho para uma análise de quanto os ensaios reais se dispersam em relação ao modelo ideal.

### 3.4.2 Modelo para a concentração média aferida

A equação da modelagem para a concentração média das soluções ensaiadas, assim como a Equação (17), assume uma forma exponencial natural, a qual, em função da base neperiana costuma apresentar satisfatória aproximação aos fenômenos naturais.

A forma genérica do modelo está representada com a Equação (18).

$$C = a e^{-bt} \quad (18)$$

Os parâmetros a e b são determinados numericamente pelo método das Mínimas Diferenças ao Quadrado utilizando planilha eletrônica.

### 3.5 UNIFORMIDADE DA DISTRIBUIÇÃO DA MASSA

Para subsidiar uma interpretação da distribuição da massa no volume de estudo emprega-se o cálculo do Coeficiente de Variação da amostra. O Coeficiente de Variação – Cv – é dado pela expressão,

$$Cv = \frac{\sigma}{m} \quad (19)$$

onde  $\sigma$  é o desvio padrão e m é a média. Neste caso, o desvio padrão é calculado para as concentrações em coordenadas de um espaço de estudo e a média é das concentrações deste espaço. Calculado em percentuais, um Cv nulo indicaria distribuição perfeitamente homogênea da massa no espaço, um Cv, por exemplo de 100%, indicaria que a distribuição da massa varia em até 100% em relação à média no espaço.

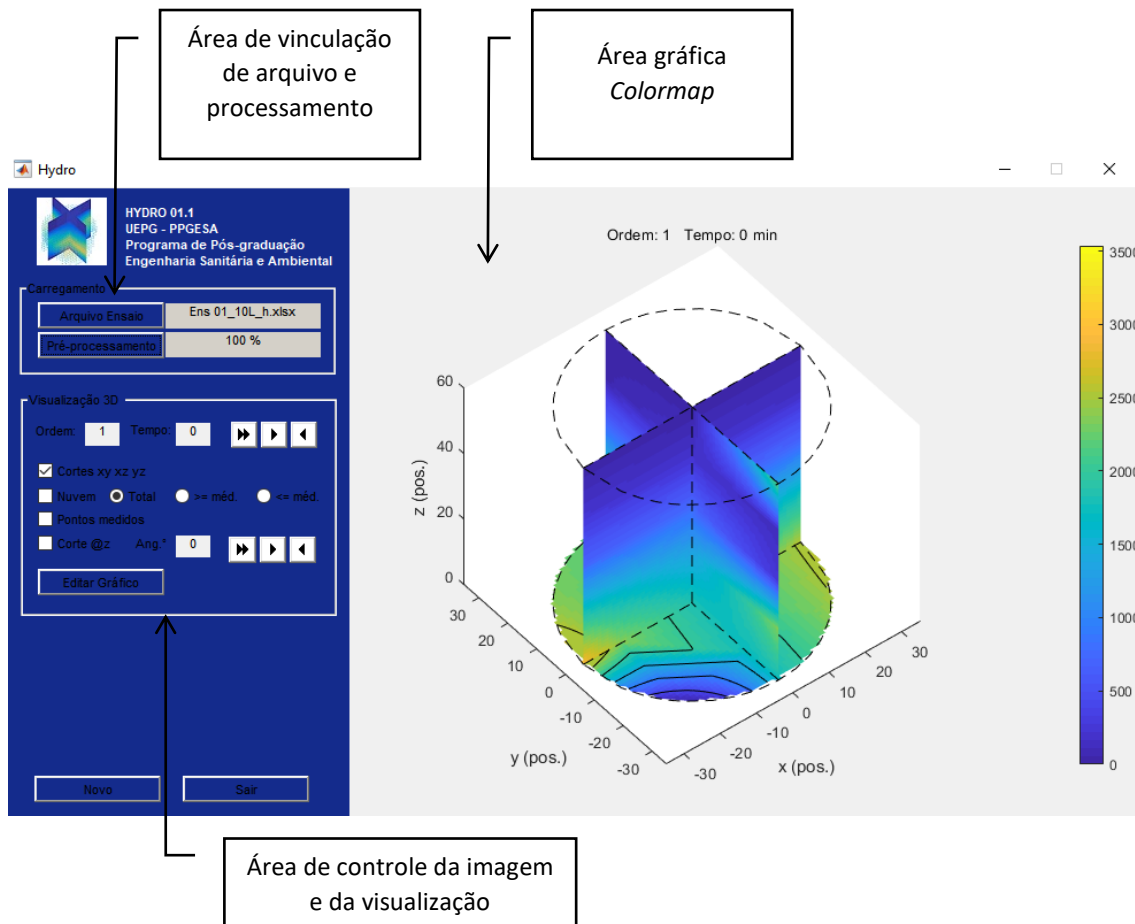
### 3.6 IMAGEAMENTO

Uma importante ferramenta auxiliar na interpretação do movimento no interior do reator é o imageamento. Por meio desta ferramenta é possível observar o comportamento da distribuição do fluxo do traçador, os percursos, zonas específicas e de acúmulos, estagnações, circuitos e deposições além de outras características que podem ser detectadas. O imageamento consiste em cortes no volume do estudo e produção de gráficos tipo *colormap* – mapa de cores vinculados a uma escala cromática relacionada à concentração do soluto.

O Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, área de concentração em Recursos Hídricos e Meio Ambiente desenvolveu o software Hydro, em plataforma MatLab, com adequações específicas para imageamento de volume de estudos em escoamentos tridimensionais. O software extrai e vincula os dados de ensaios registrados em planilhas eletrônicas e processa estes dados proporcionando resultados visuais. O software, a partir dos dados esparsos resultantes de concentrações dos ensaios, interpolados linearmente, produz uma malha tridimensional com resolução de 61x61x61 células de forma a refinar a visualização do espaço de estudo. A visualização de cortes no volume pode ser controlada pelo usuário e as imagens exportadas. Dados pontuais de concentrações estão relacionados numericamente a uma escala de cores e podem ser acessados em qualquer momento e posição diretamente sobre a imagem. Para a aplicação do programa é necessária uma planilha eletrônica de resultados em um formato previamente definido para a leitura automática de dados pelo Hydro.

A Figura 9 contém uma reprodução de tela do software Hydro 1.01 cuja versão foi desenvolvida e adaptada ao reator de estudo deste trabalho, mostrando um exemplo de aplicação com obtenção de imagens em um dos ensaios realizados.

Figura 9 – Reprodução de tela do Software Hydro 1.01



Fonte: O autor

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nos resultados são apresentados os processos de calibração do sistema, correlacionando os sinais elétricos obtidos pela malha de eletrodos com a concentração da solução e os ensaios padronizados, com três repetições para cada vazão nominal de operação. O padrão de resposta para cada um dos ensaios compreende:

- A vazão de diluição e o tempo de operação;
- A massa injetada em pulso;
- A massa detectada e remanescente em cada instante de medição pelos três processos de detecção;
- Dados de validação do ensaio;
- O tempo de detenção da massa em parcelas percentuais e quantitativas;
- Um modelo matemático da concentração;
- Uma análise visual da distribuição da concentração no volume de controle com base no imageamento obtido pelo software Hydro;
- Uma análise do comportamento hidrodinâmico baseada em dados de entrada e saída detectados.

Por fim são discutidos os resultados comparando os valores numéricos entre as repetições de mesma vazão e comparando valores e comportamentos entre os ensaios com diferentes vazões.

Pode-se constatar que a utilização do método de obtenção de dados empregado neste trabalho, por coleta de sinais em coordenadas definidas, que apesar de intrusivo, proporciona informações não apenas de entrada e saída do volume estudado, mas sim de todas as posições e coordenadas deste volume, acarretando a possibilidade de diagnosticar o comportamento do escoamento, seus caminhos preferenciais, deposições, estagnações, circuitos e nuances com previsão satisfatória, inclusive por mapeamento do movimento e investigação de regiões de interesse no volume estudado.

Os ensaios realizados, divididos em módulos operacionais de repetição, estão indicados na Tabela 1.

Tabela 1 – Ensaio operacionais

<b>Módulo</b>	<b>Vazão nominal (L/h)</b>	<b>Denominação do ensaio</b>	<b>Vazão real (L/min)</b>
1	10	Ens 01_10L_h	0,147
		Ens 02_10L_h	0,170
		Ens 03_10L_h	0,171
2	15	Ens 01_15L_h	0,254
		Ens 02_15L_h	0,251
		Ens 03_15L_h	0,253
3	20	Ens 01_20L_h	0,331
		Ens 02_20L_h	0,328
		Ens 03_20L_h	0,327

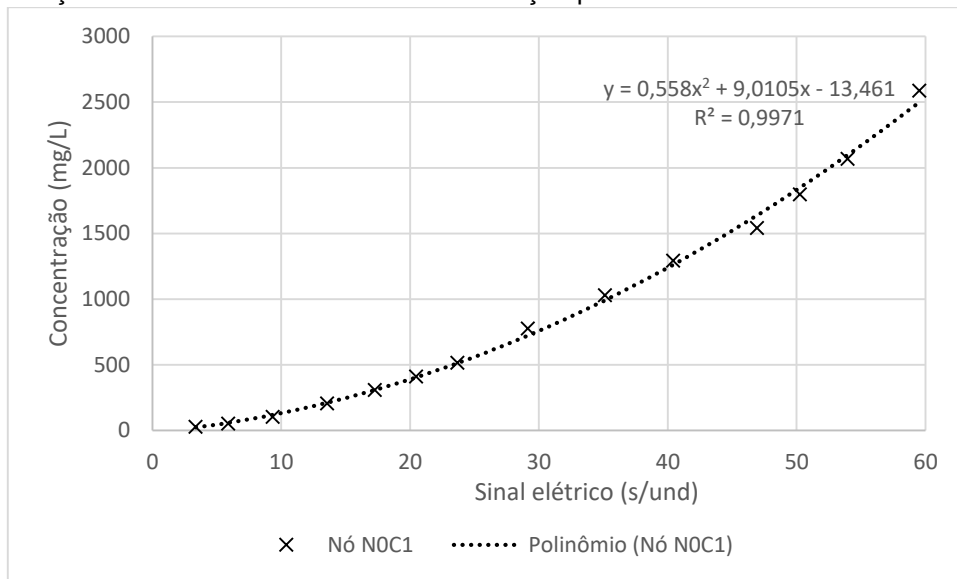
Fonte: O autor

#### 4.1 CALIBRAÇÃO DO SISTEMA

Para calibração do sistema de aquisição de dados foram utilizadas soluções de NaCl puro, homogeneizadas e com concentrações conhecidas, aquisição de sinal elétrico em cada um dos nós da malha de eletrodos e regressão matemática para a curva de correlação entre o sinal elétrico obtido e a correspondente concentração da solução em cada coordenada de nó de medição. Para cada informação a calibrar foram utilizados dados de sinal/concentração no intervalo de operação verificado para cada nó nos ensaios operacionais, abrangendo a faixa específica de sinais elétricos que foram registrados em todos os ensaios realizados. Desta forma a equação de regressão aplicada fica restrita à faixa operacional específica, porém os resultados obtidos são mais confiáveis, o que se pode comprovar com os resultados comparativos que estão descritos a partir do item 4.2 deste trabalho.

A curva de regressão que apresentou melhor ajuste aos sinais medidos foi do tipo polinomial de segunda ordem, atingindo Coeficiente de Determinação  $R^2$  muito próximo ou igual a 1 em todas as regressões. A Figura 10 contém um exemplo da regressão polinomial de segunda ordem obtida para um dos nós da malha de eletrodos.

Figura 10 – Regressão polinomial de segunda ordem para dados de sinal elétrico e correlação com a concentração com dados de um ensaio de calibração para o nó N0C1 da malha de eletrodos



Fonte: O autor

O polinômio de segunda ordem com o formato  $y = ax^2 + bx + c$  tem seus coeficientes **a**, **b** e **c** apresentados na Tabela 2, onde também se inclui a especificação do nó e suas coordenadas **x**, **y** e **z**. Nota-se que alguns dos nós apresentaram oscilação ou instabilidade de sinal durante os ensaios de calibração, neste caso a regressão não foi possível e o cálculo da concentração se efetivou pela média dos valores das concentrações dos nós vizinhos. Os nós N0C8S e N3C2E estão em coordenadas de Saída e Entrada do sistema, respectivamente.

Tabela 2 – Parâmetros dos nós da malha de aquisição de dados para conversão sinal - concentração

Nó	Nível	x (cm)	y (cm)	z (cm)	a	b	c
N0C1	0	-10	-10	0	0,4261	15,1519	-60,2384
N0C2		0	-10	0	0,0282	5,8410	-0,7807
N0C3		10	-10	0	0,0348	4,9908	17,3512
N0C4		-10	0	0	0,0319	5,5595	3,6761
N0C5		0	0	0	0,0341	5,3136	10,3737
N0C6		10	0	0	0,0389	4,9920	15,2153
N0C7		-10	10	0	0,0348	5,8040	5,4777
N0C8 S		0	10	0	*		
N0C9		10	10	0	0,0694	6,0507	14,7396
N1C1	1	-10	-10	7,5	0,0248	6,2328	-4,3112
N1C2		0	-10	7,5	0,0555	3,8938	34,5299
N1C3		10	-10	7,5	0,0390	4,7323	27,4232
N1C4		-10	0	7,5	0,0333	4,9128	13,3766
N1C5		0	0	7,5	0,0224	6,6827	-7,1236
N1C6		10	0	7,5	0,0567	4,5998	17,8789
N1C7		-10	10	7,5	0,0289	6,1458	-3,3341
N1C8		0	10	7,5	0,0371	5,4228	5,6515
N1C9		10	10	7,5	0,0201	7,8546	-33,9365
N2C1	2	-10	-10	15	0,0680	5,1770	0,1171
N2C2		0	-10	15	0,0221	5,8106	-1,4755
N2C3		10	-10	15	0,0254	5,6618	-0,3337
N2C4		-10	0	15	0,0456	5,4146	1,7244
N2C5		0	0	15	0,0168	9,5263	-0,3527
N2C6		10	0	15	*		
N2C7		-10	10	15	*		
N2C8		0	10	15	0,0315	5,8705	-0,1082
N2C9		10	10	15	0,0289	5,5400	1,0281
N3C1	3	-10	-10	22,5	0,0526	6,1019	0,5763
N2C2		0	-10	22,5	0,0491	5,7650	0,2428
N3C3		10	-10	22,5	0,0370	5,8226	0,5877
N3C4		-10	0	22,5	0,9392	-2,3755	24,5340
N3C5		0	0	22,5	0,0384	5,6584	0,9480
N3C6		10	0	22,5	0,0394	5,6377	0,9575
N3C7		-10	10	22,5	0,0398	5,9532	0,2972
N3C8		0	10	22,5	0,0437	5,6965	0,6285
N3C9		10	10	22,5	0,4421	-1,9005	32,2737
N4C1	4	-10	-10	30	0,0281	6,5133	1,2685
N3C2 E		0	-10	30	0,0267	6,4304	0,6745
N4C3		10	-10	30	0,0687	6,0572	1,6239
N4C4		-10	0	30	0,0440	5,9807	1,2769
N4C5		0	0	30	0,0571	5,8545	1,0413
N4C6		10	0	30	0,0266	6,1032	0,4691
N4C7		-10	10	30	0,0429	5,8204	1,1910
N4C8		0	10	30	-0,0223	8,6945	-6,9373
N4C9		10	10	30	0,1973	4,5092	5,2563

Fonte: O autor

Nota: (\*) Nós foram calculados pelas médias das concentrações de nós vizinhos

## 4.2 MÓDULO 1

O Módulo 1 enquadra o conjunto de repetições com vazão nominal de 10 L/h. Com a Tabela 3 mostra-se as características básicas de operação dos ensaios do módulo e alguns resultados preliminares.

Tabela 3 – Características básicas – Módulo 1

<b>Denominação do ensaio</b>	<b>Ens 01_10L_h</b>	<b>Ens 02_10L_h</b>	<b>Ens 03_10L_h</b>
Planilha	Ens01_10L_h.xlsx	Ens 02_10L_h.xlsx	Ens 03_10L_h.xlsx
Vazão de operação (L.min <sup>-1</sup> )	0,147	0,170	0,171
Volume útil do reator(L)	23,5	23,5	23,5
Tempo de operação (min)	330	210	210
Massa injetada em pulso (mg)	23500,00	23500,00	23500,00
Número de tomadas de dados	31	23	23
Volume injetado de água de diluição (L)	48,42	35,70	35,81
Detecção de massa por Coleta de Sinais (%)	98,89	99,39	99,36
Detecção de massa por medição SDT proveta (%)	99,16	99,61	99,65
Detecção de massa por medição SDT saída (%)	97,56	94,11	95,93
Velocidade média do escoamento na seção transversal (m/s)	3,460E-05	4,008E-05	4,020E-05
Número de Reynolds	10,37	12,02	12,05
Tempo de detenção teórico (min)	159,8	138,2	137,4

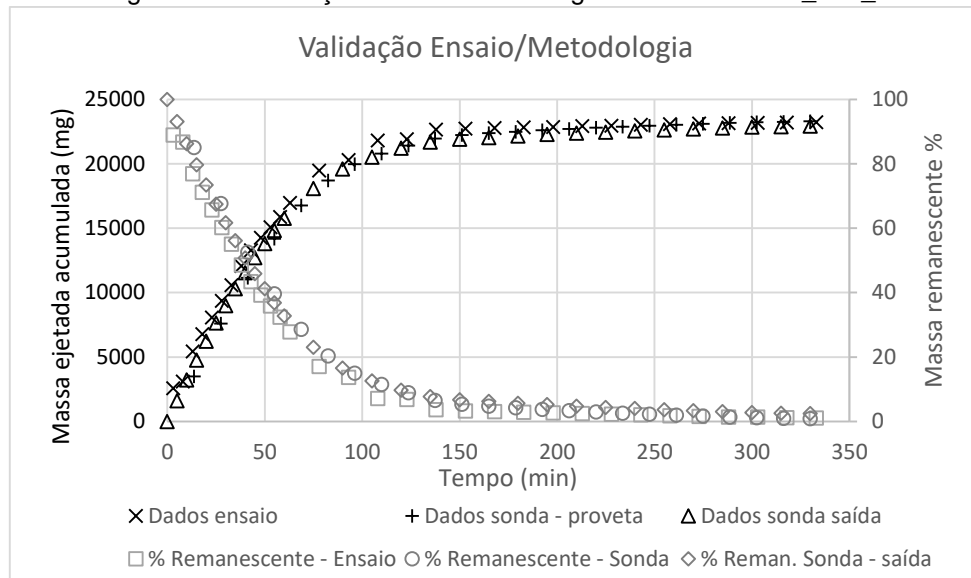
Fonte: O autor

### 4.2.1 Validação dos ensaios e a metodologia empregada

As Figuras 11, 12 e 13 contêm os dados que demonstram a detecção de massa verificada na operação pelos três processos de medição.



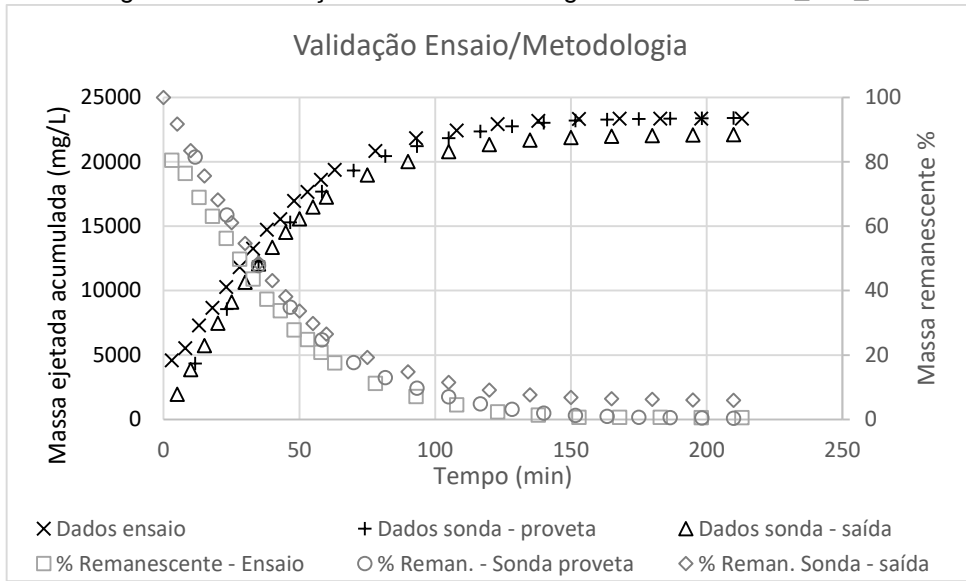
Figura 11 – Validação Ensaio/Metodologia - Ensaio Ens 01\_10L\_h



A Figura 11 apresenta a detecção de massa pelos três processos de medição com dupla saída em função do tempo. Neste ensaio – Ens 01\_10L\_h – as massas ejetadas (recuperadas) do sistema apresentaram valores finais, aos 330 minutos de operação, de 22.927,41 mg, 23.303,65 mg e 23.238,89 mg, respectivamente aos métodos de medição por Sonda SDT na saída do reator, Sonda SDT na proveta de coleta de saída do reator e por Coleta de Sinais. Percebe-se evidente tendência à detecção dos 23.500,00 mg injetados em pulso com níveis de aproximação de 97,56%, 99,16% e 98,89%, também respectivamente aos três métodos já indicados.

A Figura 12 apresenta os resultados do Ensaio Ens 02\_10L\_h onde a detecção, aos 210 minutos de operação, foi de 22.116,34 mg, 23.407,80 mg e 23.356,34 mg, respectivamente aos métodos de medição por Sonda SDT na saída do reator, Sonda SDT na proveta de coleta de saída do reator e por Coleta de Sinais. A detecção de massa ocorreu em níveis de 94,11%, 99,61% e 99,39%, também respectivamente aos três métodos já indicados, com injeção de pulso de 23.500,00 mg de NaCl.

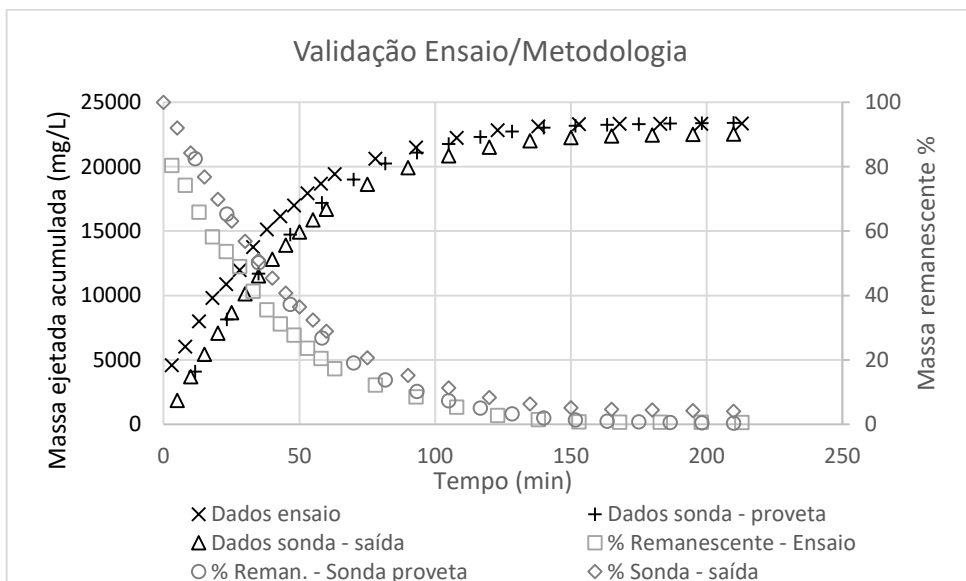
Figura 12 – Validação Ensaio/Metodologia - Ensaio Ens 02\_10L\_h



Fonte: O autor

A Figura 13 apresenta os resultados do Ensaio Ens 03\_10L\_h onde a detecção, aos 210 minutos de operação, foi de 22.543,37 mg, 23.417,06 mg e 23.350,35 mg, respectivamente aos métodos de medição por Sonda SDT na saída do reator, Sonda SDT na proveta de coleta de saída do reator e por Coleta de Sinais. A detecção de massa ocorreu em níveis de 95,93%, 99,65% e 99,36%, também respectivamente aos três métodos já indicados, com injeção de pulso de 23.500,00 mg de NaCl.

