

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SANEAMENTO,**  
**MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS**

**ESTUDOS E MODELAGEM DO**  
**COMPORTAMENTO HIDRODINÂMICO DE**  
**LAGOAS DE POLIMENTO**

**Ricardo Gomes Passos**

**Belo Horizonte**

**2017**

**ESTUDOS E MODELAGEM DO  
COMPORTAMENTO HIDRODINÂMICO DE  
LAGOAS DE POLIMENTO**

**Ricardo Gomes Passos**

**Ricardo Gomes Passos**

**ESTUDOS E MODELAGEM DO  
COMPORTAMENTO HIDRODINÂMICO DE  
LAGOAS DE POLIMENTO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Área de concentração: Saneamento

Linha de pesquisa: Tratamento de Águas Residuárias

Orientador: Prof. Dr. Marcos von Sperling

Coorientador: Dr. Vinícius Verna Magalhães Ferreira

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2017



## FOLHA DE APROVAÇÃO

Estudos e Modelagem do Comportamento Hidrodinâmico de Lagoas de Polimento

### RICARDO GOMES PASSOS

Tese defendida e aprovada pela banca examinadora constituída pelos Senhores:

  
Prof. MARCOS VON SPERLING - Orientador

  
Prof. VINÍCIUS VERNA MAGALHÃES FERREIRA - Coorientador

  
Profa EDNA MARIA DE FARIA VIANA

  
Prof. CARLOS AUGUSTO DE LEMOS CHERNICHARO

  
Prof. RUBENS MARTINS MOREIRA

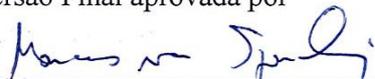
Prof. ANDRÉS OMAR ALVARADO MARTÍNEZ



Aprovada pelo Colegiado do PG SMARH

  
Prof. Nilo de Oliveira Nascimento  
Coordenador

Versão Final aprovada por

  
Prof. Marcos von Sperling  
Orientador

Belo Horizonte, 11 de agosto de 2017.

## AGRADECIMENTOS

Muitas vezes abri página em branco para escrever estes agradecimentos, e muitas a tornei a fechar por não saber o que escreveria. Se escrever as demais partes da Tese foi árdua tarefa, não é opostamente fácil esta, visto a grande vontade de dirigir a palavra a todos, nominalmente, sem de nenhum nome esquecer e sem extrapolar este pequeno espaço, além da vontade de deixar registrado algo que traduzisse a alegria de concluir mais esta etapa da minha vida, sem marcar de tanta intimidade um texto que deve ser intrinsecamente despido dela. Assim, decidi perder esta guerra e, com pesar, me limitarei a citar poucos nomes, mas rogando a devida vênua àqueles não citados, lembrando-os que são igualmente importantes. Assim, neste espaço agradeço e dedico todo este esforço e trabalho a todos que o tornaram possível e também aqueles que o motivaram:

À toda minha família, em especial a mainha e painho - Seu Ricardo e Dona Fabíola - minha irmã Lu Siruca e minha esposa Ize Calopsita, pela paciência nos momentos difíceis e por entender minha ausência em alguns deles. Com força e fé vamos superar todos.

Aos meus amigos da Bahia, de Viçosa e Belo Horizonte, em especial à turma da EAB-UFV, turma da ETA-UFV, das repúblicas em Viçosa e BH, do Muay Thai, do Futebol, do Kung Fu... A Bagos, Beleiza, Bidjei, Uli, Thumé, Mano, Gui, Sil, Tchaka, Kaco, Thai, Jus, Tisa, Pri, Raíssa, Dani, Glugs, Isa, Gabis(s), Jamile, Detboy, Sury, Nay, Nat, Lora, Renats, Sara, José, Peter, Luna, Rafa, Paulinha, Thiaguim, Ana, Lider, Soneca, Gó, Tatau... pelo apoio, incentivos, cervejas, amizade e torcida.

Aos professores da UFV e UFMG, em especial à Rafael Bastos, Ann, Ana Augusta, Carlos Chernicharo, Eduardo, Cláudio, Lisete, Marcelo Libânio, Silvia, Leo Heller.... Obrigado pelos ensinamentos e oportunidades. Ainda mais especial ao professor Marcos - que muito admiro - pela orientação, ensinamentos, incentivos, gentilezas e compreensão. Grande exemplo de pessoa e de profissional. Ao pessoal do administrativo do PPGSMARH, em especial Iara, Julio, Suzane e Elaine.