Figura 13 – Validação Ensaio/Metodologia - Ensaio Ens 03\_10L\_h



Fonte: O autor

Convém esclarecer que o método de Sonda SDT para amostra da saída do reator ocorre de forma instantânea em uma amostra específica da saída no momento de tomada de medida. O método Sonda SDT – proveta – consiste na medição SDT de 2 litros de amostra acumulados na proveta de recepção. O método por aquisição de sinais detecta a cada medição a massa contida em todo o tanque de ensaios.

Pode-se mencionar que o prolongamento do tempo de execução do ensaio poderia proporcionar índices ainda mais próximos da detecção de 100% da massa injetada, porém os incrementos de massa ejetada tornaram-se, ao final da série de medições, praticamente indetectáveis, dadas às baixas concentrações remanescentes e suas pequenas influências na condutividade da solução.

Considerando a coerência dos resultados obtidos e a convergência no cálculo da massa recuperada, comparando-se com a massa injetada, pode-se admitir a validação em nível satisfatório dos ensaios realizados e dos métodos adotados.

#### 4.2.2 Tempo de Detenção da massa injetada

Para efeito de comparação relativa, pode-se calcular o tempo médio de permanência teórico em uma situação ideal, dado por:

$$t_H = \frac{V}{Q} \quad (20)$$

Para os ensaios do Módulo 1 os valores de  $t_H$  foram de 159,8 min, 138,2 min e 137,4 min respectivamente ao 1º, 2º e 3º ensaio.

A massa em pulso é injetada instantaneamente no reator, porém sua ejeção do sistema é gradativa e decorre do processo de diluição contínua pela adição de água pura com a vazão de operação em regime permanente e que proporciona componentes advecivas ao transporte da massa. Nos instantes iniciais de operação ocorre uma ejeção de massa com maior descarga a qual no decorrer do tempo reduz sensivelmente, chegando a níveis praticamente indetectáveis, quando se optou pelo encerramento das medições.

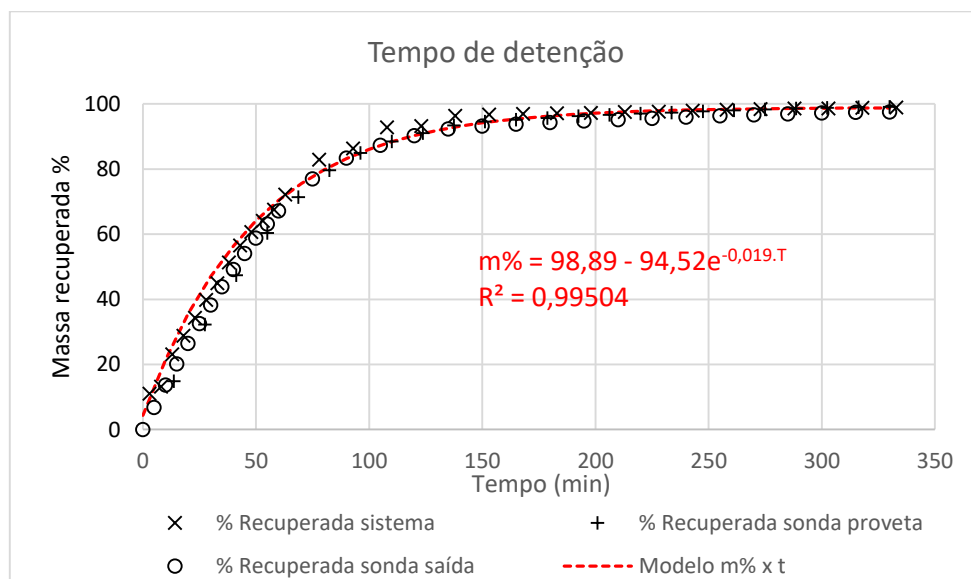
Nesta condição, apesar do regime permanente do escoamento, o transporte de massa do soluto no interior do reator é transiente, conferindo uma descarga de massa variável do soluto na saída do reator. Este comportamento decorre da distribuição não uniforme, não homogênea, do soluto no solvente e da diluição contínua o que conduz a uma concentração decrescente no interior do reator.

Assim, o tempo de permanência da massa no reator é variável e as eventuais reações químicas que possam ocorrer em virtude de tempo de contato entre soluto e solvente tem sua cinética afetada pelo comportamento hidrodinâmico interno. Ainda, considerando que neste sistema de estudo não houve, propositalmente, homogeneização mecânica da solução no reator, justamente para estabelecer a capacidade do sistema de medição detectar comportamentos naturais e proporcionar sua identificação pelas ferramentas empregadas, verifica-se que a descarga de massa do sistema pode ocorrer conforme as regiões são diluídas ocasionando oscilações quantitativas, porém com clara tendência de regularização e redução ao longo do tempo.

As afirmações acima têm sua base na análise de resultados de detecção de massa no volume controlado e na visualização da distribuição desta massa, que será abordada em resultados de imageamento que são discutidos em item seguinte neste trabalho.

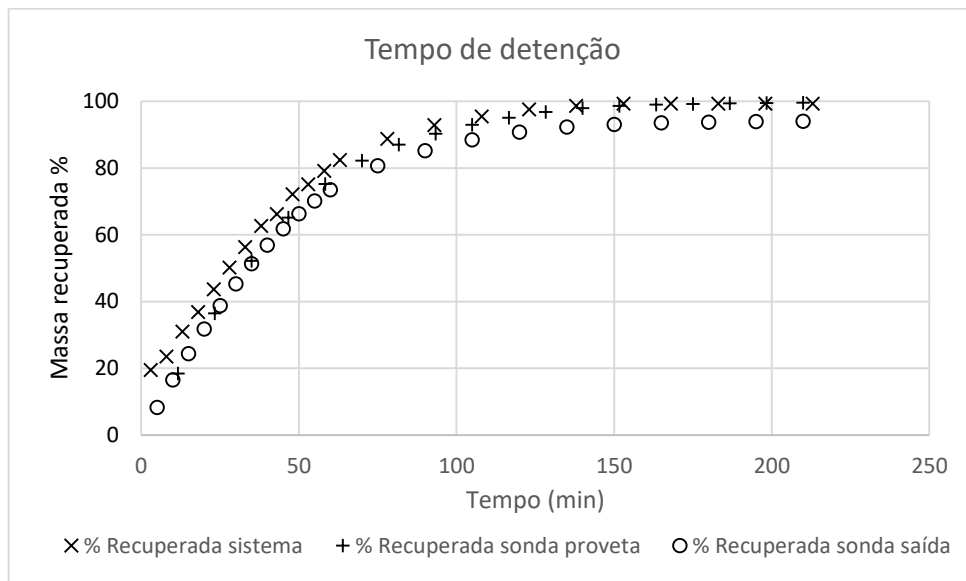
Por meio do registro de dados representados graficamente nas Figuras 14, 15 e 16 pode-se perceber a evolução da detecção de massa recuperada pelos 3 métodos de medição nos ensaios do Módulo 1. Para o ensaio Ens 01\_10L\_h – Figura 4.3a – o tempo total de operação foi de 330 minutos, enquanto do ensaio Ens 02\_10L\_h – Figura 4.3b e do ensaio Ens 03\_10L\_h – Figura 4.3c, os tempos foram de 210 minutos, quando os percentuais de massa recuperada (ejetada) atingiram níveis próximos de 99% da massa injetada em pulso.

Figura 14 – Tempo de detenção e percentual de massa recuperada – Ensaio Ens 01\_10L\_h.



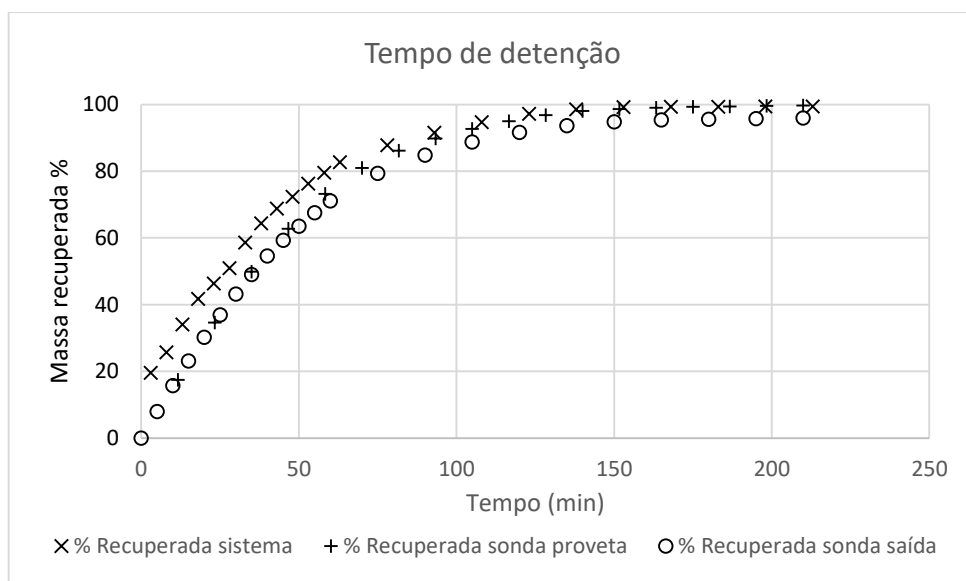
Fonte: O autor

Figura 15 – Tempo de detenção e percentual de massa recuperada – Ensaio Ens 02\_10L\_h



Fonte: O autor

Figura 16 – Tempo de detenção e percentual de massa recuperada – Ensaio Ens 03\_10L\_h



Fonte: O autor

Além da convergência apresentada pelos três métodos de medição que ratifica o emprego da metodologia de aquisição de dados pela malha de eletrodos, é importante constatar a variabilidade da ejeção de massa e o consequente tempo de detenção em função da inclinação, ou a derivada da curva Tempo X Massa ejetada apresentada nos gráficos. A alta atividade inicial da curva decorre da maior descarga de massa, enquanto nos períodos subsequentes a atividade reduz tendendo à horizontalidade e a uma descarga nula.

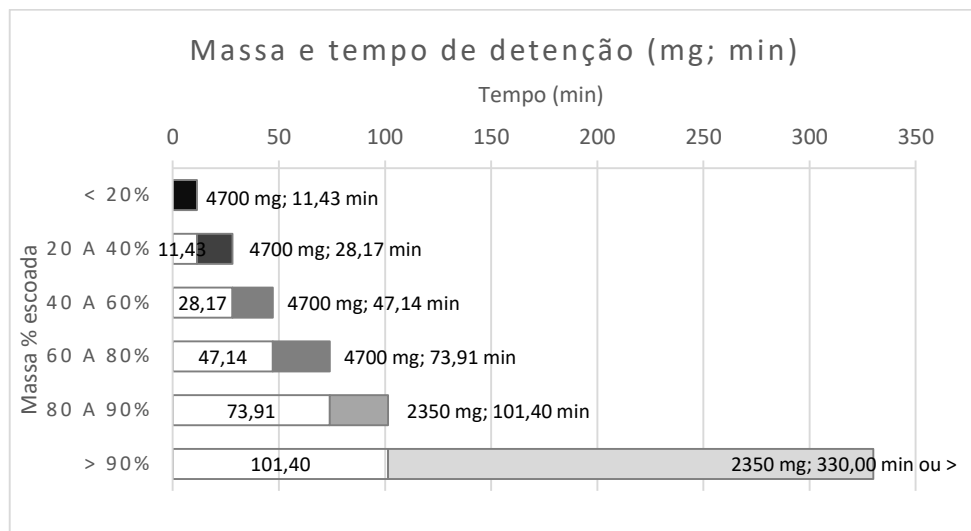
Um modelo matemático, plotado no gráfico da Figura 14, para o percentual de massa descarregada em função do tempo de operação pode ser expresso pela equação (9) que foi obtida pela regressão de dados com origem nos sinais da malha de eletrodos para uma equação exponencial natural, utilizando a ferramenta Cftool – Matlab.

$$m\% = 98,99 - 94,52 e^{(-0,0199 t)} \quad (21)$$

A Equação (21) retorna o percentual de massa ejetada do sistema (m%) para um tempo máximo de permanência  $t$ , e obteve um Coeficiente de Determinação  $R^2$  de 0,99504 quando os resultados da equação foram comparados aos dados experimentais por coleta de sinais.

Para uma percepção da variabilidade de permanência da massa no sistema de uma forma abrangente, nas Figuras 17, 18 e 19 apresenta-se os histogramas de permanência por parcelas de massas ejetadas para cada um dos ensaios do Módulo 1.

Figura 17 – Parcelas de massas ejetadas no decorrer do tempo – Ens 01\_10L\_h

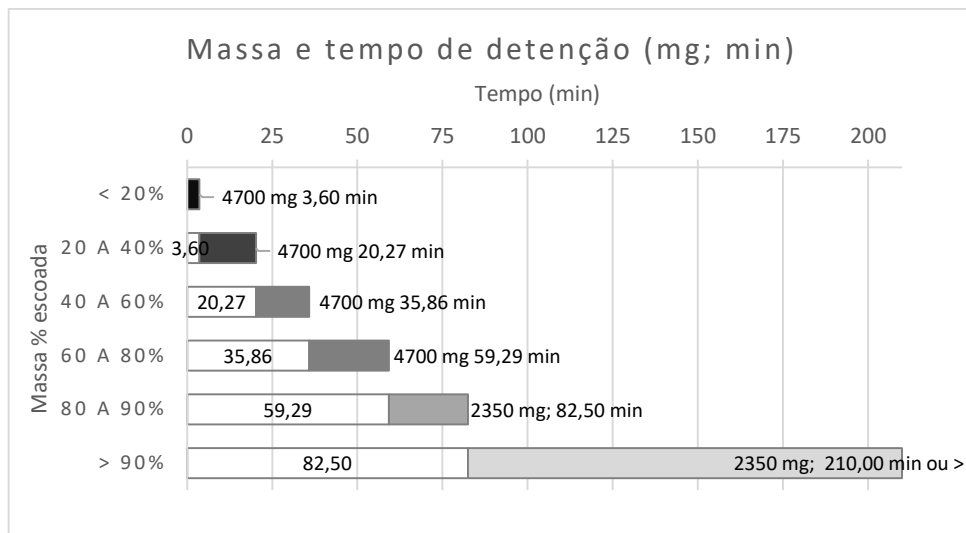


Fonte: O autor

Considerando o total de massa injetada – 23.500,00 mg – verifica-se pelos dados extraídos do ensaio Ens 01\_10L\_h, segundo o método de coleta de sinais elétricos, que até 20% da massa – 4.700,00 mg – deixaram o sistema nos primeiros 11,43 minutos de operação. Outros 20% da massa foram ejetados do sistema de

11,43 minutos até 28,17 minutos. Mais 20% da massa levou de 28,17 até 47,14 minutos para deixar o sistema. Os próximos 20% da massa foram ejetados entre 47,14 e 73,91 minutos. Os seguintes 10% da massa – 2.350,00 mg – deixaram o sistema entre 73,91 e 101,40 minutos. Por fim os 10% restantes permanecem no sistema por um tempo entre 101,40 minutos e um valor superior dependendo do tempo de operação aplicado. Como neste ensaio a operação foi interrompida aos 330 minutos ainda existe massa remanescente no reator, porém, salienta-se que sempre existirá massa residual, por mais prolongado que seja o tempo de operação.

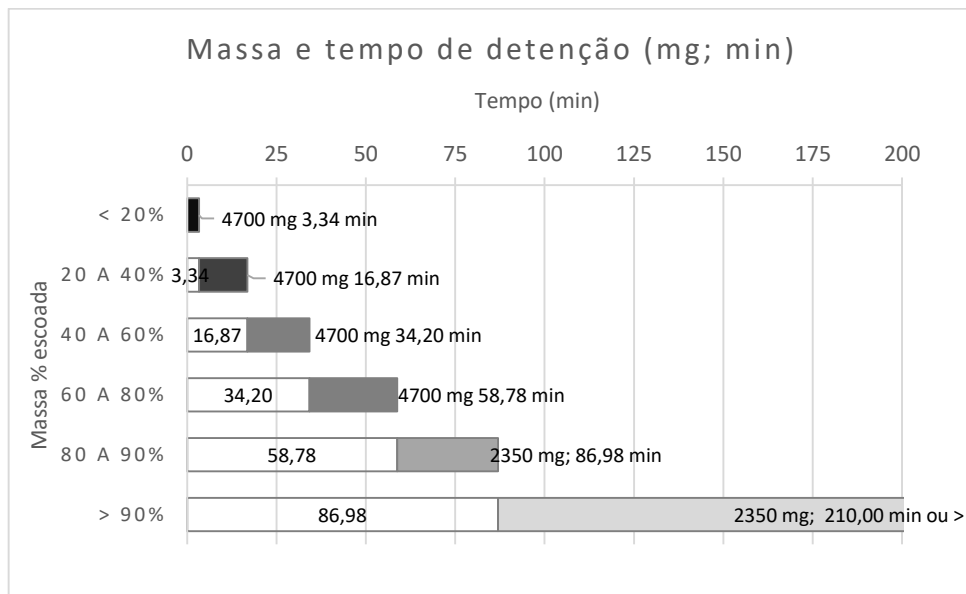
Figura 18 – Parcelas de massas ejetadas no decorrer do tempo – Ens 02\_10L\_h



Fonte: o autor

Considerando o total de massa injetada – 23.500,00 mg – verifica-se pelos dados extraídos do ensaio, segundo o método de coleta de sinais elétricos, que até 20% da massa – 4.700,00 mg – deixaram o sistema nos primeiros 3,6 minutos de operação. Outros 20% da massa foi ejetada do sistema de 3,6 minutos até 20,27 minutos. Mais 20% da massa levou de 20,27 até 35,86 minutos para deixar o sistema. Os próximos 20% da massa foi ejetada entre 35,86 e 59,29 minutos. Os seguintes 10% da massa – 2.350,00 mg – deixaram o sistema entre 59,29 e 82,50 minutos. Por fim os 10% restantes permanecem no sistema por um tempo acima de 82,50 minutos.

Figura 19 – Parcelas de massas ejetadas no decorrer do tempo – Ens 03\_10L\_h



Fonte: o autor

Considerando o total de massa injetada – 23.500,00 mg – verifica-se pelos dados extraídos do ensaio, segundo o método de coleta de sinais elétricos, que até 20% da massa – 4.700,00 mg – deixaram o sistema nos primeiros 3,34 minutos de operação. Outros 20% da massa foi ejetada do sistema de 3,34 minutos até 16,87 minutos. Mais 20% da massa levou de 16,87 até 34,20 minutos para deixar o sistema. Os próximos 20% da massa foi ejetada entre 34,20 e 58,78 minutos. Os seguintes 10% da massa – 2.350,00 mg – deixaram o sistema entre 58,78 e 86,98 minutos. Por fim os 10% restantes permanecem no sistema por um tempo acima de 86,98 minutos.

Verifica-se pelos resultados obtidos a influência da componente advecitiva de transporte de massa decorrente do aumento de vazão e respectiva velocidade de escoamento, ocasionando o menor tempo de detenção nos ensaios Ens 02\_10L\_h e Ens 03\_10L\_h.

#### Observação:

Os tempos de detenção verificados experimentalmente nos ensaios do Módulo 1 são expressivamente inferiores aos calculados pela hipótese em processo ideal por  $T_H = V / Q$ .



#### 4.2.3 Modelos para as concentrações

As modelagens para as concentrações, em função do tempo de operação, foram estimadas para duas situações. Uma hipotética situação de mistura completa no reator, com homogeneidade perfeita da solução, que poderia ser experimentalmente e aproximadamente obtida por meio de homogeneização mecânica. Teoricamente pode-se aplicar a Equação (22) que depende da vazão de operação e do volume do reator como pode ser visto no item 3.4.1 da metodologia deste trabalho.

Modelo ideal:

$$C = C_0 e^{-\frac{Q}{V}t} \quad (22)$$

Onde C é a concentração da solução no instante t, C<sub>0</sub> é a concentração inicial da solução, Q é a vazão de injeção de água pura e V é o volume útil do reator.

A modelagem matemática com dados experimentais, utilizando a equação base,

$$C = a e^{-bt} \quad (23)$$

se realizou com os dados de sinais elétricos da malha de eletrodos, a qual decorre da variabilidade de concentrações verificadas no espaço estudado. Para obtenção dos parâmetros otimizados da modelagem aplicou-se o método das Mínimas Diferenças ao Quadrado – MDQ – e os resultados estão inseridos na Tabela 4.3.

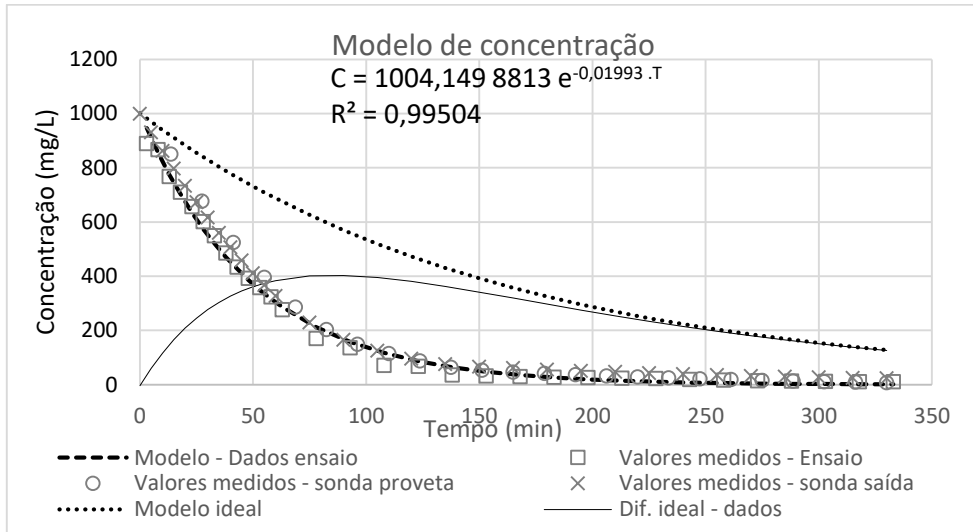
Tabela 4 – Modelos matemáticos para a concentração média

<b>Ensaio</b>	<b>Equação ideal</b>	<b>Equação modelada</b>
Ens 01_10L_h	$C = 1000 e^{-0,006255 t}$	$C = 1004,149 e^{-0,01993 \cdot T}$
Ens 02_10L_h	$C = 1000 e^{-0,0072340t}$	$C = 930,4503 e^{-0,024485 \cdot T}$
Ens 03_10L_h.	$C = 1000 e^{-0,0072553t}$	$C = 901,9941 e^{-0,024575 \cdot T}$

Fonte: O autor

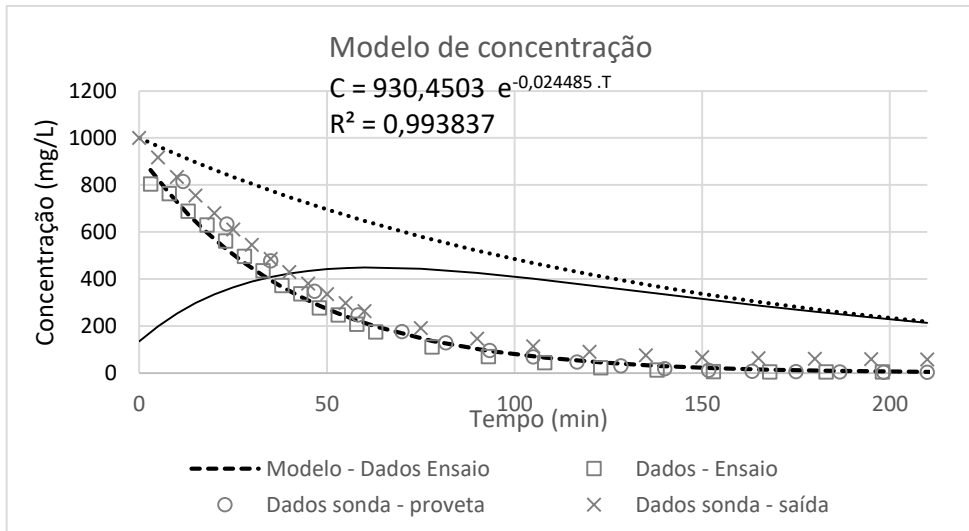
As concentrações médias obtidas nos ensaios pelos três métodos de medição e as curvas dos modelos estão plotadas nas Figuras 20, 21 e 22.

Figura 20 – Concentrações médias e modelos - Ens 01\_10L\_h



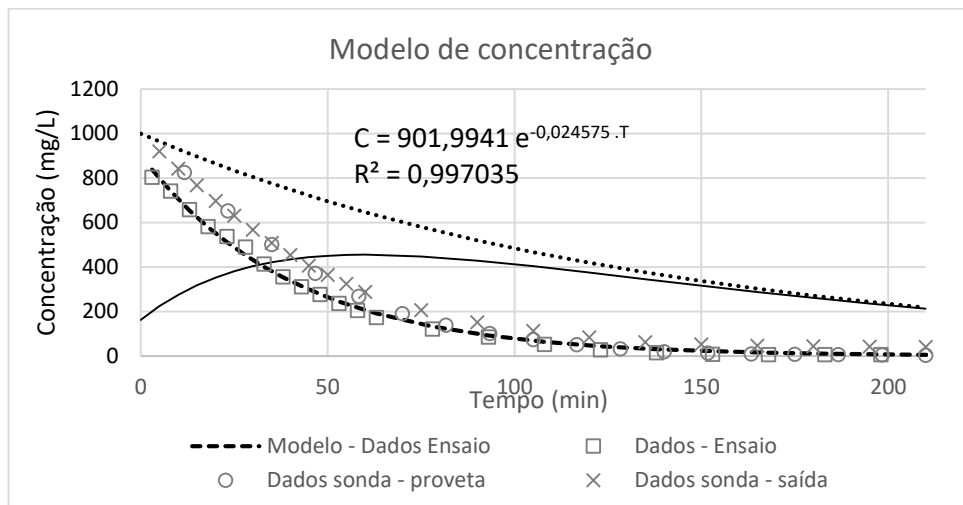
Fonte: O autor

Figura 21 – Concentrações médias e modelos - Ens 02\_10L\_h



Fonte: O autor

Figura 22 – Concentrações médias e modelos - Ens 03\_10L\_h



Fonte: O autor

As concentrações médias obtidas pelos três métodos de medição demonstraram-se coerentes entre si com nível satisfatório de aproximação com um Coeficiente de Determinação  $R^2$  muito próximo a um (1) no mais desfavorável comparativo, entre os valores do método de sinais e os valores do método SDT - saída.

Como esperado, a curva do modelo experimental apresentou um forte decaimento inicial quando comparada à curva do modelo ideal, fato inclusive verificado por análise de imageamento discutido a seguir neste trabalho. Este comportamento se verifica em função do adensamento da massa espalhada no reator no sentido entrada → saída, superfície → fundo, pela ausência de mistura artificial no experimento realizado.

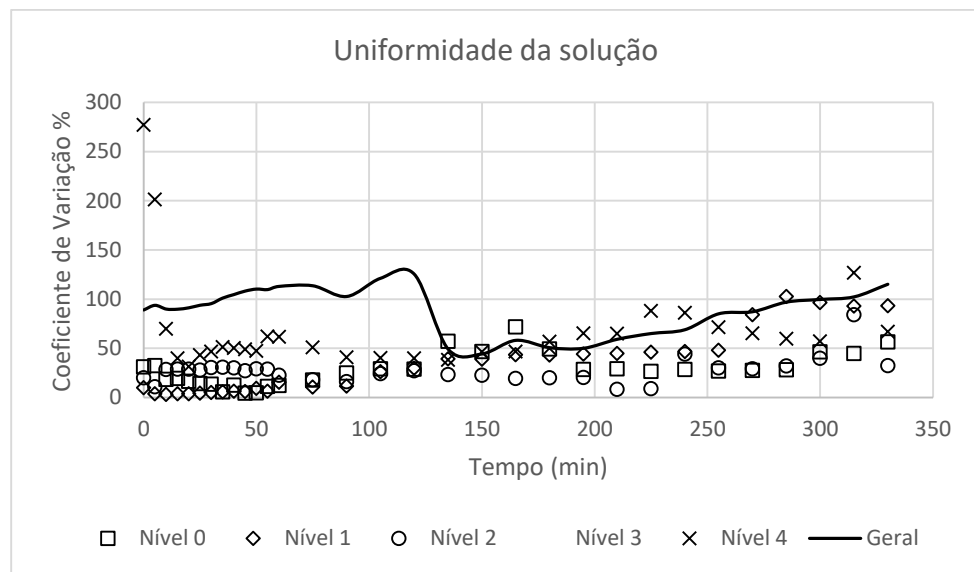
O modelo ideal apresenta um decaimento suave de concentração média pelo fato de considerar uma diluição completa da solução acarretando uma descarga de massa igualmente suavizada.

As Figuras 20, 21 e 22 incluem curvas de diferença entre as concentrações do modelo ideal e modelo experimental ao longo do tempo. Esta curva permite obter noção da disparidade entre os modelos experimentais e os modelos ideais. Verifica-se que essa diferença tem pico próximo aos 90 minutos de operação no ensaio Ens 01\_10L\_h, próximo aos 60 minutos no ensaio Ens 02\_10L\_h e próximo aos 60 minutos no ensaio Ens 03\_10L\_h.

#### 4.2.4 Análise de uniformidade

Para uma análise quanto à uniformidade da concentração em cada nível do reator e em todo o volume, estão inseridos os cálculos do Coeficiente de Variação das concentrações nestes níveis e neste volume, que estão representados em função do tempo, no gráfico da Figura 23 para os dados do ensaio Ens 01\_10L\_h.

Figura 23 – Coeficiente de Variação para o ensaio Ens 01\_10L\_h

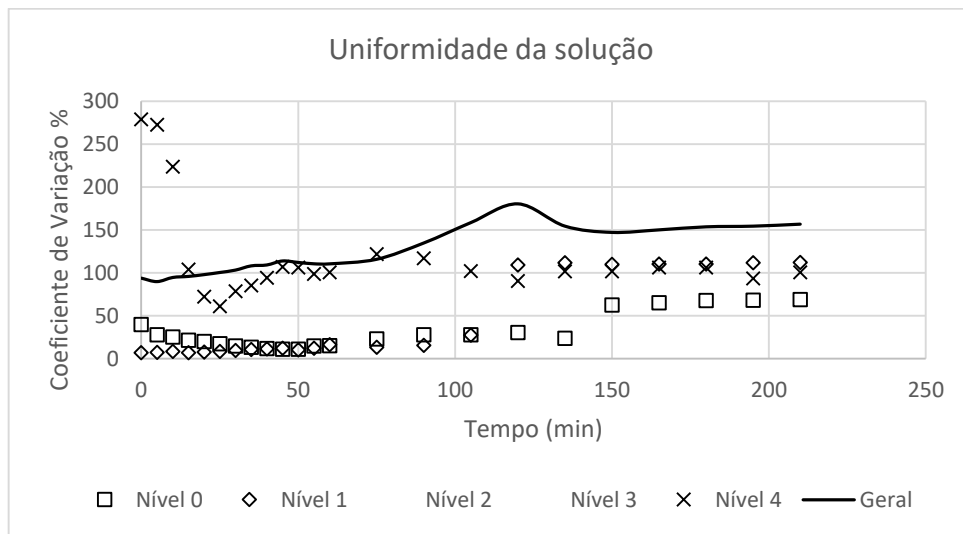


Fonte: O autor

Pode-se verificar pela Figura 23 que os coeficientes de variação tendem a uma distribuição mais homogênea em seus níveis específicos até o instante de 120 minutos, onde, até então, ocorreram os movimentos mais intensos de transporte de massa. Esses coeficientes de variação, calculados para o mesmo nível, proporcionam uma interpretação da variação horizontal da concentração. No Nível 4 – superfície do reator – o Coeficiente de Variação denota, nos minutos iniciais, o efeito do lançamento do pulso mássico no sistema. No instante 120 min ocorre o pico de variação interníveis – Coeficiente de Variação Geral – o que traduz uma interpretação da variabilidade vertical da concentração e subsequente tendência a uma homogeneização. Porém, a partir dos instantes seguintes, com o aumento da diluição da pouca massa remanescente, os coeficientes interníveis se tornam gradativamente mais dispersos e a variação relativa tende a aumentar.

Para o ensaio Ens 02\_10L\_h os dados estão plotados na Figura 24.

Figura 24 – Coeficiente de Variação para o ensaio Ens 02\_10L\_h

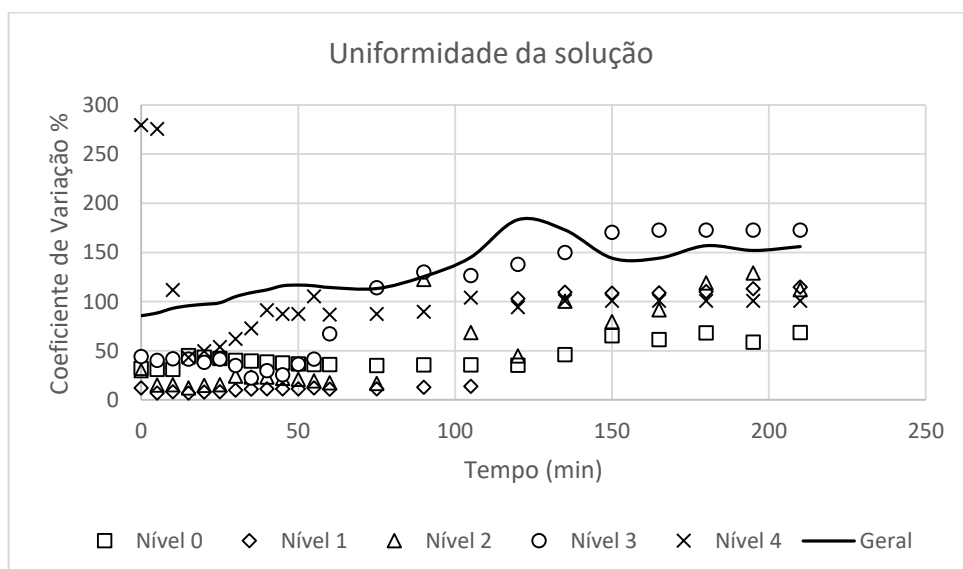


Fonte: O autor

Também, no instante – 120 min – denota-se o pico de variação interníveis – Coeficiente de Variação Geral – e relativa estabilidade posterior da distribuição da massa no volume de estudo.

Para o ensaio Ens 03\_10L\_h os dados estão plotados no gráfico da Figura 25.

Figura 25 – Coeficiente de Variação para o ensaio Ens 03\_10L\_h



Fonte: O autor

Também, no instante – 120 min – denota-se o pico de variação interníveis – Coeficiente de Variação Geral – e relativa estabilidade posterior da distribuição da massa no volume de estudo.

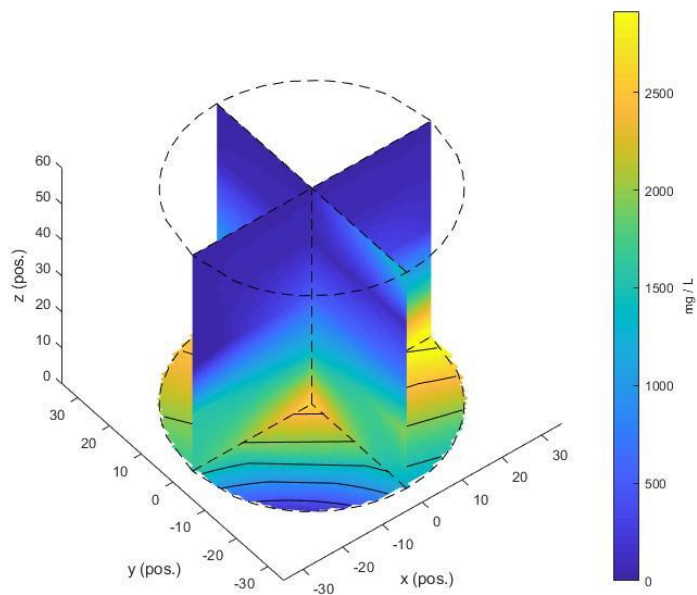
No patamar de vazão para os ensaios do Módulo 1 observa-se que a máxima heterogeneidade da distribuição da massa no volume ocorre em duas horas de operação, instante em que mais de 90% da massa injetada já deixou o sistema e a concentração média atinge valores mínimos medidos no intervalo de operação com baixa descarga de massa na saída.

#### 4.2.5 Análise de imageamento

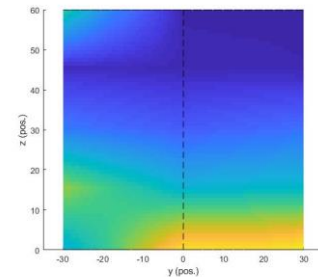
A visualização da distribuição da concentração por meio de cortes específicos no volume de estudo proporciona o entendimento do transporte de massa no espaço-tempo e esclarece diversos aspectos relacionados a esse transporte. O uso de gráficos tipo “colormap” obtidos para cada instante de medição conduz a análises precisas sobre o comportamento hidrodinâmico. No ensaio Ens 01\_10L\_h, apesar do escoamento apresentar um regime laminar, com número de Reynolds de 10,37, denota-se a relativamente rápida deposição de massa para as regiões inferiores do reator. Com a Figura 26 apresenta-se algumas imagens selecionadas do ensaio.

Figura 26 – Imageamento das concentrações da solução – Ensaio Ens01\_10L\_h

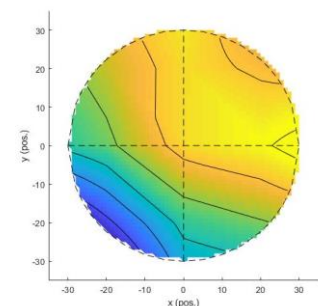
Ordem 1, Tempo 0 min – Corte duplo radial e de fundo



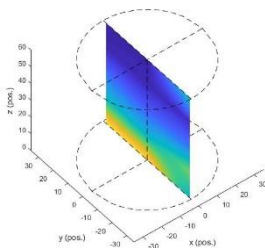
Corte radial vertical – Vista yz



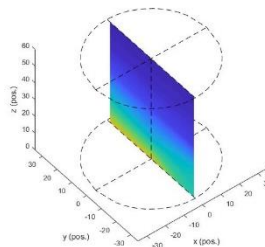
Corte horizontal – Vista xy



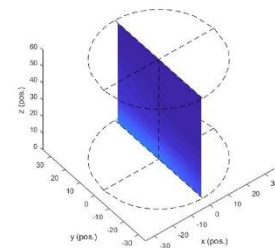
Corte radial 90° Tempo 0 min



Corte radial 90° Tempo 15 min



Corte radial 90° Tempo 30 min



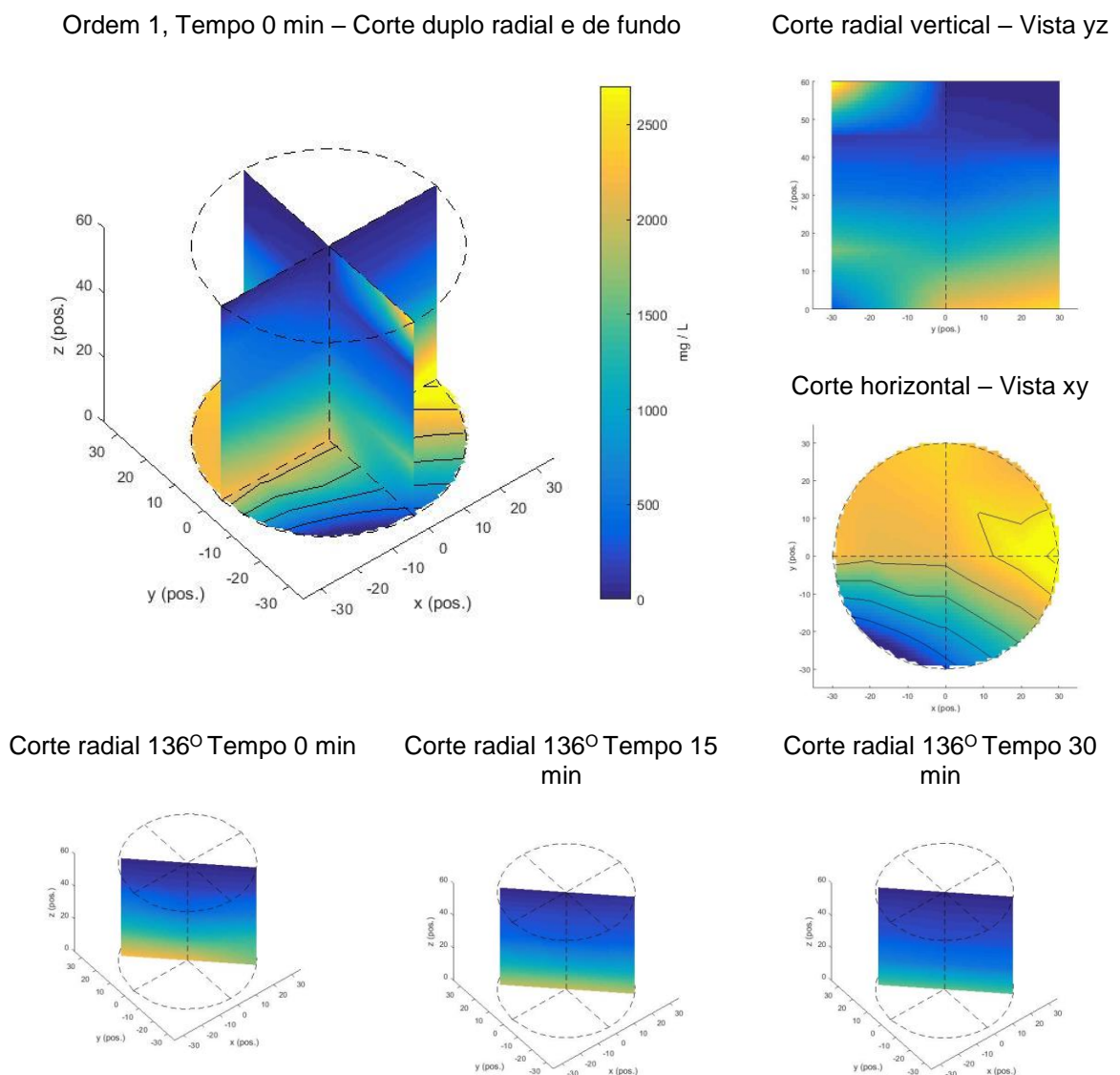
Fonte: O autor – Software Hydro 1.01

O corte duplo radial e de fundo, com posicionamento das concentrações por *colormap*, revela próximo da coordenada (0, -30, 60) pontos – (0, -15, 30) cm – s de entrada do reator, a concentração remanescente do pulso de injeção após a medição em instante 0. Também se percebe essa imagem, em termos reminiscentes no corte radial yz, já que os dados dessa situação são obtidos após o tempo de aquisição iniciado no instante 0 minutos. Com estes cortes também se percebe a deposição de massa nas regiões inferiores do reator, com uma clara tendência para o primeiro quadrante do cilindro de teste. Os cortes radiais a 90° nos tempos de 0, 15 e 30 minutos, apresentam o deslocamento de massa no plano diametral yz, podendo-se constatar o transporte de massa no sentido entrada → saída do reator, promovido pelo

escoamento de diluição. Percebe-se também, nestes cortes radiais, a gradativa diluição da solução pela avaliação dos níveis de concentrações apresentados nos mapas de cores.

No ensaio Ens 02\_10L\_h, apesar do escoamento apresentar um regime laminar, com número de Reynolds de 12,02, denota-se a relativamente rápida deposição de massa para as regiões inferiores do reator. Com a Figura 27 apresentase algumas imagens selecionadas do ensaio.

Figura 27 – Imageamento das concentrações da solução Ensaio Ens02\_10L\_h



Fonte: O autor – Software Hydro 1.01

O corte duplo radial e de fundo, com posicionamento das concentrações por *colormap*, revela próximo da coordenada (0, -30, 60) de entrada do reator, a

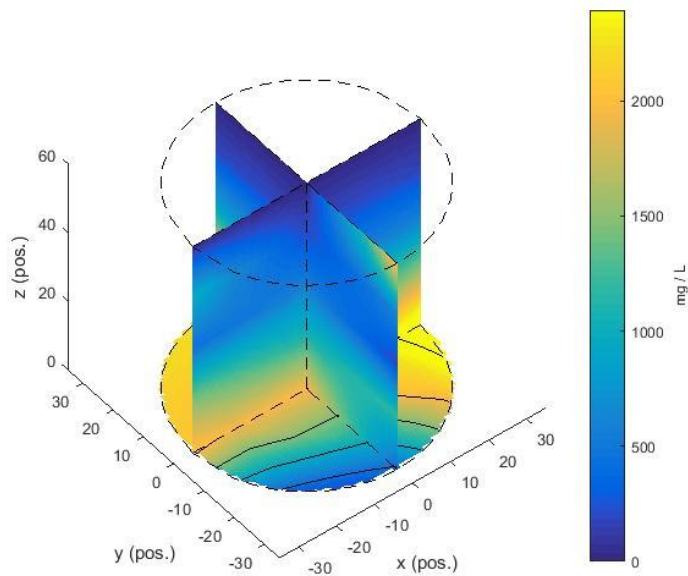


concentração remanescente do pulso de injeção após a medição em instante 0. Também se percebe essa imagem, em termos reminiscentes no corte radial yz, já que os dados dessa situação são obtidos após o tempo de aquisição iniciado no instante 0 minutos. Com estes cortes também se percebe a deposição de massa nas regiões inferiores do reator, com uma clara tendência para o primeiro e segundo quadrantes do fundo circular. Os cortes radiais a  $136^\circ$  nos tempos de 0, 15 e 30 minutos, apresentam o deslocamento de massa em um plano diametral entre xz e yz, podendo-se constatar o transporte de massa no sentido entrada  $\rightarrow$  saída do reator, promovido pelo escoamento de diluição. Percebe-se também, nestes cortes radiais, a gradativa diluição da solução pela avaliação dos níveis de concentrações apresentados nos mapas de cores.

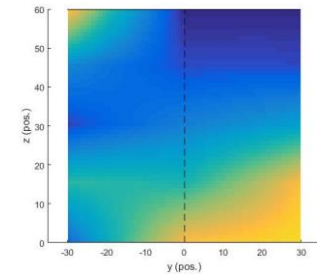
No ensaio Ens 03\_10L\_h, apesar do escoamento apresentar um regime laminar, com número de Reynolds de 12,05, denota-se a relativamente rápida deposição de massa para as regiões inferiores do reator. Com a Figura 28 apresenta-se algumas imagens selecionadas do ensaio.