Aos meus amigos e colegas da Infraero, em especial ao Tião, Ganso, Tati, Nase, Mader, Selma, Maíra, Marina, Gamarano, Guila, Gabriel... pelo apoio, acompanhamento e torcida. À Infraero, pela concessão da licença capacitação.

Aos amigos e colegas da UFMG que contribuíram com esta pesquisa, em especial ao Daniel Portuga, Mateus, Elias, Capadócio Bressani, Jorge (Rorre), Carlitos, Laurita, Deborinha, Fabri, Manel, Thiago E., Lucas, Curupira, Baxter, Fêr, Matt, Calebe.... Aos alunos de IC e ao Sr. Raimundo, Juju e Tadeu, pela grande ajuda no Cepts. À turma do CDTN, pela grande contribuição e gentileza, em especial ao Vinícius, Leo, Nat e Presley. Ao CNPQ, FAPEMIG, CAPES, COPASA, pelo suporte, e à Fundação Bill & Melinda Gates, projeto “*Stimulating local innovation on sanitation for the urban poor in Sub-Saharan Africa and South-East Asia*”, no qual uma parte desta pesquisa foi inserida.

Aos membros da banca examinadora, pelas valiosas contribuições.

Ao povo brasileiro.

## RESUMO

A eficiência de lagoas de estabilização está intimamente relacionada a fatores hidrodinâmicos que podem ocorrer no interior desses sistemas. Inferência sobre alguns desses fatores (a exemplo do curto-circuito, grau de dispersão e zonas de estagnação) é possível por meio da técnica estímulo-resposta com o uso de traçadores. Já a influência de fenômenos como estratificação térmica, mistura vertical, ação do vento, turbulência, presença do lodo e linhas de recirculação é mais bem descrita com análise de outros dados de campo, tais como medições no perfil vertical da lagoa, uso de flutuadores, corantes, dados meteorológicos, e com uso de modelos matemáticos e ferramentas computacionais mais avançadas de análise de fluxo, sendo a *Computational Fluid Dynamics* (CFD), ou fluidodinâmica computacional, um excelente exemplo e de crescente aplicação na área. Com o objetivo de avaliar o comportamento hidrodinâmico de lagoas e a sua relação com características de projeto, operação e fatores ambientais externos, utilizou-se as ferramentas mencionadas para estudos e modelagem em duas lagoas de polimento em diferentes configurações operacionais, dimensionadas para o atendimento de pequenas comunidades. Resultados do monitoramento no perfil vertical demonstraram eventos periódicos diários de estratificação térmica seguidos de desestratificação e mistura vertical, em ambas as lagoas e fases de operação, bem como grande influência do lodo no balanço térmico. Testes com traçadores e medidores de fluxo revelaram velocidades típicas, trajetórias e tendências de comportamentos hidrodinâmicos nas lagoas - tais como acentuado curto-circuito e tendência geral de mistura completa - bem como permitiram registros práticos a respeito do uso dessas técnicas, a exemplo de advertências sobre o uso de sal de cozinha como traçador e restrições no uso de molinetes hidráulicos e medidores de fluxo. Modelos em CFD foram desenvolvidos considerando as condições de contorno e as interações com o ambiente externo mais relevantes para lagoas, e contribuíram para reforçar a importância da ferramenta na análise hidrodinâmica desses sistemas. Os modelos, calibrados e validados, foram utilizados em conjunto com dados de campo e permitiram uma análise hidrodinâmica detalhada, possibilitando assim avaliações e diagnósticos de unidades existentes, melhorias de projetos, intervenções operacionais para melhoria da eficiência e possíveis sugestões de avanços nos estudos e na modelagem desses sistemas.

## ABSTRACT

The efficiency of stabilization ponds is closely related to hydrodynamic factors that may occur within these systems. Inference about some of these factors (eg, short circuit, dispersion degree and stagnation zones) is possible through the stimulus-response technique with tracers. However, influence of phenomena such as thermal stratification, vertical mixing, wind effects, turbulence, presence of sludge and recirculating flows can best be described with analysis of other field data, such as measurements along the vertical profile of the pond, use of hydraulic measurement devices, dye, weather data, and/or use of more advanced computational flow analysis tools; being the Computational Fluid Dynamics (CFD) an excellent example, with increasing application in the area. In order to evaluate the hydrodynamic behavior of ponds and their relationship with design characteristics, operation and external environmental factors, the aforementioned tools were used for studies and modeling in two polishing ponds in different operational configurations, designed to small communities. Results of the vertical profile monitoring demonstrated daily thermal stratification events followed by destratification and vertical mixing, in both ponds and operation phases, as well as great influence of the sludge on the thermal balance. Tracer tests and flow analysis tests revealed typical velocities, trajectories and trends of hydrodynamic behavior in ponds - such as high degree of short-circuiting and general tendency of complete mixing - as well as practical records regarding the use of these techniques, as warnings about the use of table salt as a tracer and restrictions on the use of hydraulic devices and flow meters. CFD models were developed considering the contour conditions and interactions with environment most relevant to ponds, and contributed to reinforce the importance of the tool in the hydrodynamic analysis of these systems. The models (calibrated and validated) were used in conjunction with field data and allowed a detailed hydrodynamic analysis, thus allowing evaluations and diagnoses of existing units, project improvements, operational interventions to improve efficiency and possible suggestions for advances in studies and modeling of these systems.

# SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>VI</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>XVII</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS .....</b>	<b>XIX</b>
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO.....	1
1.2 ORGANIZAÇÃO DA TESE .....	5
<b>2 REVISÃO DA LITERATURA.....</b>	<b>6</b>
2.1 LAGOAS DE ESTABILIZAÇÃO: O QUE SÃO E POR QUE UTILIZÁ-LAS .....	6
2.2 VARIANTES DE LAGOAS .....	7
2.3 LAGOAS DE POLIMENTO .....	8
2.4 GERAÇÃO E CARACTERÍSTICAS DE ACÚMULO DO LODO EM LAGOAS .....	12
2.5 HIDRODINÂMICA DE LAGOAS.....	15
2.5.1 <i>Geometria da lagoa</i> .....	17
2.5.2 <i>Modelos teóricos de escoamento e cinética de reação (lagoa como reatores)</i> .....	26
2.5.3 <i>Estratificação térmica e circulação vertical</i> .....	40
2.5.4 <i>Ação do vento</i> .....	46
2.5.5 <i>Métodos para avaliação hidrodinâmica em lagoas</i> .....	50
2.6 TRAÇADORES.....	51
2.6.1 <i>Técnica de estímulo-resposta com uso de traçadores</i> .....	57
2.6.2 <i>Traçadores em lagoas</i> .....	68
2.7 DROGUES (FLUTUADORES COM ADAPTAÇÕES).....	71
2.7.1 <i>Uso de drogas em lagoas</i> .....	72
2.8 FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL (CFD) .....	76
2.8.1 <i>Definição, histórico e aplicações</i> .....	76
2.8.2 <i>Visão geral da matemática do CFD</i> .....	77
2.8.3 <i>CFD em lagoas de estabilização</i> .....	79
<b>3 OBJETIVOS.....</b>	<b>118</b>
3.1 OBJETIVO GERAL .....	118
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	118
<b>4 MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>119</b>
4.1 ÁREA DE ESTUDO E UNIDADE EXPERIMENTAL.....	119
4.1.1 <i>Distribuição do afluente</i> .....	123
4.1.2 <i>Lagoa 1 (lagoa com lodo, sem chicanas)</i> .....	123
4.1.3 <i>Lagoa 2 (sem lodo no início; sem e com chicanas)</i> .....	126
4.2 DADOS DE MONITORAMENTO EM CAMPO .....	129
4.2.1 <i>Análises físicas, químicas e biológicas de entrada e saída e medições de vazão</i> .....	129
4.2.2 <i>Condições climáticas/meteorológicas</i> .....	131
4.2.3 <i>Análises temporais do perfil vertical de parâmetros de qualidade</i> .....	133
4.3 ENSAIOS HIDRODINÂMICOS DE CAMPO.....	137
4.3.1 <i>Análises uni e bidimensionais de fluxo</i> .....	137
4.3.2 <i>Ensaio com traçadores</i> .....	148
4.4 MODELAGEM MATEMÁTICA E ESTATÍSTICA .....	156
4.5 MODELAGEM EM CFD .....	157
4.5.1 <i>Geometrias</i> .....	158
4.5.2 <i>Malhas</i> .....	162
4.5.3 <i>Domínio e condições de contorno</i> .....	164
4.5.4 <i>Modelos de transporte (equações governantes)</i> .....	171
4.5.5 <i>Modelos de temperatura, radiação solar e perda de calor por evaporação (balanço térmico)</i> ..	184
4.5.6 <i>Modelo de cisalhamento pela atuação do vento</i> .....	188
4.5.7 <i>Modelo de injeção de traçador virtual</i> .....	189
4.5.8 <i>Critérios básicos de processamento</i> .....	190