Figura 28 – Imageamento das concentrações da solução – Ensaio Ens03\_10L\_h

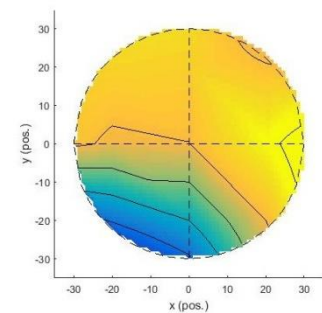
Ordem 1, Tempo 0 min – Corte duplo radial e de fundo



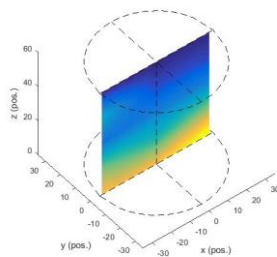
Corte radial vertical – Vista yz



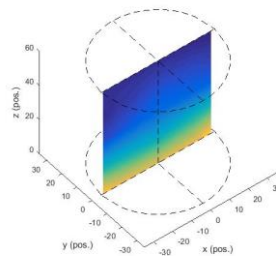
Corte horizontal – Vista xy



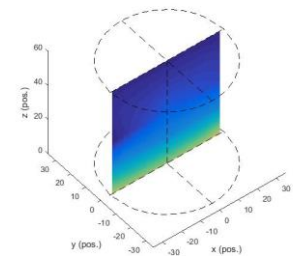
Corte radial 180° Tempo 0 min



Corte radial 180° Tempo 15 min



Corte radial 180° Tempo 30 min



Fonte: O autor – Software Hydro 1.01

O corte duplo radial e de fundo, com posicionamento das concentrações por *colormap*, revela próximo da coordenada (0, -30, 60) de entrada do reator, a concentração remanescente do pulso de injeção após a medição em instante 0. Também se percebe essa imagem, em termos remissivos no corte radial yz, já que os dados dessa situação são obtidos após o tempo de aquisição iniciado no instante 0 minutos. Com estes cortes também se percebe a deposição de massa nas regiões inferiores do reator, com uma clara tendência para o primeiro e segundo quadrantes do fundo circular. Os cortes radiais a 180° nos tempos de 0, 15 e 30 minutos, apresentam o deslocamento de massa no plano diametral xz, podendo-se constatar o transporte de massa no sentido entrada → saída do reator, promovido pelo

escoamento de diluição. Percebe-se também, nestes cortes radiais, a gradativa diluição da solução pela avaliação dos níveis de concentrações apresentados nos mapas de cores.

### 4.3 MÓDULO 2

O Módulo 2 enquadra o conjunto de repetições com vazão nominal de 15 L/h. Com a Tabela 5 mostra-se as características básicas de operação dos ensaios do módulo e alguns resultados preliminares.

Tabela 5 – Características básicas – Módulo 2

<b>Denominação do ensaio</b>	<b>Ens 01_15L_h</b>	<b>Ens 02_15L_h</b>	<b>Ens 03_15L_h</b>
Planilha	Ens01_15L_h.xlsx	Ens 02_15L_h.xlsx	Ens 03_15L_h.xlsx
Vazão de operação (L.min <sup>-1</sup> )	0,254	0,251	0,253
Volume útil do reator(L)	23,5	23,5	23,5
Tempo de operação (min)	165	165	165
Massa injetada em pulso (mg)	23500,00	23500,00	23500,00
Número de tomadas de dados	20	20	20
Volume injetado de água de diluição (L)	41,90	41,45	41,80
Detecção de massa por Coleta de Sinais (%)	98,77	99,27	99,40
Detecção de massa por medição SDT proveta (%)	99,87	99,72	99,65
Detecção de massa por medição SDT saída (%)	94,25	94,42	98,69
Velocidade média do escoamento na seção transversal (m/s)	5,987E-05	5,9238E-05	5,973E-05
Número de Reynolds	17,95	17,76	17,91
Tempo de detenção teórico (min)	92,51	93,62	92,88

Fonte: O autor

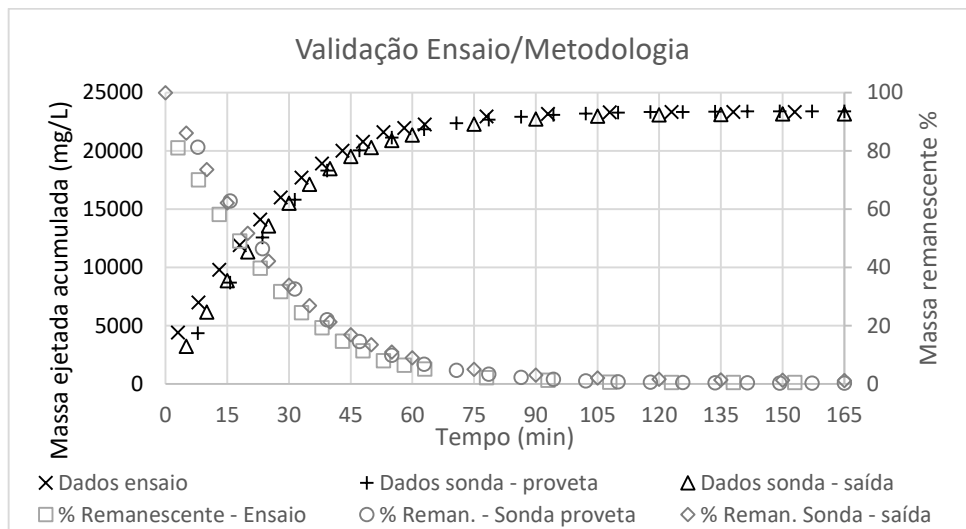
#### 4.3.1 Validação dos ensaios e a metodologia empregada

As Figuras 29, 30 e 31 contém os dados que demonstram a detecção de massa verificada na operação pelos três processos de medição.

O Gráfico da Figura 29 apresenta a detecção de massa pelos três processos de medição com dupla saída em função do tempo. Neste ensaio – Ens 01\_15L\_h – as massas ejetadas (recuperadas) do sistema apresentaram valores finais, aos 165 minutos de operação, de 22.149,16 mg, 23.470,11 mg e 23.210,34 mg, respectivamente aos métodos de medição por Sonda SDT na saída do reator, Sonda



Figura 31 – Validação Ensaio/Metodologia – Ensaio Ens 03\_15L\_h



A Figura 30 apresenta os resultados do Ensaio Ens 02\_15L\_h onde a detecção, aos 165 minutos de operação, foi de 22.188,83 mg, 23.435,10 mg e 23.328,32 mg, respectivamente aos métodos de medição por Sonda SDT na saída do reator, Sonda SDT na proveta de coleta de saída do reator e por Coleta de Sinais. A detecção de massa ocorreu em níveis de 94,42%, 99,72% e 99,27%, também respectivamente aos três métodos já indicados, com injeção de pulso de 23.500,00 mg de NaCl.

A Figura 31 apresenta os resultados do Ensaio Ens 03\_15L\_h onde a detecção, aos 165 minutos de operação, foi de 23.192,41 mg, 23.418,13 mg e 23.359,04 mg, respectivamente aos métodos de medição por Sonda SDT na saída do reator, Sonda SDT na proveta de coleta de saída do reator e por Coleta de Sinais. A detecção de massa ocorreu em níveis de 98,69%, 99,65% e 99,40%, também respectivamente aos três métodos já indicados, com injeção de pulso de 23.500,00 mg de NaCl.

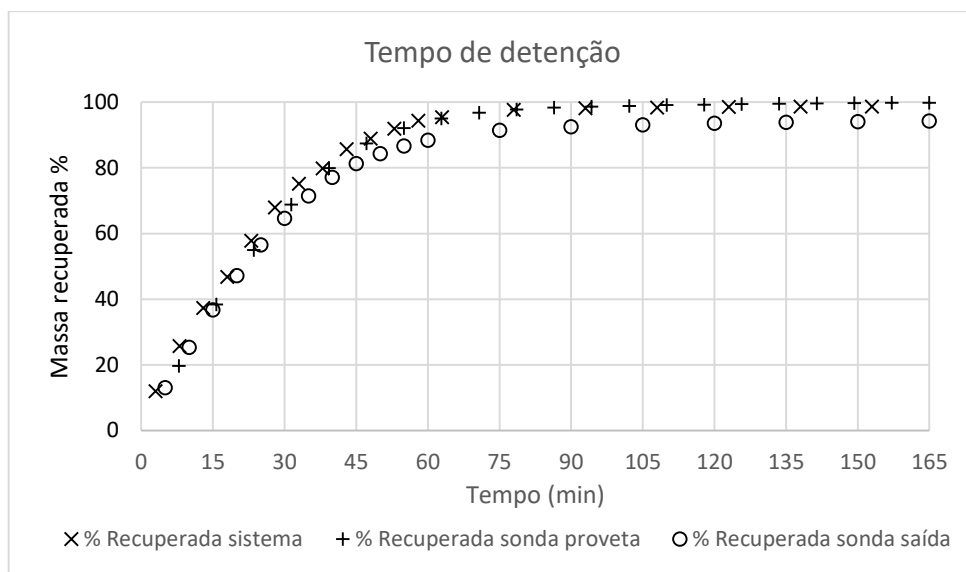
Considerando a coerência dos resultados obtidos e a convergência no cálculo da massa recuperada, comparando-se com a massa injetada, pode-se admitir a validação em nível satisfatório dos ensaios realizados e dos métodos adotados.

#### 4.3.2 Tempo de Detenção da massa injetada (TD)

Para os ensaios do Módulo 2 os valores de  $t_H$  – tempo médio de permanência teórico – foram de 92,51 min, 93,62 min e 92,88 min respectivamente ao 1º, 2º e 3º ensaio.

Por meio do registro de dados representados graficamente nas Figuras 32, 33 e 34 pode-se perceber a evolução da detecção de massa recuperada pelos 3 métodos de medição nos ensaios do Módulo 2. Para o ensaio Ens 01\_15L\_h – Figura 4.11a – o tempo total de operação foi de 165 minutos, assim como para o ensaio Ens 02\_15L\_h – Figura 4.11b e para o ensaio Ens 03\_15L\_h – Figura 4.11c, quando os percentuais de massa recuperada (ejetada) atingiram níveis próximos de 99% da massa injetada em pulso.

Figura 32 – Tempo de detenção e percentual de massa recuperada – Ensaio Ens 01\_15L\_h



Fonte: O autor

Figura 33 – Tempo de detenção e percentual de massa recuperada – Ensaio Ens 02\_15L\_h

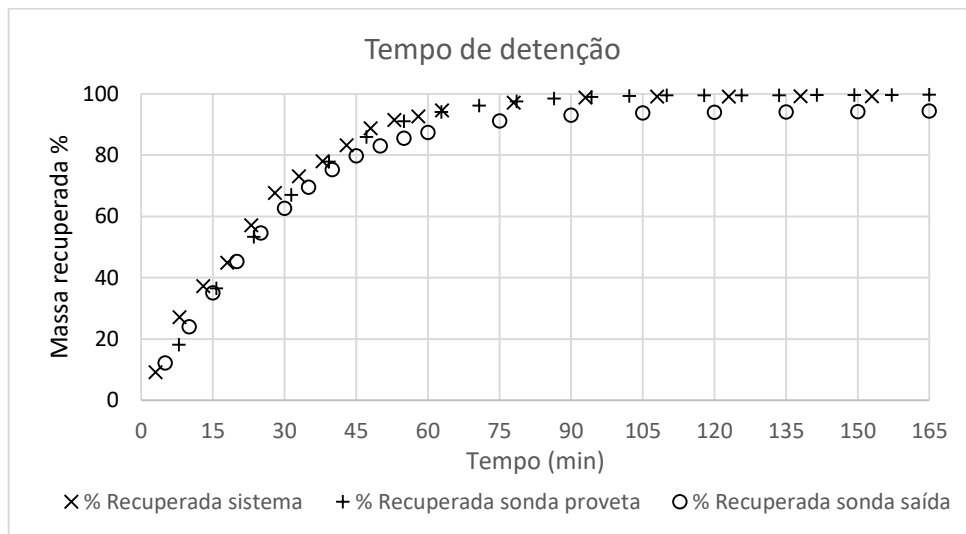
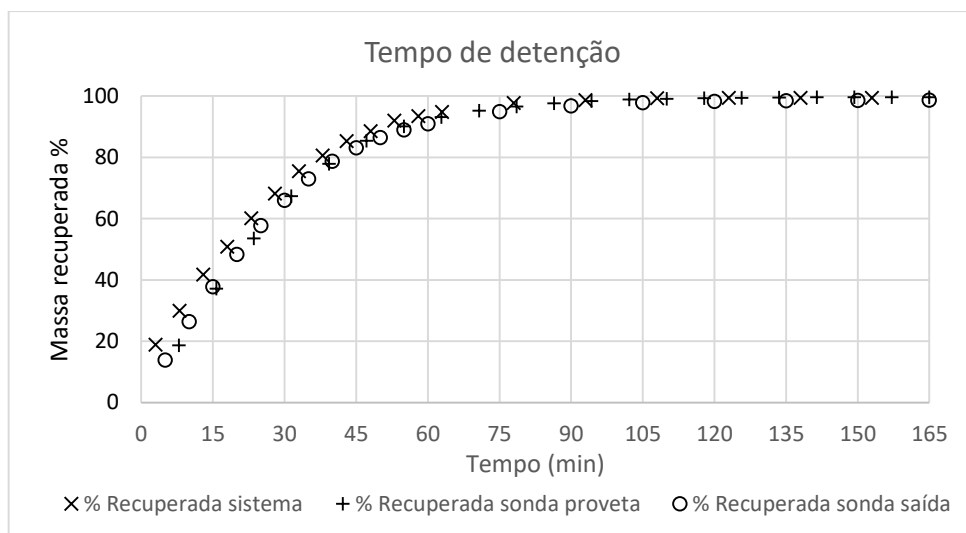


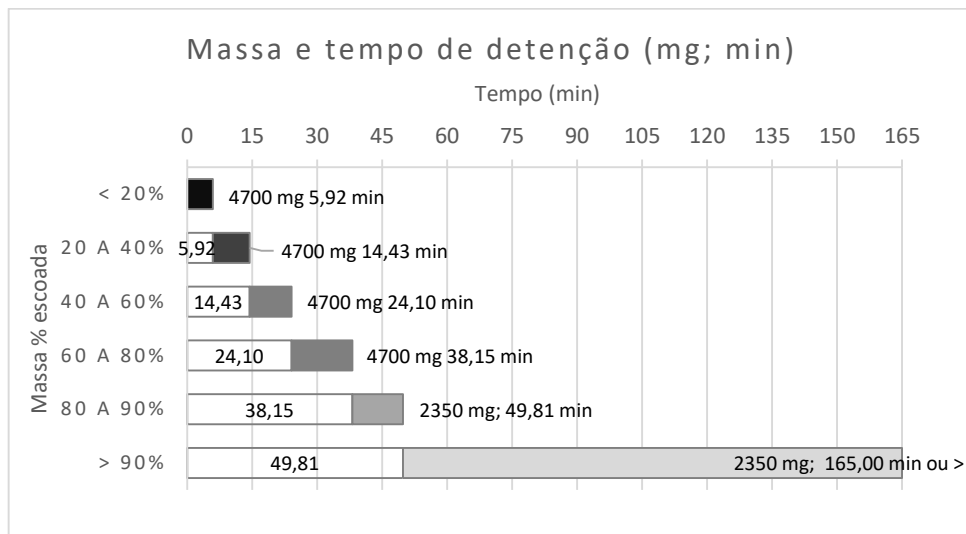
Figura 34 – Tempo de detenção e percentual de massa recuperada – Ensaio Ens03\_15L\_h



Percebe-se a convergência apresentada pelos três métodos de medição e a alta atividade inicial da curva decorre da maior descarga de massa, enquanto nos períodos subsequentes a atividade reduz tendendo à horizontalidade e a uma descarga nula.

Para uma percepção da variabilidade de permanência da massa no sistema, com os gráficos das Figuras 35, 36 e 37 apresenta-se os histogramas de permanência por parcelas de massas ejetadas para cada um dos ensaios do Módulo 2.

Figura 35 – Parcelas de massas ejetadas no decorrer do tempo – Ens 01\_15L\_h

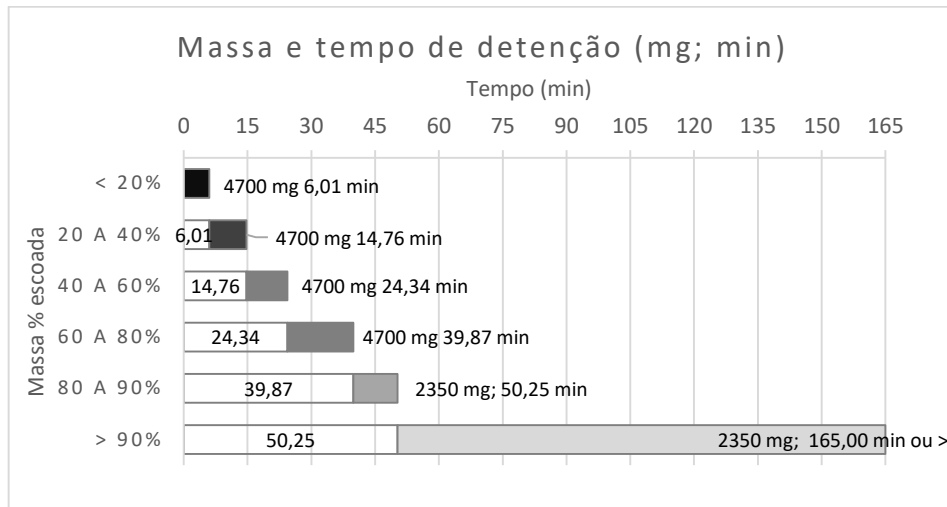


Fonte: O autor

Considerando o total de massa injetada – 23.500,00 mg – verifica-se pelos dados extraídos do ensaio Ens 01\_15L\_h, segundo o método de coleta de sinais elétricos, que até 20% da massa – 4.700,00 mg – deixaram o sistema nos primeiros 5,92 minutos de operação. Outros 20% da massa foram ejetados do sistema de 5,92 minutos até 14,43 minutos. Mais 20% da massa levou de 14,43 até 24,10 minutos para deixar o sistema. Os próximos 20% da massa foram ejetados entre 24,10 e 38,15 minutos. Os seguintes 10% da massa – 2.350,00 mg – deixaram o sistema entre 38,15 e 49,81 minutos. Por fim os 10% restantes permanecem no sistema por um tempo entre 49,81 minutos e um valor superior dependendo do tempo de operação aplicado. Como neste ensaio a operação foi interrompida aos 165 minutos ainda existe massa remanescente no reator, porém, salienta-se que sempre existirá massa residual, por mais prolongado que seja o tempo de operação.



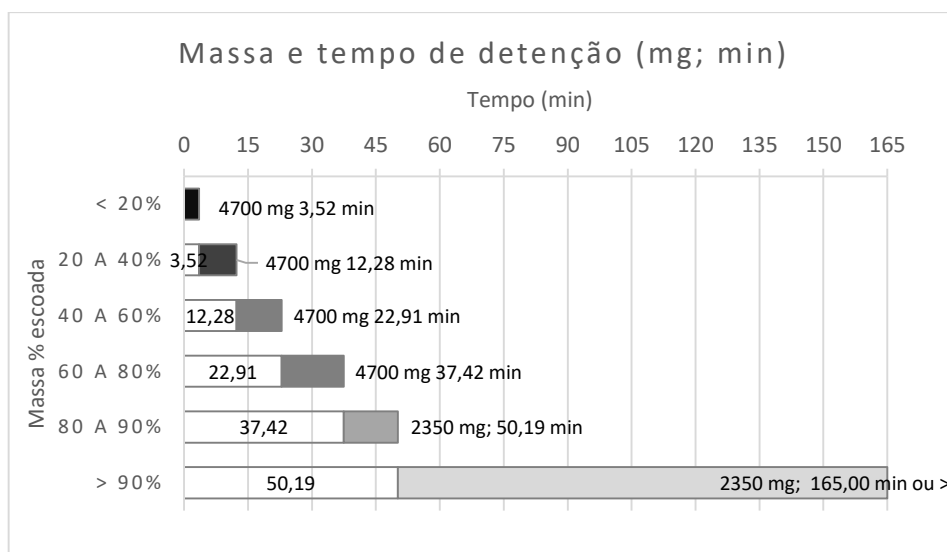
Figura 36 – Parcelas de massas ejetadas no decorrer do tempo – Ens 02\_15L\_h



Fonte: O autor

Considerando o total de massa injetada – 23.500,00 mg – verifica-se pelos dados extraídos do ensaio Ens 02\_15L\_h, segundo o método de coleta de sinais elétricos, que até 20% da massa – 4.700,00 mg – deixaram o sistema nos primeiros 6,01 minutos de operação. Outros 20% da massa foi ejetada do sistema de 6,01 minutos até 14,76 minutos. Mais 20% da massa levou de 14,76 até 24,34 minutos para deixar o sistema. Os próximos 20% da massa foi ejetada entre 24,34 e 39,87 minutos. Os seguintes 10% da massa – 2.350,00 mg – deixaram o sistema entre 39,87 e 50,25 minutos. Por fim os 10% restantes permanecem no sistema por um tempo acima de 50,25 minutos.

Figura 37 – Parcelas de massas ejetadas no decorrer do tempo – Ens 03\_15L\_h



Fonte: O autor

Considerando o total de massa injetada – 23.500,00 mg – verifica-se pelos dados extraídos do ensaio Ens 03\_15L\_h, segundo o método de coleta de sinais elétricos, que até 20% da massa – 4.700,00 mg – deixaram o sistema nos primeiros 3,52 minutos de operação. Outros 20% da massa foi ejetada do sistema de 3,52 minutos até 12,28 minutos. Mais 20% da massa levou de 12,28 até 22,91 minutos para deixar o sistema. Os próximos 20% da massa foi ejetada entre 22,91 e 37,42 minutos. Os seguintes 10% da massa – 2.350,00 mg – deixaram o sistema entre 37,42 e 50,19 minutos. Por fim os 10% restantes permanecem no sistema por um tempo acima de 50,19 minutos.

Verifica-se pelos resultados obtidos a influência da componente advecitiva de transporte de massa decorrente do aumento de vazão e respectiva velocidade de escoamento, ocasionando o menor tempo de detenção se comparado aos ensaios do Módulo 1 (conjunto de repetições com vazão nominal de 10 L/h).

Observação:

Os tempos de detenção verificados experimentalmente nos ensaios do Módulo 2 são expressivamente inferiores aos calculados pela hipótese em processo ideal por  $T_H = V / Q$ .

#### 4.3.3 Modelos para as concentrações

A modelagem matemática com entradas de modelo ideal e de dados experimentais de sinais elétricos da malha de eletrodos, a qual decorre da variabilidade de concentrações verificadas no espaço estudado tem resultados inseridos na Tabela 6.