<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>192</b>
5.1	DADOS DE MONITORAMENTO EM CAMPO .....	192
5.1.1	<i>Análises físicas, químicas e biológicas de entrada e saída e medições de vazão.....</i>	<i>192</i>
5.1.2	<i>Condições climáticas e meteorológicas.....</i>	<i>196</i>
5.1.3	<i>Análises temporais do perfil vertical dos principais parâmetros de qualidade .....</i>	<i>210</i>
5.2	ENSAIOS HIDRODINÂMICOS DE CAMPO.....	226
5.2.1	<i>Análises uni e bidimensionais de fluxo .....</i>	<i>226</i>
5.2.2	<i>Ensaio com traçadores.....</i>	<i>263</i>
5.3	MODELAGEM EM CFD .....	275
5.3.1	<i>Geometrias e malhas .....</i>	<i>275</i>
5.3.2	<i>Simulações.....</i>	<i>283</i>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>369</b>
<b>7</b>	<b>RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>374</b>
<b>8</b>	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>376</b>

## LISTA DE FIGURAS

- FIGURA 3.1:** Ilustração de fenômenos hidrodinâmicos em escoamentos não ideais..... 52
- FIGURA 3.2:** Exemplos de tipos de alimentação experimental que podem ser utilizados em ensaios de estímulo-resposta com traçadores..... 57
- FIGURA 3.3:** Exemplos de curvas de resposta (concentração do traçador ao longo do tempo) de ensaios em reatores de fluxo pistonado, mistura perfeita/completa ou escoamento arbitrário, após alimentação do tipo pulso..... 58
- FIGURA 3.4:** Curva de distribuição da idade de saída ( $E$ ) ou curva da distribuição do tempo de residência (DTR) para um fluido escoando através de um reator..... 59
- FIGURA 3.5:** (a) Transformação de uma curva experimental  $C_{pulso}$  em uma curva  $E$  e (b) transformação de uma curva  $E$  em uma curva  $E_{\theta}$  ..... 61
- FIGURA 4.1:** Vista do CePTS UFMG/COPASA, com indicação das lagoas de polimento em estudo, pós reator UASB. .... 121
- FIGURA 4.2:** Desenho esquemático ilustrativo do arranjo operacional da ETE experimental CePTS UFMG/COPASA nas duas fases: (a) Fase 1: lagoas em paralelo e (b) Fase 2: lagoas em série, com chicanas na segunda. .... 122
- FIGURA 4.3:** Sistema de distribuição do afluente, após saída do reator UASB no CePTS-UFMG/COPASA: (a) caixa de equalização de vazão após o UASB, com destaque para os vertedores e (b) caixas de distribuição. .... 123
- FIGURA 4.4:** Vista da Lagoa 1, com indicações dos locais de entrada e saída de efluente – CePTS UFMG/COPASA..... 124
- FIGURA 4.5:** Vista dos dispositivos de entrada e saída na lagoa 1 – CePTS UFMG/COPASA: (a) entrada e (b) saída..... **Erro! Indicador não definido.**
- FIGURA 4.6:** Croqui em planta, sem escala, da lagoa 1 com indicação das distâncias (em metros) dos dispositivos de entrada e saída em relação às bordas (fundo da lagoa) - CePTS-UFMG/COPASA .... 125
- FIGURA 4.7:** Distribuição espacial do lodo na lagoa 1 – CePTS UFMG/COPASA ..... 125
- FIGURA 4.8:** Vista da lagoa 2 durante a fase 1, com indicações dos locais de entrada e saída de efluente – CePTS UFMG/COPASA..... 126
- FIGURA 4.9:** Croqui em planta, sem escala, da lagoa 2 durante a fase 1, com indicação das distâncias (em metros) dos dispositivos de entrada e saída em relação às bordas (fundo da lagoa) – CePTS UFMG/COPASA ..... 127
- FIGURA 4.10:** Vista da lagoa 2 durante a fase 2, com indicações dos locais de entrada e saída de efluente, e visualização das chicanas longitudinais – CePTS UFMG/COPASA... 127

<b>FIGURA 4.11:</b> Detalhes construtivos da lagoa 2 durante a fase 2 – CePTS UFMG/COPASA: (a) ilustração do balde utilizado para contenção de sobras da lona e locais de fixação e (b) detalhe das vigotas para ancoramento e dos cabos de aço para sustentação.....	128
<b>FIGURA 4.12:</b> Vista dos dispositivos de entrada e saída na lagoa 2, fase 2 – CePTS UFMG/COPASA: (a) entrada e (b) saída.....	129
<b>FIGURA 4.13:</b> Croqui em planta, sem escala, da lagoa 2 durante a fase 2, com indicação das distâncias (em metros) dos dispositivos de entrada e saída em relação às paredes e espaçamentos entre as chicanas (plano do fundo da lagoa) – CePTS UFMG/COPASA. ...	129
<b>FIGURA 4.14:</b> Desenho esquemático ilustrativo com os pontos de monitoramento de rotina (pontos em vermelho) na ETE experimental CePTS UFMG/COPASA durante a fase 2. ...	130
<b>FIGURA 4.15:</b> (a) Vista da estação meteorológica instalada no CePTS UFMG/COPASA, (b) detalhe do anemômetro (c) detalhe do receptor remoto de dados .....	132
<b>FIGURA 4.16:</b> Locação das unidades de tratamento em relação ao norte magnético (referência da estação meteorológica).....	133
<b>FIGURA 4.17:</b> Registro fotográfico (a) da montagem das sondas YSI 600XLM V2® fixas em cavalete e (b) das sondas Global Water WQ101® na entrada da lagoa 2 – CePTS UFMG/COPASA .....	134
<b>Figura 4.18:</b> Desenho esquemático ilustrativo da locação dos pontos de monitoramento nas lagoas nas duas fases de operação.....	136
<b>FIGURA 4.19:</b> Registro fotográfico do (a) <i>Drogue</i> montado na presente pesquisa para análise de fluxo bidimensional nas lagoas do CePTS UFMG/COPASA, com GPS embutido e (b) GPS GARMIN OREGON 450® com bateria externa adaptada. ....	138
<b>FIGURA 4.20:</b> Registro fotográfico dos <i>drogues</i> verticais montados para análise de fluxo bidimensional nas lagoas do CePTS UFMG/COPASA. ....	139
<b>FIGURA 4.21:</b> Registro fotográfico (a) da medição de velocidade com <i>drogue</i> vertical (n° 3) na entrada da lagoa 1 - CePTS UFMG/COPASA e (b) do <i>drogue</i> vertical (n° 1) em trajetória junto ao talude da lagoa 1.....	140
<b>FIGURA 4.22:</b> Equipamentos utilizados para medição de velocidade nas lagoas do CePTS UFMG/COPASA: (a) Molinete Flow Probe 3.7'-6' Swivel Head®, da Global Water; (b) Molinete Flow Rate Sensor Go!@Link, Vernier; (c) controlador de mão e sensores do medidor ADV Sontek/YSI FlowTracker®.....	141
<b>FIGURA 4.23:</b> Indicação da localização das seções e dos pontos de medição com os molinetes e com o medidor acústico na lagoa 1 - CePTS UFMG/COPASA .....	144
<b>FIGURA 4.24:</b> Indicação da localização das seções e dos pontos de medição com os molinetes e com o medidor acústico na lagoa 2 - CePTS UFMG/COPASA.....	145
<b>FIGURA 4.25:</b> Registro fotográfico da lagoa 1 com os transectos marcados com barbante para identificação das seções de medição - CePTS UFMG/COPASA .....	146