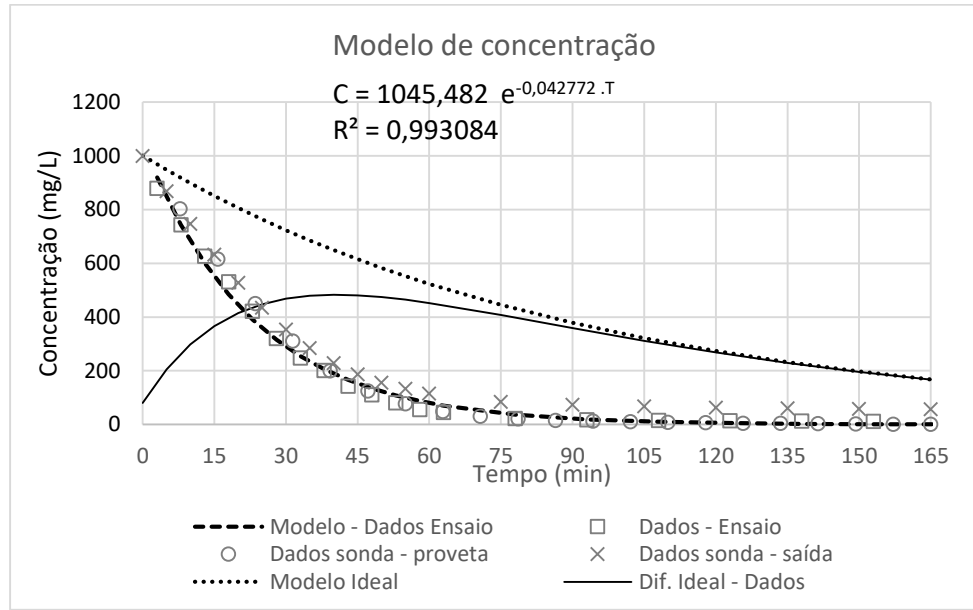
Tabela 6 – Modelos matemáticos para a concentração média

<b>Ensaio</b>	<b>Equação ideal</b>	<b>Equação modelada</b>
Ens 01_15L_h	$C = 1000 e^{-0,0108057t}$	$C = 1045,482 e^{-0,042772 \cdot T}$
Ens 02_15L_h	$C = 1000 e^{-0,0106901t}$	$C = 1050,656 e^{-0,041741 \cdot T}$
Ens 03_15L_h	$C = 1000 e^{-0,0107801t}$	$C = 962,2262 e^{-0,041223 \cdot T}$

Fonte: O autor

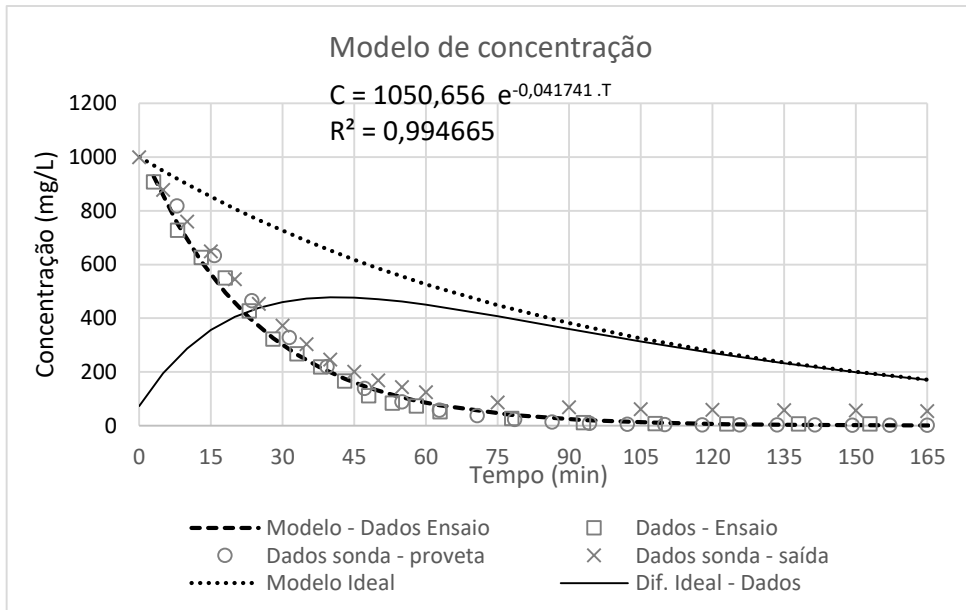
As concentrações médias obtidas nos ensaios pelos três métodos de medição e as curvas dos modelos estão plotadas nas Figura 38, 39 e 40.

Figura 38– Concentrações médias e modelos – Ens 01\_15L\_h



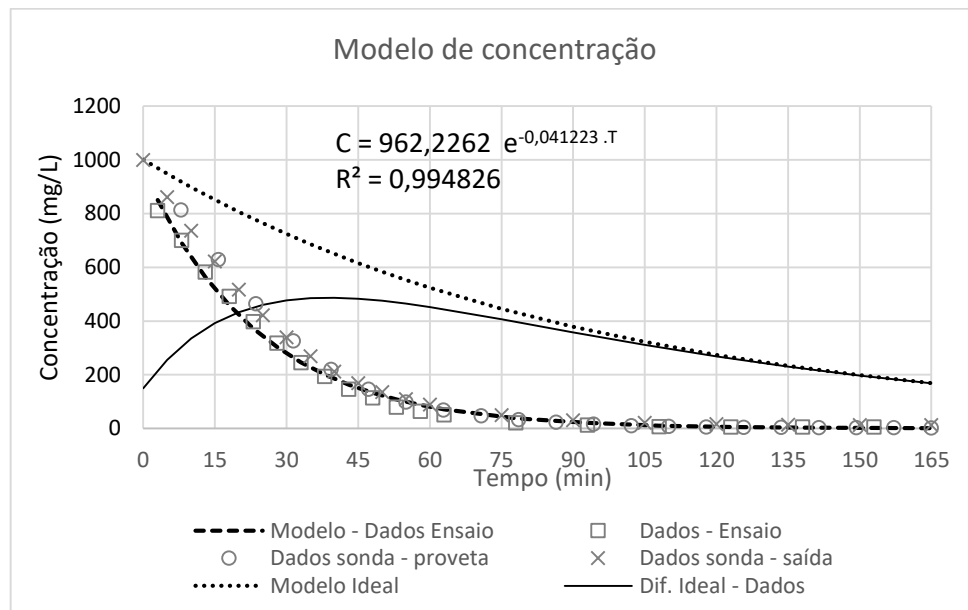
Fonte: O autor

Figura 39 – Concentrações médias e modelos – Ens 02\_15L\_h



Fonte: O autor

Figura 40 – Concentrações médias e modelos – Ens 03\_15L\_h



Fonte: O autor

As concentrações médias obtidas pelos três métodos de medição demonstraram-se coerentes entre si com nível satisfatório de aproximação com um Coeficiente de Determinação  $R^2$  muito próximo a um (1) no mais desfavorável comparativo, entre os valores do método de sinais e os valores do método SDT - saída.

Como esperado, a curva do modelo experimental apresentou um forte caimento inicial quando comparada à curva do modelo ideal, fato inclusive verificado por análise de imageamento discutido a seguir neste trabalho. Este comportamento se verifica em função do adensamento da massa espalhada no reator no sentido entrada  $\rightarrow$  saída, superfície  $\rightarrow$  fundo, pela ausência de mistura artificial no experimento realizado.

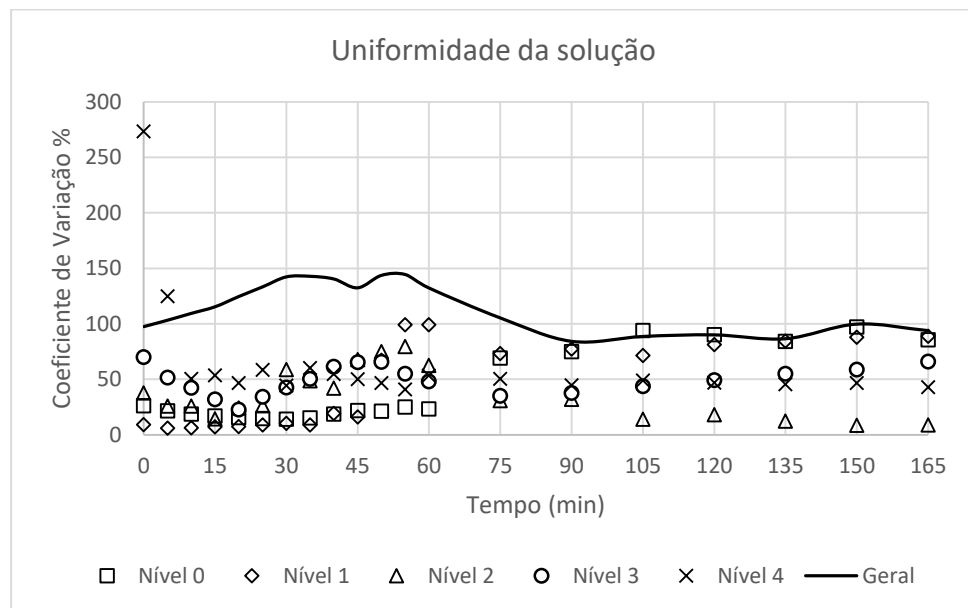
O modelo ideal apresenta um decaimento suave de concentração média pelo fato de considerar uma diluição completa da solução acarretando uma descarga de massa igualmente suavizada.

As Figuras 38, 39 e 40 incluem curvas de diferença entre as concentrações dos modelos. Verifica-se que essa diferença tem pico próximo aos 40 minutos de operação nos ensaios Ens 01\_15L\_h, Ens 02\_15L\_h e Ens 03\_15L\_h.

#### 4.3.4 Análise de uniformidade

Para uma análise quanto à uniformidade da concentração em cada nível do reator e em todo o volume, estão inseridos o cálculo do Coeficiente de Variação das concentrações nestes níveis e neste volume que estão representados, em função do tempo, na Figura 41 para o ensaio Ens 01\_15L\_h.

Figura 41 – Coeficiente de Variação para o ensaio – Ens 01\_15L\_h

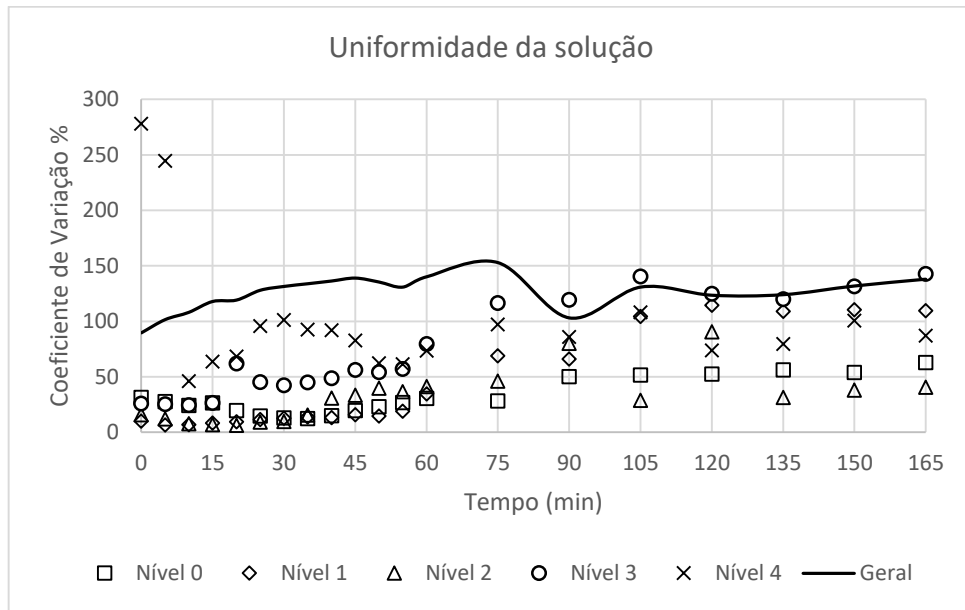


Fonte: O autor

Pode-se verificar pela Figura 41 que os coeficientes de variação tendem a uma distribuição mais homogênea em seus níveis específicos até o instante de 60 minutos, onde, até então, ocorreram os movimentos mais intensos de transporte de massa. Esses coeficientes de variação, calculados para o mesmo nível, proporcionam uma interpretação da variação horizontal da concentração. No Nível 4 – superfície do reator – o Coeficiente de Variação denota, nos minutos iniciais o efeito do lançamento do pulso mássico no sistema. No instante 55 min ocorre o pico de variação interníveis – Coeficiente de Variação Geral – o que traduz uma interpretação da variabilidade vertical da concentração.

Para o ensaio Ens 02\_15L\_h, o resultado é apresentado com a Figura 42.

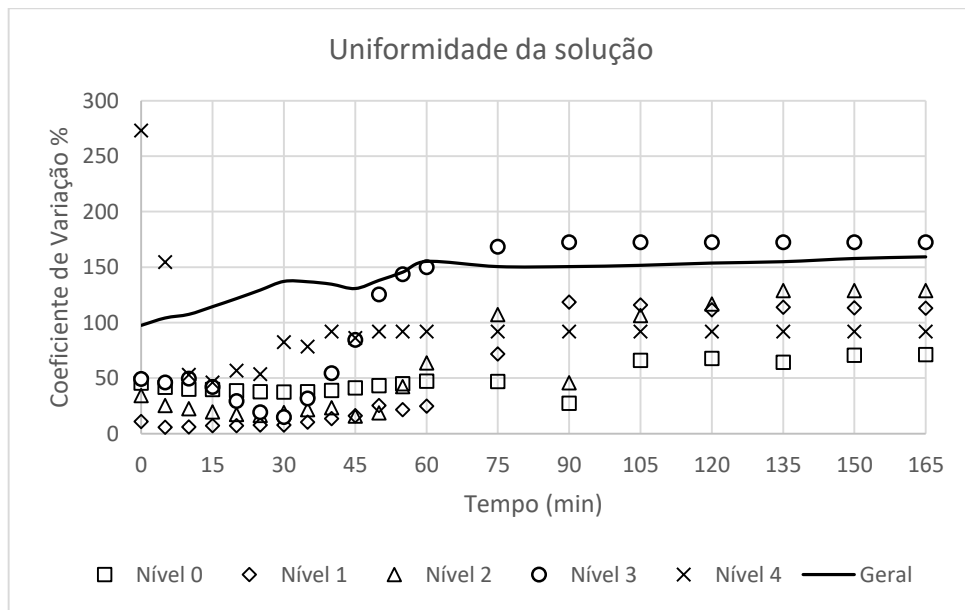
Figura 42 – Coeficiente de Variação para o ensaio - Ens 02\_15L\_h



Para o ensaio Ens 02\_15L\_h, no instante 75 min, denota-se o pico de variação interníveis – Coeficiente de Variação Geral – e relativa estabilidade posterior da distribuição da massa no volume de estudo.

Para o ensaio Ens 03\_15L\_h, o resultado é apresentado com a Figura 43.

Figura 43 – Coeficiente de Variação para o ensaio – Ens 03\_15L\_h



Para o ensaio Ens 03\_15L\_h, no instante – 60 min – denota-se o pico de variação interníveis – Coeficiente de Variação Geral – e relativa estabilidade posterior da distribuição da massa no volume de estudo.

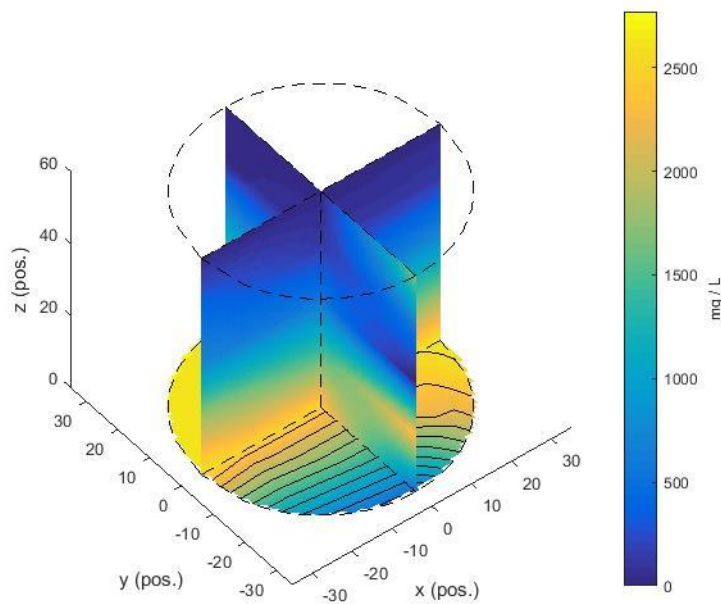
No patamar de vazão para os ensaios do Módulo 2 observa-se que a máxima heterogeneidade da distribuição da massa no volume ocorre em uma hora de operação, instante em que mais de 90% da massa injetada já deixou o sistema e a concentração média atinge valores mínimos medidos no intervalo de operação com baixa descarga de massa na saída.

#### 4.3.5 Análise de imageamento

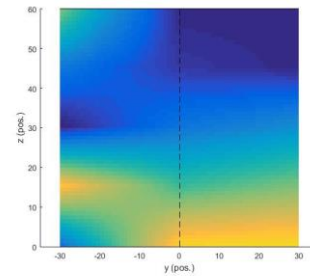
No ensaio Ens 01\_15L\_h, apesar do escoamento apresentar um regime laminar, com número de Reynolds de 17,95, denota-se a relativamente rápida deposição de massa para as regiões inferiores do reator. Com a Figura 44 apresenta-se algumas imagens selecionadas do ensaio.

Figura 44 – Imageamento das concentrações da solução – Ensaio Ens 01\_15L\_h

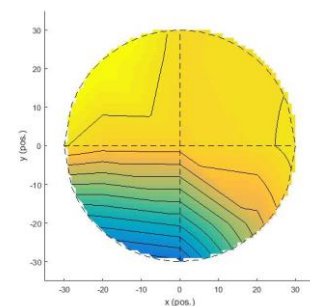
Ordem 1, Tempo 0 min – Corte duplo radial e de fundo



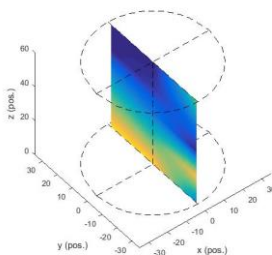
Corte radial vertical – Vista yz



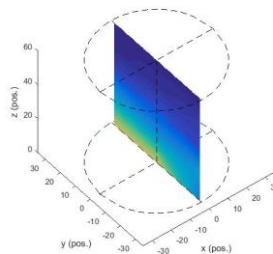
Corte horizontal – Vista xy



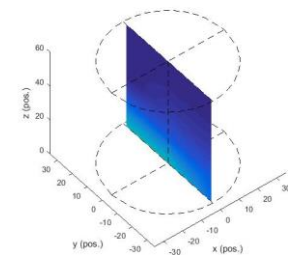
Corte radial 90° Tempo 0 min



Corte radial 90° Tempo 15 min



Corte radial 90° Tempo 30 min



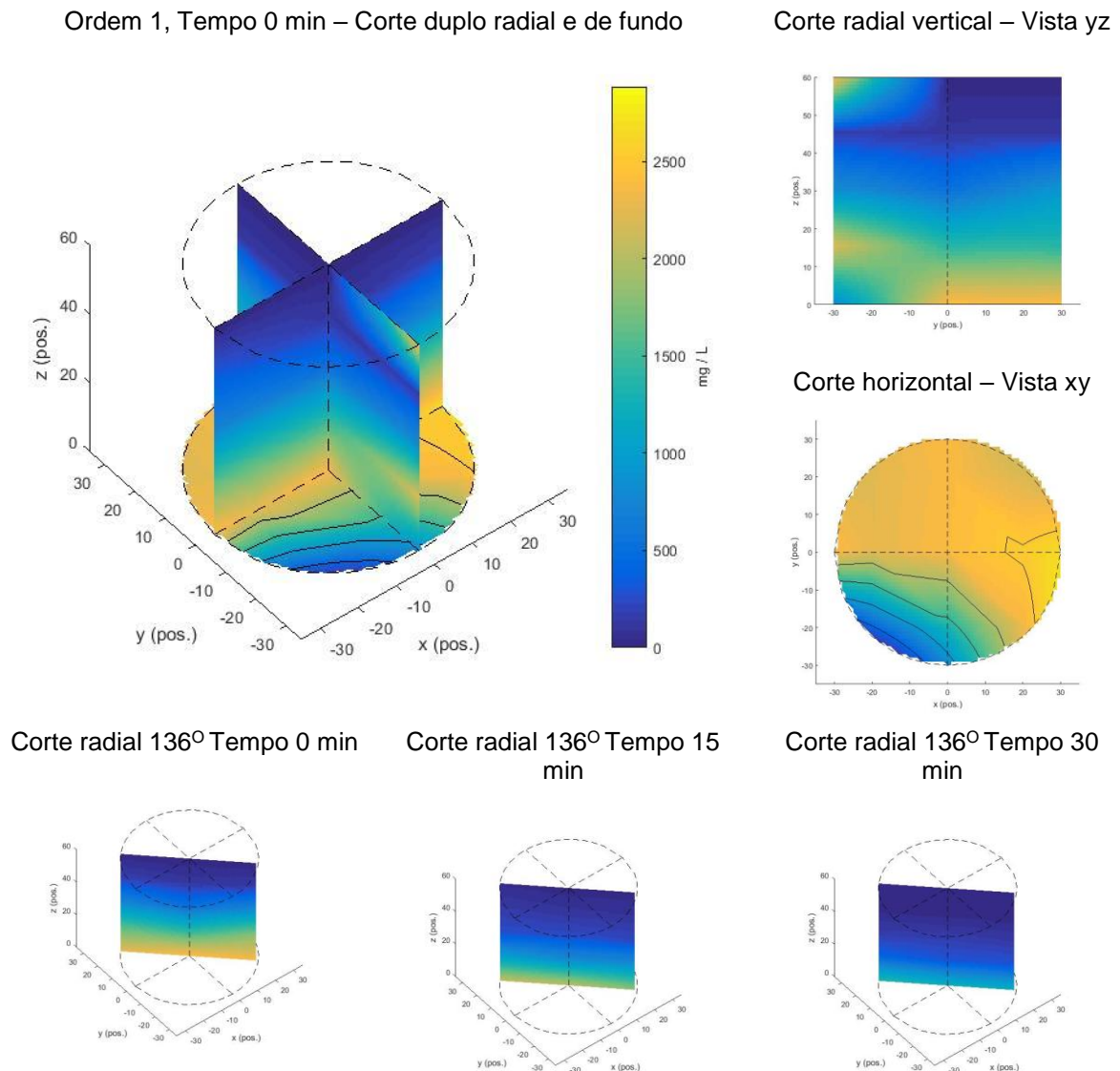
Fonte: O autor – Software Hydro 1.01

O corte duplo radial e de fundo, com posicionamento das concentrações por *colormap*, revela próximo da coordenada (0, -30, 60) de entrada do reator, a concentração remanescente do pulso de injeção após a medição em instante 0. Com estes cortes também se percebe a deposição de massa nas regiões inferiores do reator, com uma clara tendência para o primeiro e segundo quadrantes do fundo circular. Os cortes radiais a 90° nos tempos de 0, 15 e 30 minutos, apresentam o deslocamento de massa no plano diametral yz, podendo-se constatar o transporte de massa no sentido entrada → saída do reator, promovido pelo escoamento de diluição. Nota-se também, nestes cortes radiais, a gradativa diluição da solução pela avaliação dos níveis de concentrações apresentados nos mapas de cores.



No ensaio Ens 02\_15L\_h, apesar do escoamento apresentar um regime laminar, com número de Reynolds de 17,76, denota-se a relativamente rápida deposição de massa para as regiões inferiores do reator. Com a Figura 45 apresenta-se algumas imagens selecionadas do ensaio.

Figura 45 – Imageamento das concentrações da solução – Ensaio Ens 02\_15L\_h



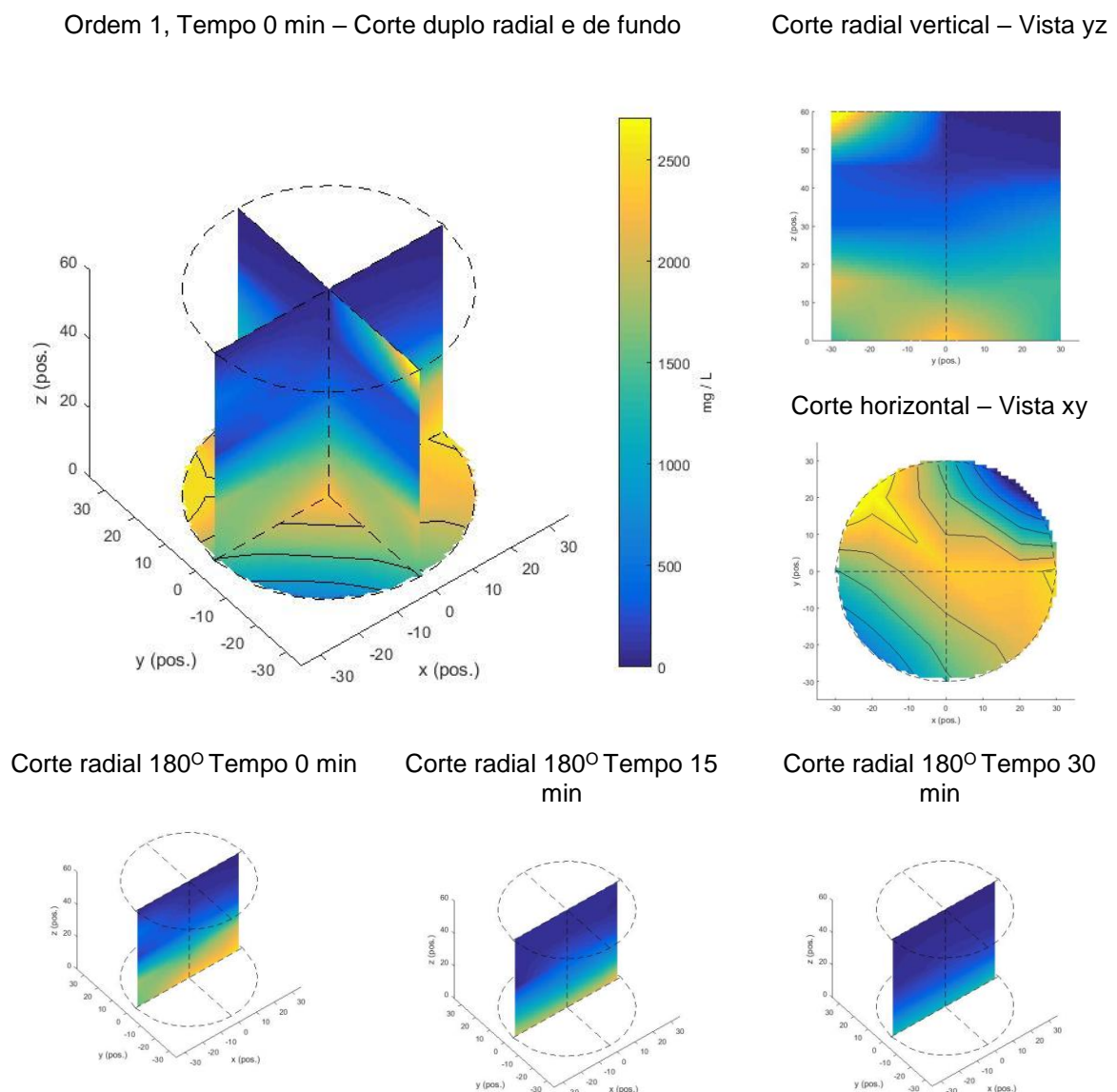
Fonte: O autor – Software Hydro 1.01

O corte duplo radial e de fundo, com posicionamento das concentrações por *colormap*, revela próximo da coordenada (0, -30, 60) de entrada do reator, a concentração remanescente do pulso de injeção após a medição em instante 0. Com os cortes radiais nota-se a deposição de massa nas regiões inferiores do reator, com uma clara tendência para o primeiro e segundo quadrantes do fundo circular. Os

cortes radiais a  $136^\circ$  nos tempos de 0, 15 e 30 minutos, apresentam o deslocamento de massa em um plano diametral entre xz e yz, podendo-se constatar o transporte de massa no sentido entrada  $\rightarrow$  saída do reator, promovido pelo escoamento de diluição.

No ensaio Ens 03\_15L\_h, apesar do escoamento apresentar um regime laminar, com número de Reynolds de 17,91, ocorre rápida deposição de massa para as regiões inferiores do reator. Com a Figura 46 apresenta-se algumas imagens selecionadas do ensaio.

Figura 46 – Imageamento das concentrações da solução – Ensaio Ens 03\_15L\_h



Fonte: O autor – Software Hydro 1.01

O corte duplo radial e de fundo, com posicionamento das concentrações por *colormap*, revela próximo da coordenada (0, -30, 60) de entrada do reator, a

concentração remanescente do pulso de injeção após a medição em instante 0. Também se percebe essa imagem, em termos reminescentes no corte radial yz, já que os dados dessa situação são obtidos após o tempo de aquisição iniciado no instante 0 minutos. Com os cortes radiais se percebe a deposição de massa nas regiões inferiores do reator, com uma clara tendência para o segundo e quarto quadrante do fundo circular. Os cortes radiais a 180° nos tempos de 0, 15 e 30 minutos, apresentam o deslocamento de massa no plano diametral xz, podendo-se constatar o transporte de massa no sentido entrada → saída do reator, promovido pelo escoamento de diluição.

#### 4.4 MÓDULO 3

O Módulo 3 enquadra o conjunto de repetições com vazão nominal de 20 L/h. Com a Tabela 4.6 mostra-se as características básicas de operação dos ensaios do módulo e alguns resultados preliminares.

Tabela 7– Características básicas – Módulo 3

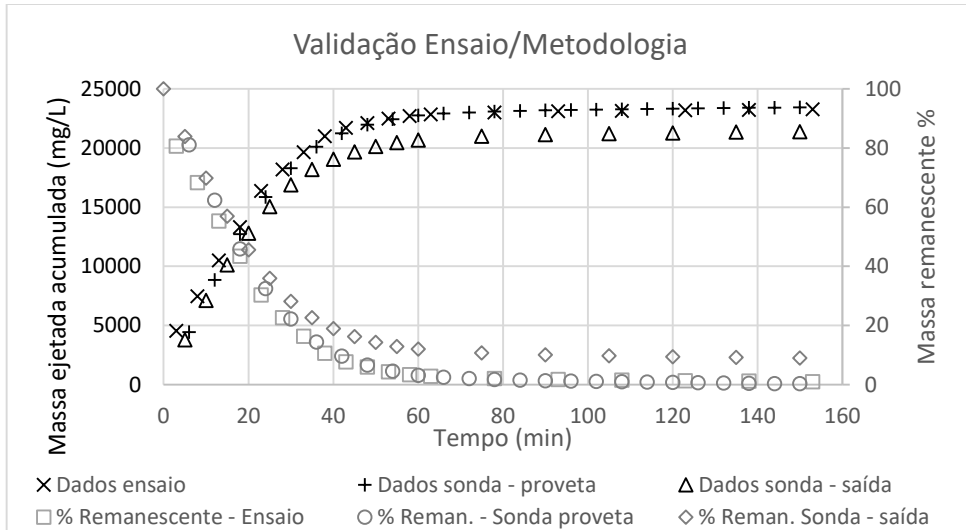
Denominação do ensaio	Ens 01_20L_h	Ens 02_20L_h	Ens 03_20L_h
Planilha	Ens01_20L_h.xlsx	Ens 02_20L_h.xlsx	Ens 03_20L_h.xlsx
Vazão de operação (L.min <sup>-1</sup> )	0,331	0,328	0,327
Volume útil do reator(L)	23,5	23,5	23,5
Tempo de operação (min)	150	120	120
Massa injetada em pulso (mg)	23500,00	23500,00	23500,00
Número de tomadas de dados	19	17	17
Volume injetado de água de diluição (L)	49,60	39,40	39,20
Deteccção de massa por Coleta de Sinais (%)	98,98	99,39	99,36
Deteccção de massa por medição SDT proveta (%)	99,72	99,62	99,68
Deteccção de massa por medição SDT saída (%)	91,02	99,36	93,87
Velocidade média do escoamento na seção transversal (m/s)	7,797E-05	7,7428E-05	7,702E-05
Número de Reynolds	23,38	23,21	23,09
Tempo de detenção teórico (min)	80,00	71,64	71,86

Fonte: O autor

4.4.1 Validação dos ensaios e a metodologia empregada

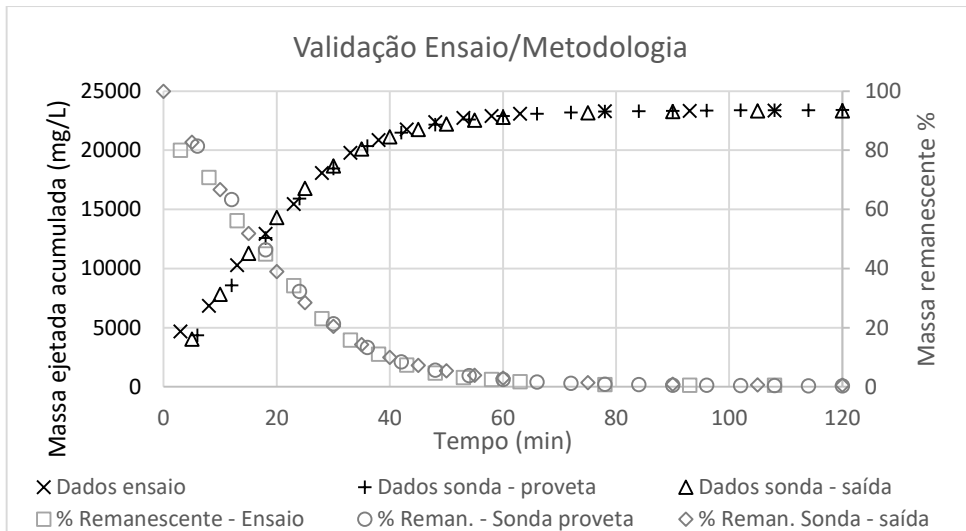
As Figuras 47, 48 e 49 contêm os gráficos que demonstram a detecção de massa verificada na operação pelos três processos de medição.

Figura 47 – Validação Ensaio/Metodologia - Ensaio Ens 01\_20L\_h



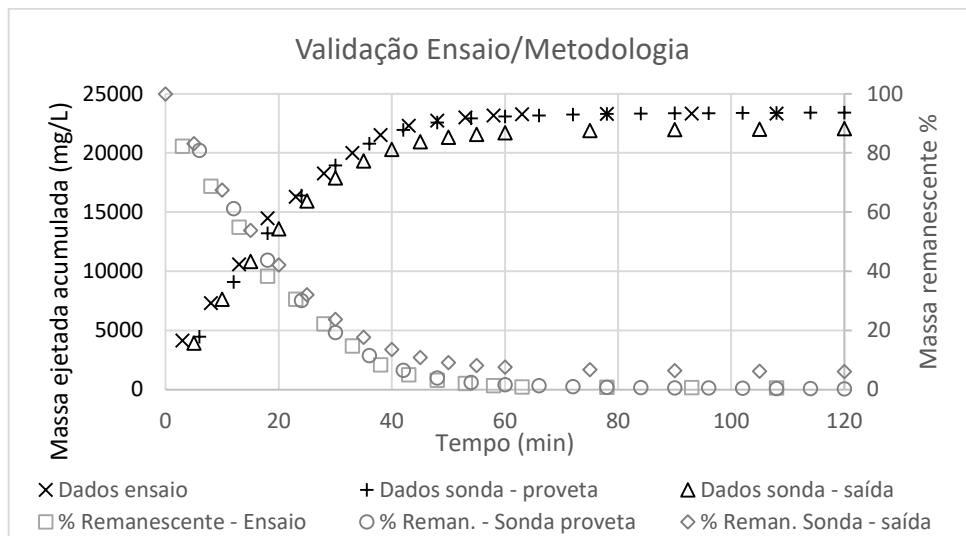
Fonte: O autor

Figura 48 – Validação Ensaio/Metodologia - Ensaio Ens 02\_20L\_h



Fonte: O autor

Figura 49 – Validação Ensaio/Metodologia - Ensaio Ens 03\_20L\_h



Fonte: O autor

A Figura 47 apresenta a detecção de massa pelos três processos de medição com dupla saída em função do tempo. Neste ensaio – Ens 01\_20L\_h – as massas ejetadas (recuperadas) do sistema apresentaram valores finais, aos 150 minutos de operação, de 21.390,17 mg, 23.434,19 mg e 23.261,08 mg, respectivamente aos métodos de medição por Sonda SDT na saída do reator, Sonda SDT na proveta de coleta de saída do reator e por Coleta de Sinais. Percebe-se evidente tendência à detecção dos 23.500,00 mg injetados em pulso com níveis de aproximação de 91,02%, 99,72% e 98,98%, também respectivamente aos três métodos já indicados.

A Figura 48 apresenta os resultados do Ensaio Ens 02\_20L\_h onde a detecção, aos 120 minutos de operação, foi de 23.349,33 mg, 23.410,46 mg e 23.357,82 mg, respectivamente aos métodos de medição por Sonda SDT na saída do reator, Sonda SDT na proveta de coleta de saída do reator e por Coleta de Sinais. A detecção de massa ocorreu em níveis de 99,36%, 99,62% e 99,39%, também respectivamente aos três métodos já indicados, com injeção de pulso de 23.500,00 mg de NaCl.

A Figura 49 apresenta os resultados do Ensaio Ens 03\_20L\_h onde a detecção, aos 120 minutos de operação, foi de 22.058,57 mg, 23.425,83 mg e 23.350,71 mg, respectivamente aos métodos de medição por Sonda SDT na saída do reator, Sonda SDT na proveta de coleta de saída do reator e por Coleta de Sinais. A detecção de massa ocorreu em níveis de 93,87%, 99,68% e 99,36%, também respectivamente aos três métodos já indicados, com injeção de pulso de 23.500,00 mg de NaCl.

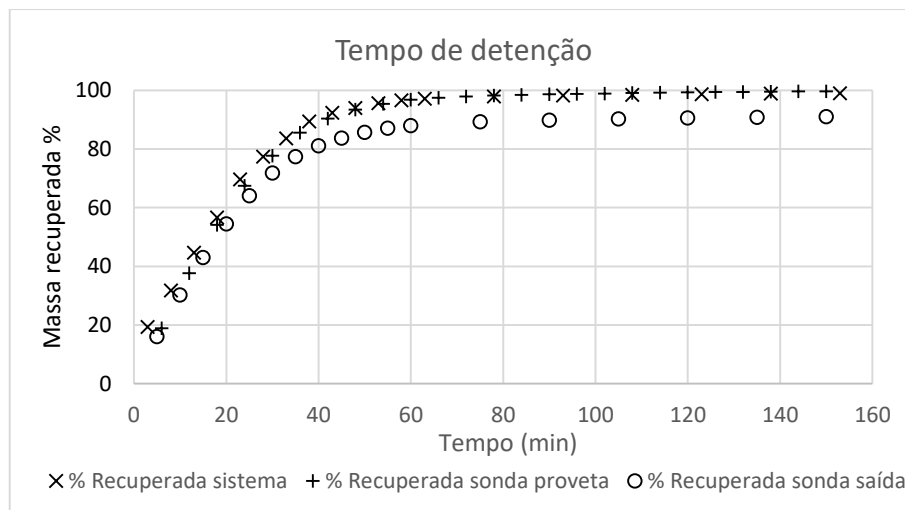
Considerando a coerência dos resultados obtidos e a convergência no cálculo da massa recuperada, comparando-se com a massa injetada, pode-se admitir a validação em nível satisfatório dos ensaios realizados e dos métodos adotados.

#### 4.4.2 Tempo de Detenção da massa injetada

Para os ensaios do Módulo 3 os valores de  $t_H$  – tempo médio de permanência teórico – foram de 80,00 min, 71,64 min e 71,86 min respectivamente ao 1º, 2º e 3º ensaio.

Por meio do registro de dados representados graficamente nas Figuras 4.19a, 4.19b e 4.19c pode-se perceber a evolução da detecção de massa recuperada pelos 3 métodos de medição nos ensaios do Módulo 3. Para o ensaio Ens 01\_20L\_h – Figura 50 – o tempo total de operação foi de 150 minutos, enquanto do ensaio Ens 02\_20L\_h – Figura 51 e do ensaio Ens 03\_20L\_h – Figura 52, os tempos foram de 210 minutos, quando os percentuais de massa recuperada (ejetada) atingiram níveis próximos de 99% da massa injetada em pulso.

Figura 50 – Tempo de detenção e percentual de massa recuperada – Ensaio Ens 01\_20L\_h



Fonte: O autor

Figura 51 – Tempo de detenção e percentual de massa recuperada – Ensaio Ens 02\_20L\_h

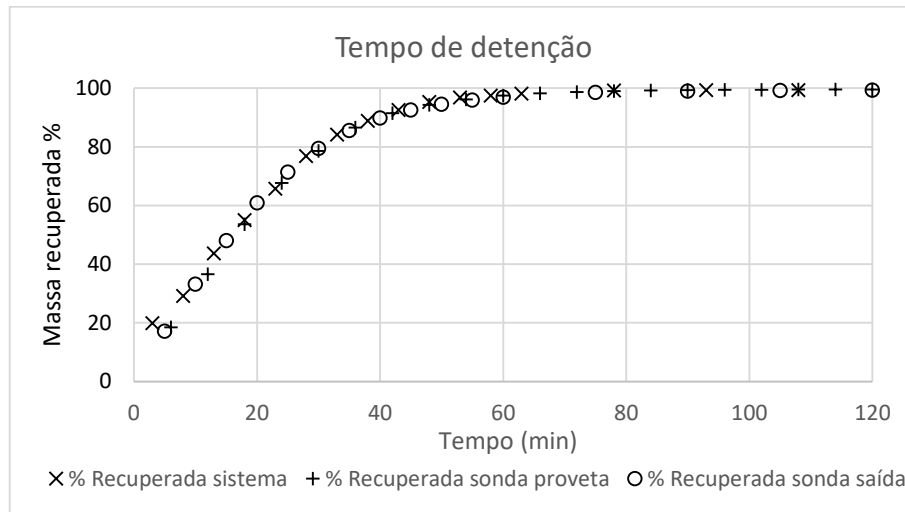
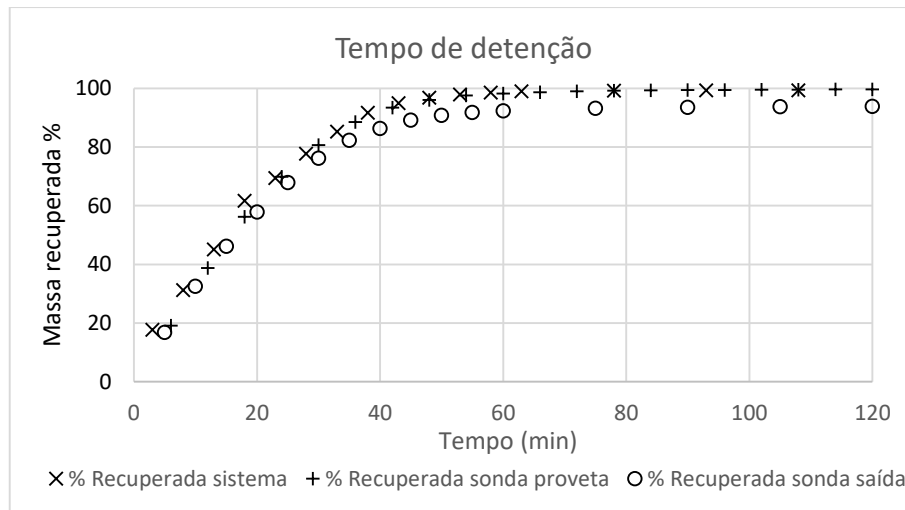


Figura 52 – Tempo de detenção e percentual de massa recuperada – Ensaio Ens 03\_20L\_h

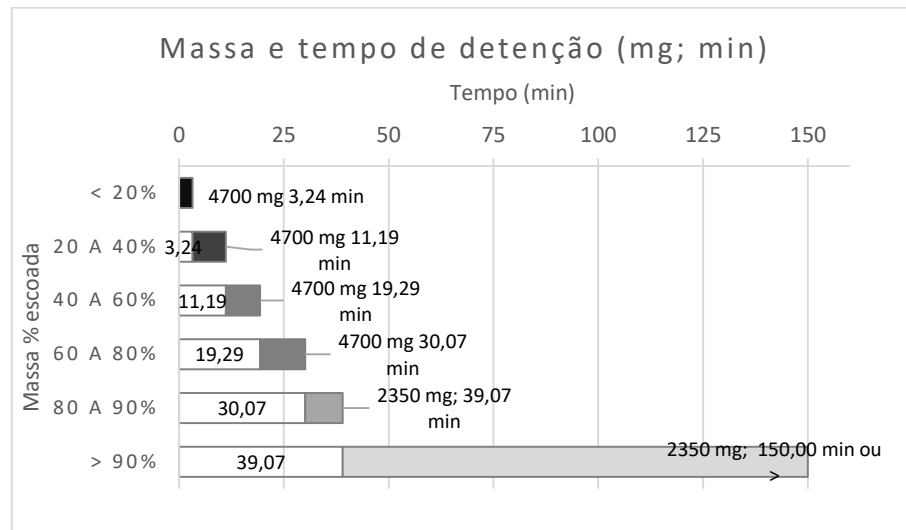


Além da convergência apresentada pelos três métodos de medição que ratifica o emprego da metodologia de aquisição de dados pela malha de eletrodos, é importante constatar a variabilidade da ejeção de massa e o consequente tempo de detenção em função da inclinação, ou a derivada da curva Tempo X Massa ejetada apresentada nos gráficos. A alta atividade inicial da curva decorre da maior descarga de massa, enquanto nos períodos subsequentes a atividade reduz tendendo à horizontalidade e a uma descarga nula.

Para uma percepção da variabilidade de permanência da massa no sistema de uma forma abrangente, nas Figuras 53, 54 e 55 apresenta-se os histogramas de

permanência por parcelas de massas ejetadas para cada um dos ensaios do Módulo 3.

Figura 53 – Parcelas de massas ejetadas no decorrer do tempo – Ens 01\_20L\_h

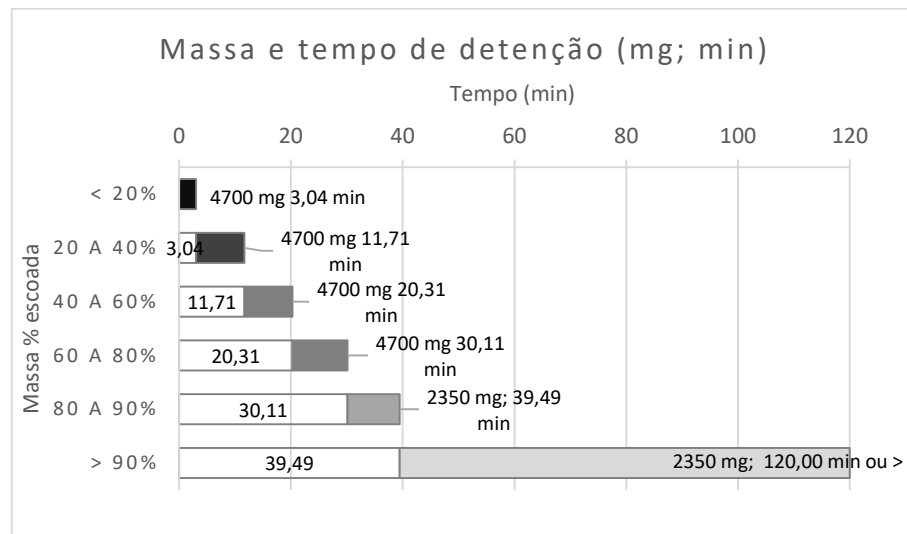


Fonte: O autor

Considerando o total de massa injetada – 23.500,00 mg – verifica-se pelos dados extraídos do ensaio Ens 01\_20L\_h, segundo o método de coleta de sinais elétricos, que até 20% da massa – 4.700,00 mg – deixaram o sistema nos primeiros 3,24 minutos de operação. Outros 20% da massa foram ejetados do sistema de 3,24 minutos até 11,19 minutos. Mais 20% da massa levou de 11,19 até 19,29 minutos para deixar o sistema. Os próximos 20% da massa foram ejetados entre 19,29 e 30,07 minutos. Os seguintes 10% da massa – 2.350,00 mg – deixaram o sistema entre 30,07 e 39,07 minutos. Por fim os 10% restantes permanecem no sistema por um tempo entre 39,07 minutos e um valor superior dependendo do tempo de operação aplicado. Como neste ensaio a operação foi interrompida aos 150 minutos ainda existe massa remanescente no reator, porém, salienta-se que sempre existirá massa residual, por mais prolongado que seja o tempo de operação.