<b>FIGURA 4.26:</b> Registro fotográfico das medições com o molinete Flow Probe 3.7'-6' Swivel Head®, (a) na entrada da lagoa 1 e (b) na entrada da lagoa 2 chicaneada - CePTS UFMG/COPASA .	146
<b>FIGURA 4.27:</b> (a) Registro fotográfico das medições com o molinete Flow Rate Sensor Go!@Link, Vernier na entrada da lagoa 1 e (b) Computador conectado diretamente ao molinete para registro dos dados .	147
<b>FIGURA 4.28:</b> Registro fotográfico das medições com o ADV Sontek/YSI FlowTracker®.	147
<b>FIGURA 4.29:</b> (a) Registro fotográfico da utilização de tubo de PVC perfurado para aplicação de corante na lagoa 1 e (b) Registro da introdução do corante no tubo .	148
<b>FIGURA 4.30:</b> Registro fotográfico (a) de um dos ensaios de traçador - lagoa 2 e (b) da sonda YSI 600XLM V2 fixa ao cavalete para posterior inserção no final das lagoas - CePTS UFMG/COPASA.	150
<b>FIGURA 4.31:</b> Registro fotográfico do aparato para medição da concentração do traçador fluorescente nas lagoas: (a) fluorímetro com <i>datalogger</i> e (b) bomba peristáltica - CePTS UFMG/COPASA .	152
<b>FIGURA 4.32:</b> Registro fotográfico da aplicação do traçador fluorescente (a) na lagoa 1 e (b) na lagoa 2 - CePTS UFMG/COPASA .	152
<b>FIGURA 4.33:</b> Exemplos ilustrativos da influência dos pesos dos pontos de controle na formação da superfície na modelagem com funções NURBS com (a) peso = 1; (b) peso = 0,5 e (c) peso = 10.	161
<b>Figura 4.34 -</b> Superfície do volume finito .	162
<b>Figura 4.35 –</b> Rugosidade da superfície de acordo com a teoria do diâmetro médio do grão de areia equivalente .	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
<b>Figura 4.36 –</b> Forças de superfície agindo sobre um volume de controle de fluido infinitesimal para a componente da velocidade $u$ e ilustração da deformação do elemento de fluido .	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
<b>FIGURA 5.1 -</b> Gráficos box-plot com a representação dos dados registrados desde a data de instalação da estação meteorológica do CePTS UFMG/COPASA, para os parâmetros temperatura (em °C), umidade relativa (%), radiação solar ( $W/m^2$ ), pressão atmosférica (bar) e velocidade do vento (m/s).	198
<b>FIGURA 5.2:</b> Anemogramas com (a) direções predominantes do vento (em termos de porcentagem de permanência no tempo) e (b) velocidades médias em cada uma dessas direções.	199
<b>FIGURA 5.3:</b> Representação da locação das lagoas com relação às direções da rosa dos ventos .	200
<b>FIGURA 5.4:</b> Gráficos box-plot com a representação dos dados de temperatura (°C), velocidade do vento (m/s) e radiação solar ( $W/m^2$ ) registrados em cada mês no CePTS – UFMG/COPASA .	203

<b>FIGURA 5.5:</b> Gráficos box-plot com a representação dos dados de temperatura (°C), velocidade do vento (m/s) e radiação solar (W/m <sup>2</sup> ) registrados ao longo de cada hora de um dia - CePTS – UFMG/COPASA. ....	207
<b>FIGURA 5.6:</b> Gráficos box-plot com a representação dos dados de temperatura (°C), velocidade do vento (m/s) e radiação solar (W/m <sup>2</sup> ) registrados ao longo de cada hora de um dia, com ajuste de funções senoidais .....	209
<b>FIGURA 5.7:</b> Perfil de (a) temperatura, (b) oxigênio dissolvido, (c) pH e (d) POR na lagoa 1 (superfície e fundo) durante o ensaio n° 4 - fase 2 – H = 0,80 .....	212
<b>FIGURA 5.8:</b> Perfil de temperatura na lagoa 2 <b>(a)</b> durante os ensaios 11, 12, 13 e 14, no inverno e <b>(b)</b> durante os ensaios 16, 17, 19, 20 e 21, no verão/outono. Fase 2, lagoa 2 com chicanas e H = 0,44m .....	213
<b>FIGURA 5.9:</b> Perfil de temperatura na lagoa 1 durante o ensaio n° 18 (pontos em azul e vermelho) apresentados com <b>(a)</b> registros da temperatura do ar no mesmo período (linha em amarelo) e <b>(b)</b> registros da velocidade do vento no mesmo período (linha em amarelo) – Fase 2, lagoa com lodo e H = 0,44m. ....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
<b>FIGURA 5.10:</b> Perfil de temperatura na lagoa 1 durante o ensaio n° 23 (pontos em azul e vermelho) – Fase 2, lagoa com lodo e H = 0,85m.....	216
<b>FIGURA 5.11:</b> Perfil de temperatura na lagoa 2 durante o ensaio n° 26 - Fase 2, lagoa 2 com chicanas e H = 0,44m. ....	216
<b>FIGURA 5.12:</b> Perfil vertical típico ao longo de um dia para as variáveis T, OD, pH e POR: monitoramento na lagoa 1 das 07h da manhã do dia 23/06/14 até as 07h do dia 24/06/14. ....	217
<b>FIGURA 5.13:</b> Estatística descritiva dos dados de gradiente térmico nas lagoas do CePTS UFMG/COPASA, <b>(a)</b> considerando todos os dados e <b>(b)</b> segregando os dados por período sazonal .....	218
<b>FIGURA 5.14:</b> Perfil vertical médio de <b>(a)</b> temperatura e <b>(b)</b> oxigênio dissolvido em períodos de estratificação e mistura vertical na lagoa 2 - ensaios 11, 12, 13 e 14 na fase 2 de operação.....	219
<b>FIGURA 5.15:</b> Perfil de temperatura (superfície e fundo) na lagoa 1 durante os ensaios n° 5, 6, 7, 15 e 27, todos com a sonda de fundo imersa no lodo. H = 0,80 m.....	220
<b>FIGURA 5.16:</b> Perfil de temperatura do lodo na lagoa 1, com as sondas em diferentes profundidades.....	221
<b>FIGURA 5.17:</b> Perfil de temperatura (superfície e fundo) e condutividade (fundo) na lagoa 1 durante o ensaio n° 3 (fase 2), com realização de ensaio de traçador. H=0,80m.....	222
<b>FIGURA 5.18:</b> Gráfico de dispersão entre temperatura do ar e gradiente térmico observado nas lagoas, com ajuste de equação preditiva .....	223
<b>FIGURA 5.19:</b> Gráfico de dispersão entre o momento da ocorrência da mistura (fração do dia em que o gradiente térmico passa a ser menor que 0,6°C/m) e a velocidade média do vento registrada na última hora.....	224