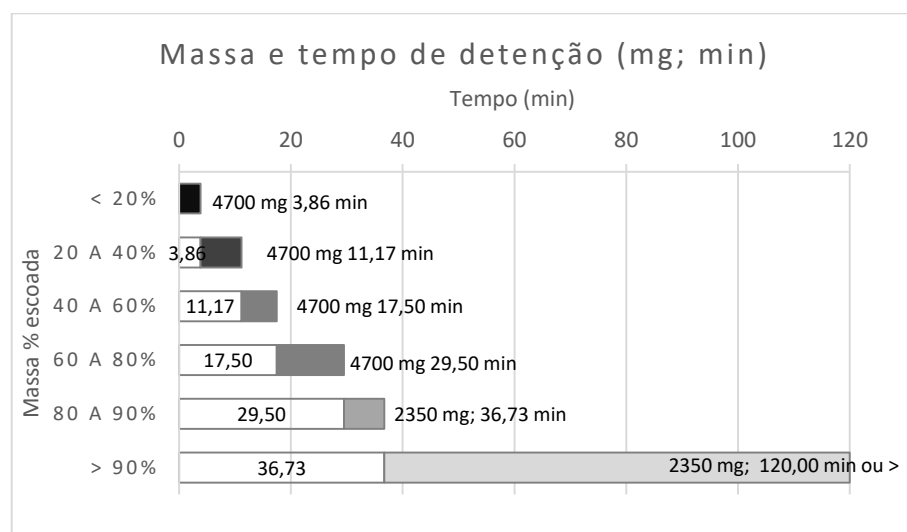
Figura 54 – Parcelas de massas ejetadas no decorrer do tempo – Ens 02\_20L\_h



Fonte: O autor

Considerando o total de massa injetada – 23.500,00 mg – verifica-se pelos dados extraídos do ensaio Ens 02\_20L\_h, segundo o método de coleta de sinais elétricos, que até 20% da massa – 4.700,00 mg – deixaram o sistema nos primeiros 3,04 minutos de operação. Outros 20% da massa foi ejetada do sistema de 3,04 minutos até 11,71 minutos. Mais 20% da massa levou de 11,71 até 20,31 minutos para deixar o sistema. Os próximos 20% da massa foi ejetada entre 20,31 e 30,11 minutos. Os seguintes 10% da massa – 2.350,00 mg – deixaram o sistema entre 30,11 e 39,49 minutos. Por fim os 10% restantes permanecem no sistema por um tempo acima de 39,49 minutos.

Figura 55 – Parcelas de massas ejetadas no decorrer do tempo – Ens 03\_20L\_h



Fonte: O autor

Considerando o total de massa injetada – 23.500,00 mg – verifica-se pelos dados extraídos do ensaio Ens 03\_20L\_h, segundo o método de coleta de sinais elétricos, que até 20% da massa – 4.700,00 mg – deixaram o sistema nos primeiros 3,86 minutos de operação. Outros 20% da massa foi ejetada do sistema de 3,86 minutos até 11,17 minutos. Mais 20% da massa levou de 11,17 até 17,50 minutos para deixar o sistema. Os próximos 20% da massa foi ejetada entre 17,50 e 29,50 minutos. Os seguintes 10% da massa – 2.350,00 mg – deixaram o sistema entre 29,50 e 36,73 minutos. Por fim os 10% restantes permanecem no sistema por um tempo acima de 36,73 minutos.

Verifica-se pelos resultados obtidos a influência da componente advectiva de transporte de massa decorrente do aumento de vazão e respectiva velocidade de escoamento, ocasionando o menor tempo de detenção se comparado aos ensaios do Módulo 1 (conjunto de repetições com vazão nominal de 10 L/h) e Módulo 2 (conjunto de repetições com vazão nominal de 15 L/h).

Observação:

Os tempos de detenção verificados experimentalmente nos ensaios do Módulo 3 são expressivamente inferiores aos calculados pela hipótese em processo ideal por  $T_H = V/Q$ .

#### 4.4.3 Modelos para as concentrações

A modelagem matemática com dados experimentais se realizou com os dados de sinais elétricos da malha de eletrodos, a qual decorre da variabilidade de concentrações verificadas no espaço estudado. Para obtenção dos parâmetros otimizados da modelagem aplicou-se o método das Mínimas Diferenças ao Quadrado – MDQ – e os resultados estão inseridos na Tabela 8.

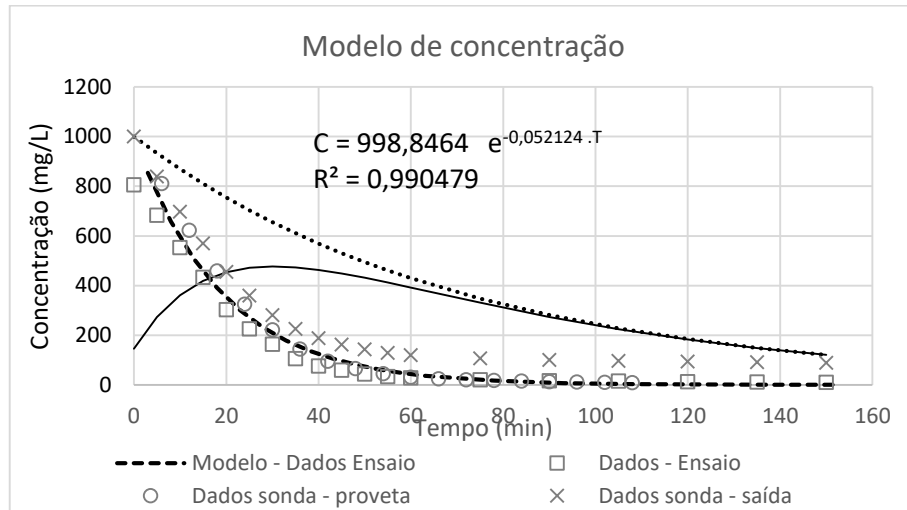
Tabela 8– Modelos matemáticos para a concentração média

Ensaio	Equação ideal	Equação modelada
Ens 01_20L_h	$C = 1000 e^{-0,0140709t}$	$C = 998,8464 e^{-0,052124 \cdot T}$
Ens 02_20L_h	$C = 1000 e^{-0,0139716t}$	$C = 1012,884 e^{-0,051745 \cdot T}$
Ens 03_20L_h.	$C = 1000 e^{-0,0139007t}$	$C = 1036,257 e^{-0,056770 \cdot T}$

Fonte: O autor

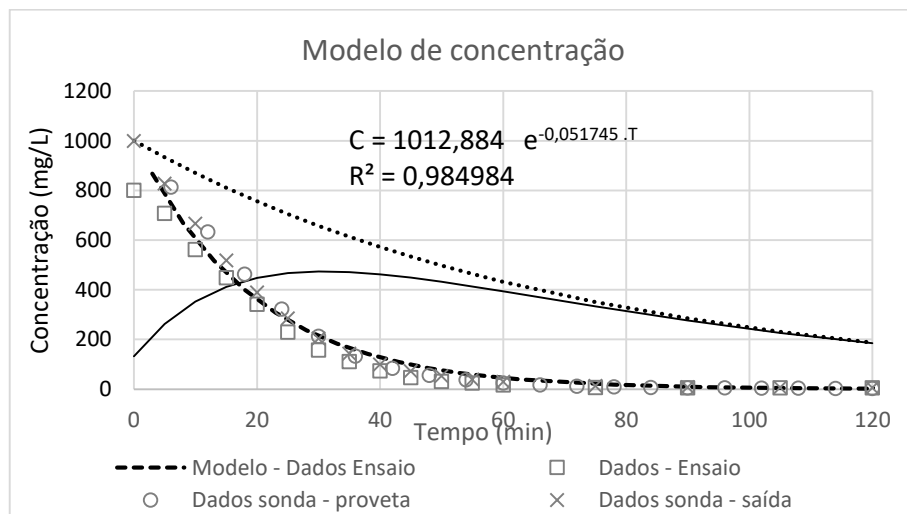
As concentrações médias obtidas nos ensaios pelos três métodos de medição e as curvas dos modelos estão plotadas nas Figuras 56, 57 e 58.

Figura 56 – Concentrações médias e modelos – Ens 01\_20L\_h



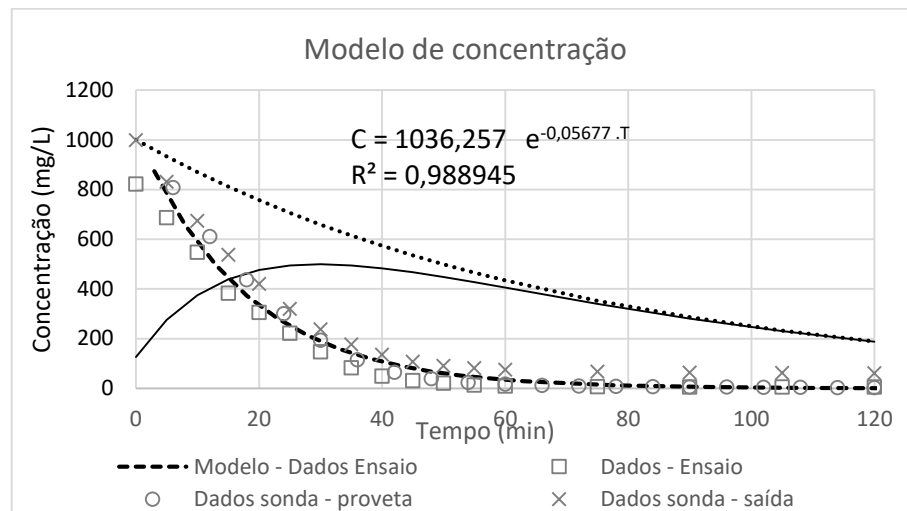
Fonte: O autor

Figura 57 – Concentrações médias e modelos – Ens 02\_20L\_h



Fonte: O autor

Figura 58 – Concentrações médias e modelos – Ens 03\_20L\_h



Fonte: O autor

As concentrações médias obtidas pelos três métodos de medição demonstraram-se coerentes entre si com nível satisfatório de aproximação com um Coeficiente de Determinação  $R^2$  muito próximo a um (1) no mais desfavorável comparativo, entre os valores do método de sinais e os valores do método SDT - saída.

Como esperado, a curva do modelo experimental apresentou um forte decaimento inicial quando comparada à curva do modelo ideal, fato inclusive verificado por análise de imageamento discutido a seguir neste trabalho. Este comportamento se verifica em função do adensamento da massa espalhada no reator no sentido entrada → saída, superfície → fundo, pela ausência de mistura artificial no experimento realizado.

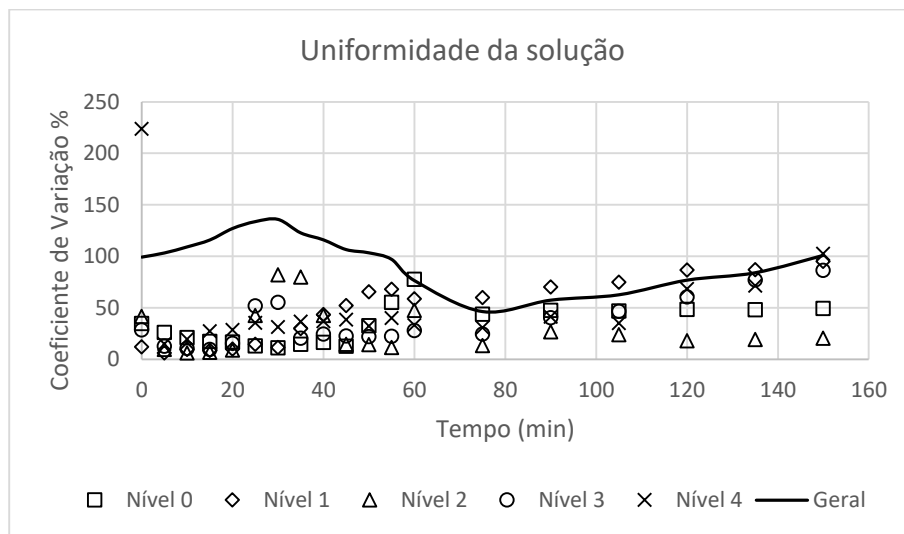
O modelo ideal apresenta um decaimento suave de concentração média pelo fato de considerar uma diluição completa da solução acarretando uma descarga de massa igualmente suavizada.

As Figuras 56, 57 e 58 incluem curvas de diferença entre as concentrações do modelo ideal e modelo experimental ao longo do tempo. Esta curva permite obter noção da disparidade entre os modelos experimentais e os modelos ideais. Verifica-se que essa diferença tem pico próximo aos 30 minutos de operação nos ensaios Ens 01\_20L\_h, ensaio Ens 02\_20L\_h e Ens 03\_20L\_h.

#### 4.4.4 Análise de uniformidade

Para uma análise quanto à uniformidade da concentração em cada nível do reator e em todo o volume, estão inseridos o cálculo do Coeficiente de Variação das concentrações nestes níveis e neste volume que estão representados, em função do tempo, no gráfico da Figura 59 para o ensaio Ens 01\_20L\_h.

Figura 59 – Coeficiente de Variação para o ensaio – Ens 01\_20L\_h

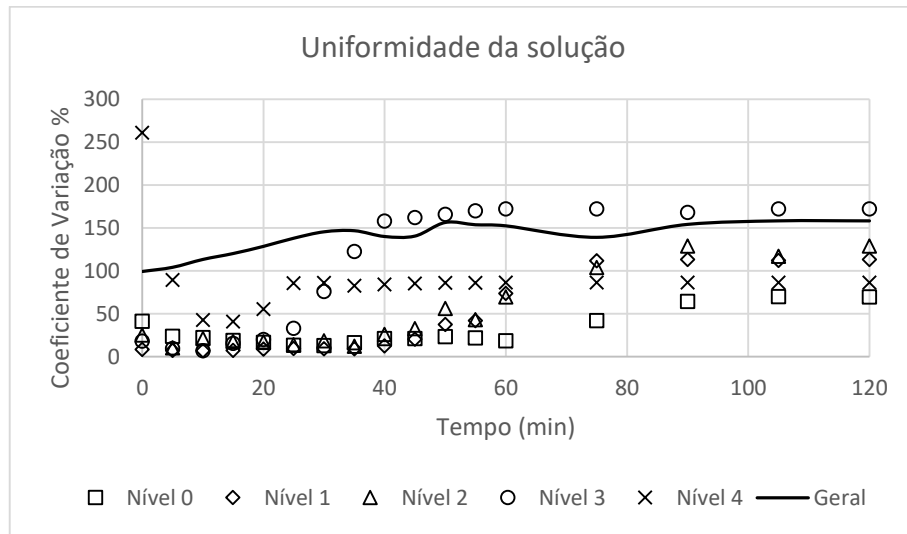


Fonte: O autor

Pode-se verificar pela plotagem do gráfico da Figura 56 que os coeficientes de variação tendem a uma distribuição mais homogênea em seus níveis específicos até o instante de 60 minutos, onde, até então, ocorreram os movimentos mais intensos de transporte de massa. Esses coeficientes de variação, calculados para o mesmo nível, proporciona uma interpretação da variação horizontal da concentração. No Nível 4 – superfície do reator – o Coeficiente de Variação denota, nos minutos iniciais o efeito do lançamento do pulso mássico no sistema. No instante 30 min ocorre o pico de variação interníveis – Coeficiente de Variação Geral – o que traduz uma interpretação da variabilidade vertical da concentração. A variabilidade decresce até os 60 min e torna a crescer com o incremento da diluição.

Na Figura 60 apresenta-se os resultados para o ensaio Ens 02\_20L\_h.

Figura 60 – Coeficiente de Variação para o ensaio – Ens 02\_20L\_h

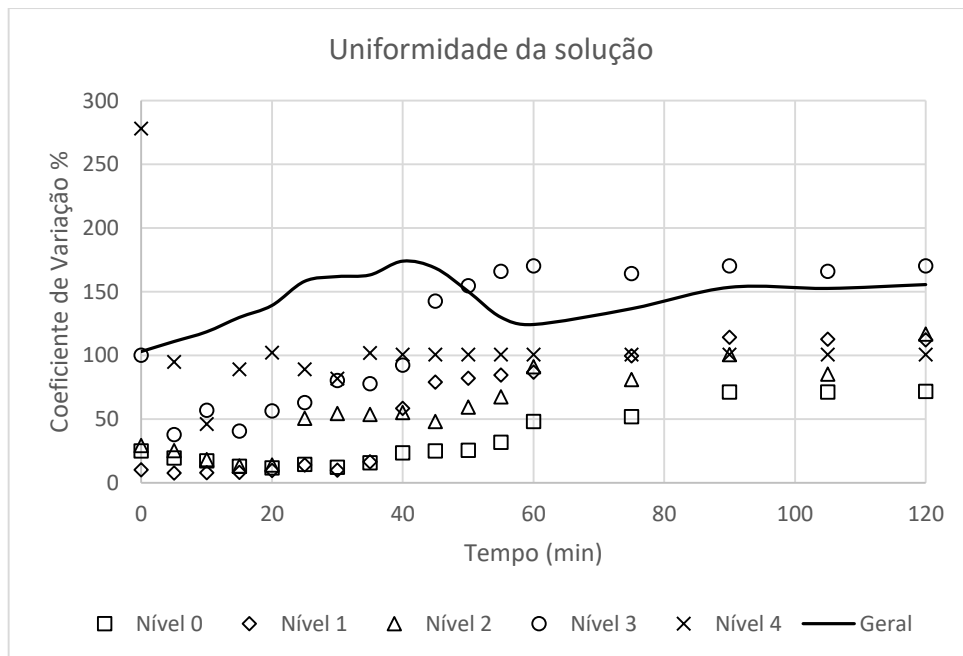


Fonte: O autor

Para o ensaio Ens 02\_20L\_h, no instante – 50 min – ocorre o pico de variação interníveis – Coeficiente de Variação Geral – e relativa estabilidade posterior da distribuição da massa no volume de estudo.

Na Figura 61 apresenta-se os resultados para o ensaio Ens 03\_20L\_h.

Figura 61 – Coeficiente de Variação para o ensaio – Ens 03\_20L\_h



Fonte: O autor

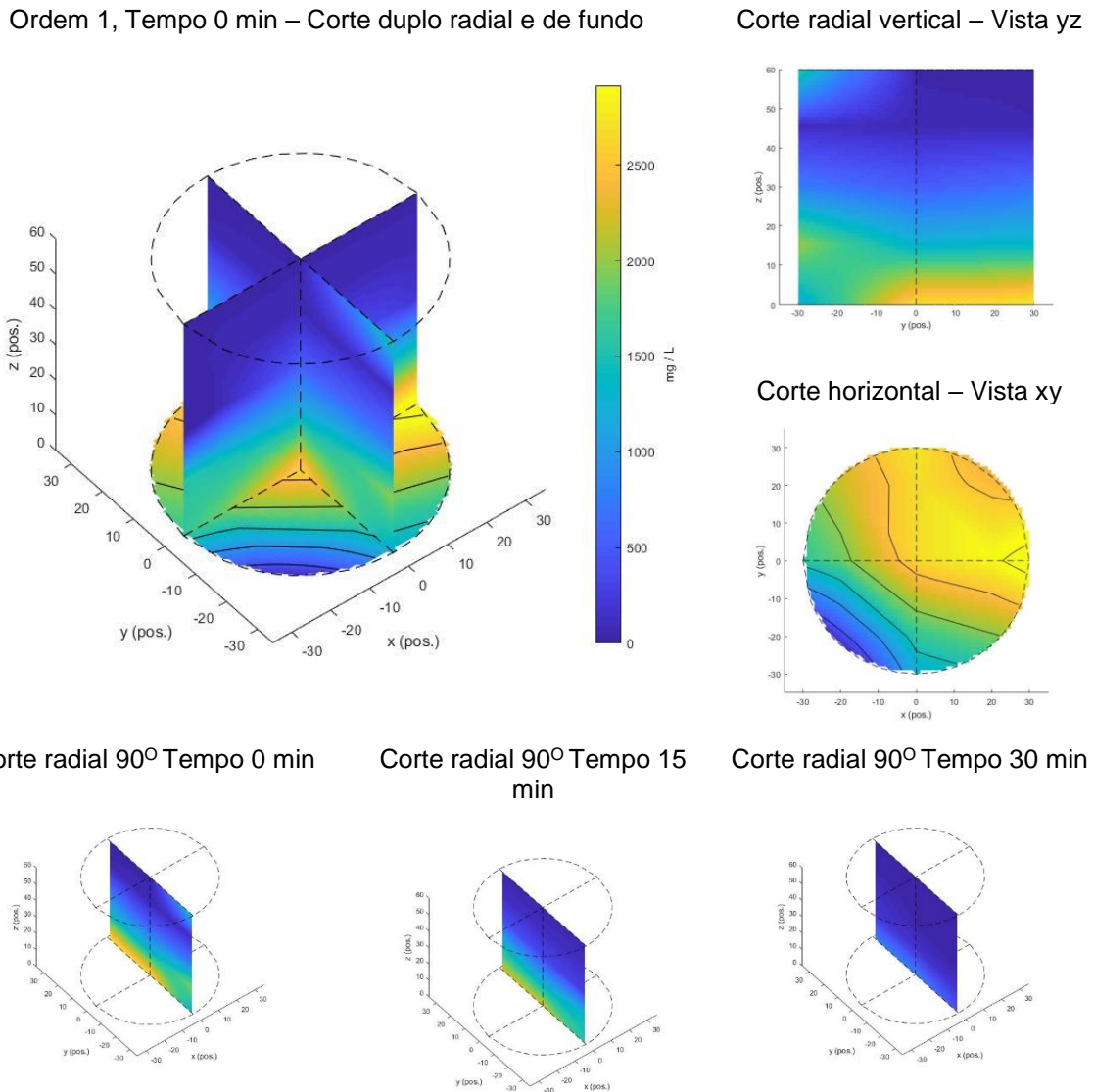
Para o ensaio Ens 03\_20L\_h, no instante – 40 min – denota-se o pico de variação interníveis – Coeficiente de Variação Geral – e gradual retorno posterior à estabilidade da distribuição da massa no volume de estudo.

No patamar de vazão para os ensaios do Módulo 3 observa-se que a máxima heterogeneidade da distribuição da massa no volume ocorre entre 30 min e 40min de operação, instante em que mais de 90% da massa injetada já deixou o sistema e a concentração média atinge valores mínimos medidos no intervalo de operação com baixa descarga de massa na saída.

#### 4.4.5 Análise de imageamento

No ensaio Ens 01\_20L\_h, apesar do escoamento apresentar um regime laminar, com número de Reynolds de 23,38, denota-se a relativamente rápida deposição de massa para as regiões inferiores do reator. Com a Figura 62 apresenta-se algumas imagens selecionadas do ensaio.

Figura 62 – Imageamento das concentrações da solução – Ensaio Ens 01\_20L\_h



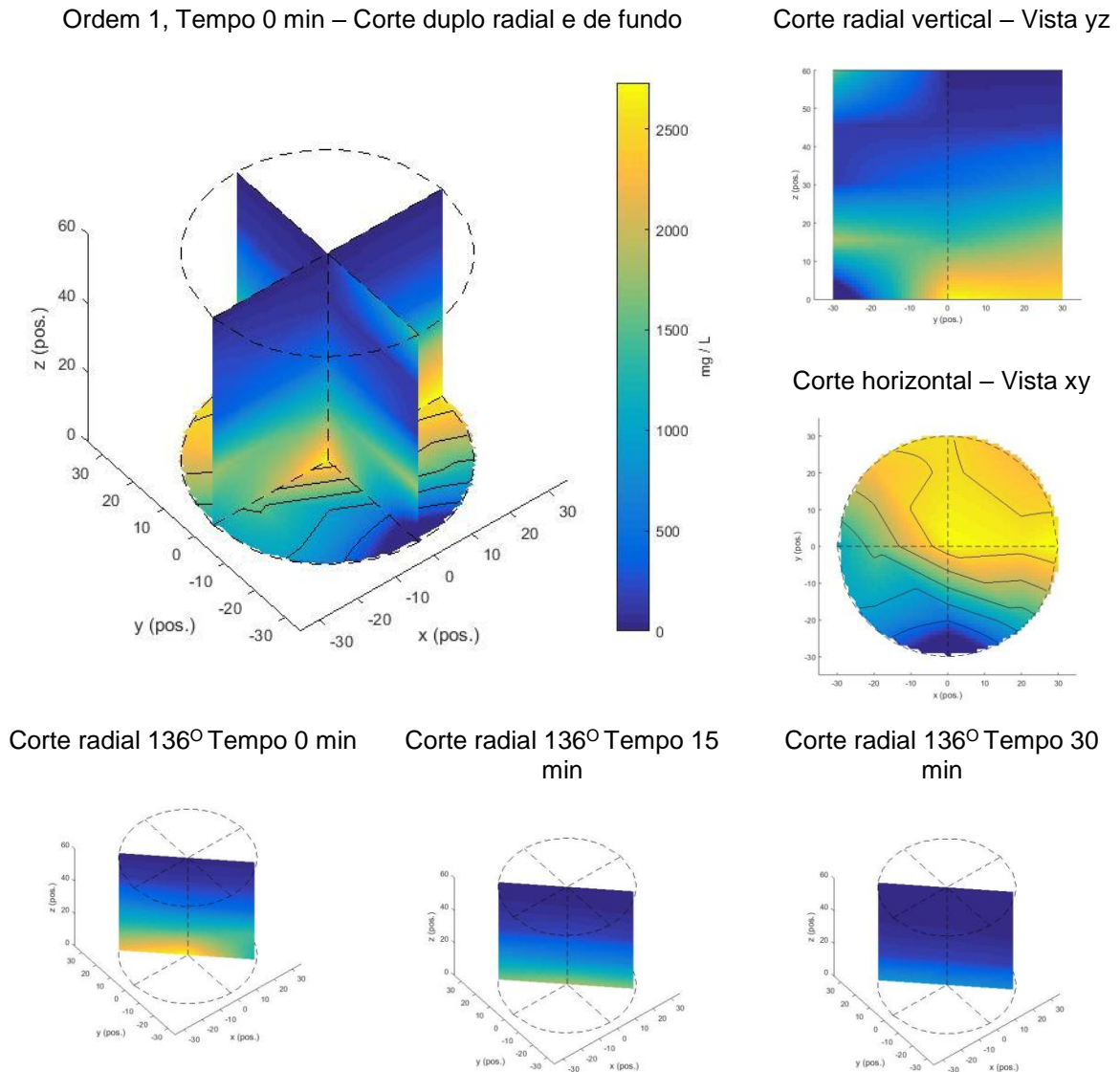
Fonte: O autor – Software Hydro 1.01

O corte duplo radial e de fundo, com posicionamento das concentrações por *colormap*, revela próximo da coordenada (0, -30, 60) de entrada do reator, a concentração remanescente do pulso de injeção após a medição em instante 0. Também se percebe essa imagem, em termos reminescentes no corte radial yz, já que os dados dessa situação são obtidos após o tempo de aquisição iniciado no instante 0 minutos. Com estes cortes também se percebe a deposição de massa nas regiões inferiores do reator, com uma clara tendência para o primeiro quadrante do fundo circular. Os cortes radiais a 90° nos tempos de 0, 15 e 30 minutos, apresentam o deslocamento de massa no plano diametral yz, podendo-se constatar o transporte de massa no sentido entrada → saída do reator, promovido pelo escoamento de diluição.



No ensaio Ens 02\_20L\_h, apesar do escoamento apresentar um regime laminar, com número de Reynolds de 17,76, denota-se a relativamente rápida deposição de massa para as regiões inferiores do reator. Com a Figura 63 apresenta-se algumas imagens seleccionadas do ensaio.

Figura 63 – Imageamento das concentrações da solução – Ensaio Ens 02\_20L\_h



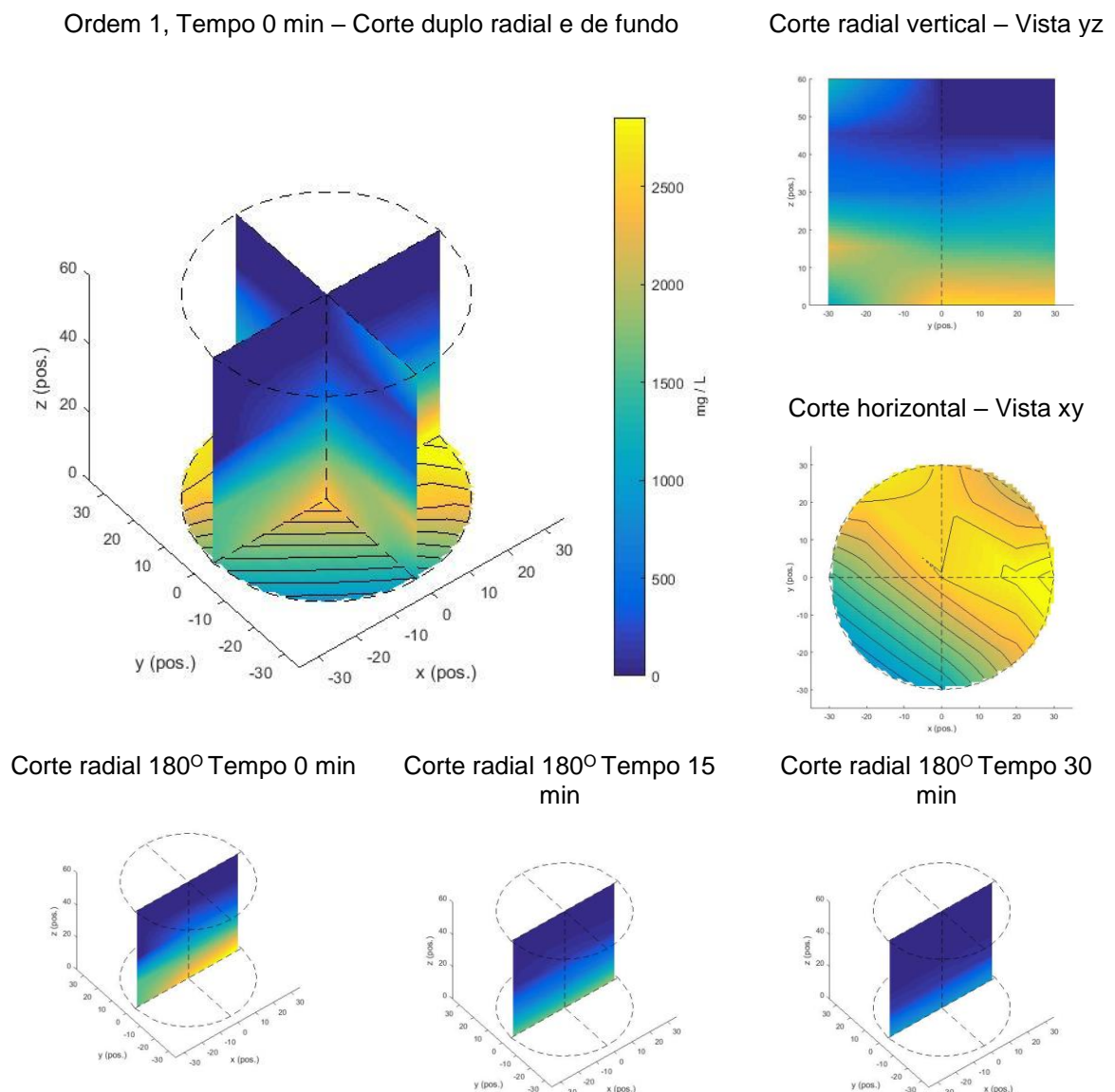
Fonte: O autor – Software Hydro 1.01

O corte duplo radial e de fundo, com posicionamento das concentrações por *colormap*, revela próximo da coordenada (0, -30, 60) de entrada do reator, a concentração remanescente do pulso de injeção após a medição em instante 0. Nota-se a forte derivação da propagação da massa a 45° dos eixos coordenados no sentido do 1º quadrante. Os cortes radiais a 136° nos tempos de 0, 15 e 30 minutos,

apresentam o deslocamento de massa em um plano diametral entre xz e yz, podendo-se constatar o transporte de massa no sentido entrada → saída do reator, promovido pelo escoamento de diluição.

No ensaio Ens 03\_20L\_h, com regime laminar, número de Reynolds de 23,09, denota-se a rápida deposição de massa para as regiões inferiores do reator. Com a Figura 64 apresenta-se algumas imagens selecionadas do ensaio.

Figura 64 – Imageamento das concentrações da solução – Ensaio Ens 03\_20h



Fonte: O autor – Software Hydro 1.01

O corte duplo radial e de fundo, com posicionamento das concentrações por *colormap*, revela próximo da coordenada (0, -30, 60) de entrada do reator, a

concentração remanescente do pulso de injeção após a medição em instante 0. Com os cortes também se percebe a deposição de massa nas regiões inferiores do reator, com uma clara tendência para o primeiro, segundo e quarto quadrantes do fundo circular. Os cortes radiais a 180° nos tempos de 0, 15 e 30 minutos, apresentam o deslocamento de massa no plano diametral xz, podendo-se constatar o transporte de massa no sentido entrada → saída do reator, promovido pelo escoamento de diluição. Percebe-se também, nestes cortes radiais, a gradativa diluição da solução pela avaliação dos níveis de concentrações apresentados nos mapas de cores.

#### 4.5 DISCUSSÃO – INFLUÊNCIA DA VAZÃO

Os dados e gráficos de detecção de massa verificada na operação pelos três métodos de medição – medição por Sonda SDT na saída do reator, Sonda SDT na proveta de coleta de saída do reator e por Coleta de Sinais – permitiram observar que, independentemente da vazão de operação do sistema, foi possível recuperar cerca de 95% a 99% da massa injetada. As repetições realizadas para cada vazão de operação possibilitaram corroborar os resultados entre si.

Em todas as situações se observou a alta atividade inicial da curva de detecção de massa, decorrente da maior descarga de massa, enquanto nos períodos subsequentes a atividade reduz tendendo à horizontalidade e a uma descarga nula, permanecendo dentro do tanque uma parcela da massa injetada, por mais prolongado que seja o tempo do ensaio.

Verifica-se pelos resultados obtidos a influência da componente advectiva de transporte de massa decorrente do aumento de vazão e respectiva velocidade de escoamento, ocasionando o menor tempo de detenção à medida que se aumentou a vazão de operação. Isto é, o tempo de detenção foi menor para os ensaios com vazão nominal de 20 L/h quando comparado aos dados para os ensaios com vazão nominal de 15 L/h que, por sua vez, apresentaram tempo de detenção inferior àquele obtido para os ensaios com vazão nominal de 10 L/h.

Os histogramas de permanência por parcelas de massas ejetadas permitem correlacionar a vazão com o tempo de permanência da massa dentro do sistema, de forma que este é inversamente proporcional à vazão de operação. Para os ensaios do Módulo 1 – conjunto de repetições com vazão nominal de 10 L/h – observa-se que 90% da massa já havia deixado o sistema com tempo variando entre 82,50 minutos e

101,40 minutos, a depender da vazão de operação de cada ensaio. Já para os ensaios do Módulo 2 – conjunto de repetições com vazão nominal de 15 L/h – observa-se que 90% da massa deixou o sistema com tempo variando entre 49,81 minutos e 50,25 minutos. Por fim, para os ensaios do Módulo 3 – conjunto de repetições com vazão nominal de 20 L/h – observa-se que 90% da massa já havia deixado o sistema com tempo variando entre 36,73 minutos e 39,49 minutos.

Também, em todas as situações ensaiadas, as curvas de concentrações médias dos modelos experimentais apresentaram forte caimento inicial quando comparadas às curvas dos modelos ideais.

A análise de imageamento permitiu verificar para todas as situações ensaiadas o adensamento da massa espalhada no reator no sentido entrada → saída , superfície → fundo, pela ausência de mistura artificial no experimento realizado. Ainda, a análise por imageamento ratifica a relação – inversa – entre a vazão de operação do sistema e o tempo de detenção. Ou seja, as imagens possibilitaram verificar que quanto maior a vazão de operação, mais rapidamente a massa é ejetada do sistema, permanecendo ainda parcela residual dentro do sistema, independentemente do tempo que se prolongue o ensaio.

A dispersão da massa no espaço também sofre influência da vazão de diluição. No módulo 1 o pico de variação vertical ocorreu em média aos 120 minutos de operação. No módulo a ocorrência foi, em média, aos 63 minutos e os 43 minutos no módulo 3.

Nos três módulos de ensaios pode-se detectar a tendência de direcionamento da propagação da massa para o entorno do primeiro quadrante. Essa detecção, viável com a utilização de sensores (eletrodos no caso deste trabalho) localizados em diversas posições no interior do escoamento, promove a utilidade da tecnologia ao proporcionar informações de todo o volume estudado. Porém, a causa do direcionamento é o próprio sistema de aquisição de dados e sua intrusividade. Após a análise de imagens em diversas posições e instantes consta-se o caminhamento da propagação de massa sendo interferido pela fiação de conexão dos eletrodos, com direcionamento ao primeiro quadrante. Uma solução para instalação, reduzindo o nível de intrusão, pode estar na produção da malha de suporte dos eletrodos como sendo a própria fiação de conexão.

## 5 CONCLUSÕES

O desenvolvimento do sistema apresentou um resultado relevante em termos de precisão da aquisição de sinais, sistematização e processamento de dados, proporcionando elementos para interpretação, averiguação e o esclarecimento de importantes características no auxílio ao diagnóstico hidrodinâmico. Tem potencial para ainda maiores inserções e automatizações a respeito do escoamento interno com eventuais incrementos no software de visualização que dispõe das informações numéricas que por hora foram utilizadas para produção de resultados manuais. Estes resultados manuais poderão, por meio do software, serem proporcionados instantaneamente.

A operação do sistema, com a variabilidade de parâmetros, a utilização de comutação centralizada e o registro de dados, são procedimentos que embasam os processos de futuras automatizações a serem implantadas por meio de registro de dados em *datalogger* e comutações efetivadas utilizando um controlador lógico programável, desta forma, inclusive, reduzindo o tempo para aquisição de dados em cada rodada de medição.

A calibração do sistema se demonstrou como elemento essencial na viabilidade do processo de aquisição de dados fornecendo informações imprescindíveis para a adequação do sistema ao objetivo de medição de concentrações nas coordenadas espaciais. Obviamente a calibração também se insere no contexto de automatização.

Foram obtidos e comparados dados pelos três métodos de medição, sendo: a) medição por sonda SDT (sólidos dissolvidos totais) na saída do reator, por meio da coleta de uma amostra pontual, ao final de cada rodada de obtenção de dados (sinais resposta) dos eletrodos, utilizando-se um Becker de 100 ml de volume; b) medição por sonda SDT (sólidos dissolvidos totais) na proveta de coleta de saída do reator, ao final de cada preenchimento do volume total (2 L) da proveta; c) por Coleta de Sinais em resposta à energização individual de cada eletrodo, realizando a leitura diretamente no condutivímetro, para cada nó (total de 45), tendo tempo médio para a realização de cada rodada de leitura de três minutos.

A validação dos ensaios demonstrou a acurácia do sistema como um todo na precisão dos dados adquiridos pelo sistema, sendo compatível com os meios alternativos de medição nas comparações efetivadas neste trabalho.

As imagens produzidas pelo software Hydro a partir dos dados de ensaios foram identificadas como plenamente compatíveis com o que poderia se esperar do comportamento hidráulico dos escoamentos e propagação da massa ocasionados nas baterias de ensaios.

A intrusão no escoamento ocasionada pela fiação de conexão com os eletrodos da malha de aquisição, que pelos próprios resultados e imagens obtidas por este sistema foi possível identificar, pode ser expressivamente reduzida por meio de uma malha de sustentação e posicionamento dos eletrodos, constituída pela própria fiação de conexão elétrica e com disposição de acesso ao interior do volume efetivada do lado externo do compartimento, eliminando, dessa forma, a grande parte dos elementos intrusivos no escoamento.

Este estudo possibilitou verificar como se comporta o escoamento, utilizando traçador salino e se obtendo parâmetros hidráulicos, como a distribuição dos tempos de residência das partículas de traçador. Como discorrido anteriormente, o comportamento hidrodinâmico do reator é fator fundamental na taxa de retirada de poluentes; e o traçador operou como um indicador da hidrodinâmica do sistema, possibilitando, por meio da análise dos resultados obtidos, verificar os caminhos de preferência, zonas mortas de escoamento e o período de detenção do sistema testado. Isto possibilita contribuir para a adequação das características físicas destas instalações de saneamento (reatores), visando maior eficiência e eficácia destas.

## **6 PROPOSTAS PARA ESTUDOS FUTUROS**

Como propostas de novos ensaios de embasamento, propõem-se a utilização de dispositivos de interferência no volume de estudo, como gincanas, dissipadores, aletas, injetores de múltiplos pulsos, operação em degrau de injeção de massa, inversão de escoamento, alternância entrada/saída e posicionamentos diferenciados das conexões de entrada/saída, homogeneização mecânica e outros dispositivos que possam oferecer respostas da acurácia de todo o processo em descrever o comportamento hidráulico do sistema de medição demonstrado neste trabalho.

## REFERÊNCIAS

- BARBOSA FILHO, Olavo; COSTA, Ernani S.; GIORDANO, Gandhi. **Reatores anaeróbios de manta de lodo (UASB):** uma abordagem concisa. Rio de Janeiro: COAMB/FEN/UERJ, 2014.
- BIRD R. B.; STWART, W. E.; LIGHTFOOT, E.N. **Transport Phenomena.** 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 2006. 905p.
- BODIN, H.; PERSSON, J. Hydraulic performance of small free water surface constructed wetlands treating sugar factory effluent in western Kenya. **Hydrology Research**, Linköping, n. 43, p. 476-488, 2012.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. **Cidades**, 2007. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/cidadesat/topwindow.htm?1>. Acesso em: 18 dez. 2020.
- CARVALHO, Karina Q.; SALGADO, Monique T.; PASSIG, Fernando H.; PIRES, Eduardo C. Avaliação Hidrodinâmica de Reator UASB Submetido à Variação Cíclica de Vazão. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 13, n. 2, p. 226- 235, 2008.
- DANTAS, M. A. R.; MELO, H. N. S.; ANDRADE NETO, C. O. Aplicação de traçadores em filtros anaeróbios para avaliação das características hidrodinâmicas. *In*: CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 23., 2000, Porto Alegre. **Anais [...]** Rio de Janeiro, ABES, 2000.
- DE NARDI, I. R.; ZAIAT, M; FORESTI, E. Influence of the tracer characteristics on hydrodynamic models of packed-bed bioreactors. **Bioprocess Engineering**, Alemanha, v. 21, n. 5, p. 469-476, nov. 1999.
- DORIGON, E. B.; TASSARO, P. Caracterização dos efluentes da lavagem automotiva em postos de atividade exclusiva na região AMAI – Oeste catarinense. **Unoesc & Ciência – ACBS**, Joaçaba, v. 1, n. 1, p. 13-22, jan./jun. 2010.
- DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. **Métodos e Técnicas de Tratamento de Água.** 2. ed. São Carlos: RiMA, 2006. 792p.
- FICK, A. Über Diffusion. **Poggendorff's Annalen der Physik und Chemie**, n. 94, p. 59–86, 1855.
- FOGLER, H. S. **Elements of Chemical Reaction Engineering.** 2. ed. New Jersey: Prentice Hall, 1992.
- GILAT, A. **MATLAB® com aplicações em Engenharia.** 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006. 359p.
- HANSELMAN D.; LITTLEFIELD B. **MATLAB® Curso Completo.** São Paulo: Prentice Hall, 2003. 676p.



HOWE, K.J. *et al.* **Princípios de Tratamento de Água**. São Paulo: Cengage, 2016. 624p.

INCROPERA, F. P. *et al.* **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. Rio de Janeiro: LTC, 2007. 639p.

LE MOULLEC, Y. *et al.* Comparison of systemic, compartmental and CFD modelling approaches: Application to the simulation of a biological reactor of wastewater treatment, **Chemical Engineering Science**, Nancy, v. 65, p. 343-350, 2010.

LEVENSPIEL, Octave. **Engenharia das Reações Químicas**, Vol. 1 e 2. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 1972.

LEVENSPIEL, Octave. **Engenharia das Reações Químicas**. 3. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1999.

LITO, P. F. *et al.* Universal model for accurate calculation of tracer diffusion coefficients in gas, liquid and supercritical systems. **Journal Of Chromatography**, n. 1290, p. 1-26, 2013.

MATOS, M. P. *et al.* Saline Tracer Use For Clogging And Hydrodynamic Evaluations In Horizontal Subsurface Flow Constructed Wetlands. **Revista Engenharia Agrícola** v. 35, n. 6, p. 1137-1148, 2015.

METCALF & EDDY. **Wastewater engineering: treatment and reuse**. 4. ed. New York: McGraw Hill, 2003.

MORGAN-SAGASTUME, Juan M.; JIMÉNEZ, B.; NOYOLA, Adalberto. Tracer Studies in a Laboratory and Pilot Scale UASB Reactor. **Environmental Technology**, Londres, v. 18, n. 8, p. 817-825, 1997.

NETTO, A.; FERNÁNDEZ, M. F. **Manual de Hidráulica**. 9. ed. São Paulo: Blucher, 2015. 632p.

NUNES, J. A. **Tratamento Biológico de Águas Residuárias**: Tratamento de água. 2. ed. Aracaju: J. Andrade, 2010. 265p.

PEÑA, Miguel R.; MARA, D. D.; AVELLA, G. P. Dispersion and treatment performance analysis of an UASB reactor under different hydraulic loading rates. **Water Research**, v. 40, n. 3, p. 445-452, fev. 2006.

PIRES, Eduardo C.; RIBEIRO, A. P. Avaliação Preliminar do Comportamento Hidrodinâmico de Reatores Anaeróbios de Escoamento Ascendente e Manta de Lodo. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA, 11., 1992. **Anais [...]** São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, 1992.

PONTES, Patrícia. **Reatores UASB aplicados ao tratamento combinado de esgotos sanitários e lodo excedente de filtro biológico percolador**. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003.

ROMA, W. N. L. **Fenômenos de Transporte para Engenharia**. São Carlos: Ed. RiMA, 2003.

SABESP. Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo. São Paulo, SP. Disponível em: <http://sabesp.com.br>. Acesso em: 15 nov. 2020.

SANDAKA, G. **Hidrodinâmica de um sistema de alagado construído utilizado no tratamento de rejeito salino**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2018.

SANTOS, H. F. Critérios de Qualidade da Água para Reuso. **Revista DAE – SABESP**, São Paulo, n. 174, nov./dez. 1993.

SILVA, L. L. *et al.* Traçadores: O Uso de Agentes Químicos Para Estudos Hidrológicos, Ambientais, Petroquímicos e Biológicos. **Química Nova**, Belo Horizonte, v. 32, n. 6, p. 1576-1585, 2009.

SILVEIRA, H.; DOLL, M. M. R.; SZÉLIGA, M. R. Aplicação do modelo de tanques em série na caracterização hidrodinâmica de reator anaeróbio de leito fluidificado. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, Ponta Grossa, v. 8, p. 70-80, 2016.

SOUZA, Tais H. Y. **Estudo Hidrodinâmico de Reator Aeróbio-Anóxico de Leito Fixo (RAALF)**. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

RISSOLI, César Augusto. **Estudo de parâmetros operacionais do reator UASB tratando esgoto doméstico e avaliação da biodegradabilidade do seu efluente**. Brasília: ENC/FT/UnB, 2004.

ZAHRAEIFARD, V.; DENG, Z. Hydraulic residence time computation for constructed wetland designer. **Ecological Engineering**, v. 37, p. 2087-2091, 2011.