<b>FFIGURA 5.20:</b> Representação gráfica em sequência numérica da trajetória executada pelo <i>drogue</i> vertical n° 3 (centro do atuador a 0,24 m de profundidade) na lagoa 1 - teste do dia 21/04/14 no CePTS UFMG/COPASA .....	227
<b>FIGURA 5.21:</b> Representação gráfica das trajetórias executadas pelo <i>drogue</i> vertical n° 1 (centro do atuador a 0,16 m de profundidade) na lagoa 1 e anemograma para o período - teste do dia 07/02/15 no CePTS UFMG/COPASA. ....	228
<b>FIGURA 5.22:</b> Representação gráfica das trajetórias executadas pelos <i>drogues</i> verticais n° 1 (círculos pretos) e n° 2 (triângulos azuis) na lagoa 1 e anemograma para o período (centro do atuador a 0,16 e 0,23m de profundidade, respectivamente) - teste do dia 28/02/15 no CePTS UFMG/COPASA.....	230
<b>FIGURA 5.23:</b> Representação gráfica das trajetórias executadas pelo <i>drogue</i> vertical n° 1 (centro do atuador a 0,16 m de profundidade) na lagoa 1 - teste do dia 13/04/16 no CePTS UFMG/COPASA .....	232
<b>FIGURA 5.24:</b> Trajetórias executadas pelo <i>drogue</i> com GPS na lagoa 1 - teste do dia 13/04/16 no CePTS UFMG/COPASA. ....	233
<b>FIGURA 5.25:</b> Trajetória executada pelo <i>drogue</i> com GPS na lagoa 1 - teste do dia 16/07/14 no CePTS UFMG/COPASA. ....	234
<b>FIGURA 5.26:</b> Representação gráfica da trajetória executada pelo <i>drogue</i> vertical n° 2 (centro do atuador a 0,23m de profundidade) na região de entrada do primeiro canal da lagoa 2 chicaneada - teste do dia 04/04/15 no CePTS UFMG/COPASA. ....	235
<b>FIGURA 5.27:</b> Representação gráfica das trajetórias executadas <b>(a)</b> pelo <i>drogue</i> vertical n° 1 (centro do atuador a 0,16m de profundidade), <b>(b)</b> e <b>(c)</b> pelo <i>drogue</i> vertical n° 3 (centro do atuador a 0,24m de profundidade), na região de entrada do primeiro canal da lagoa 2 chicaneada - teste do dia 04/04/15 no CePTS UFMG/COPASA.....	235
<b>FIGURA 5.28:</b> Representação gráfica das trajetórias executadas pelo <i>drogue</i> vertical n° 1 no primeiro canal da lagoa 2 (centro do atuador a 0,16 m de profundidade). Detalhe da trajetória de recirculação - teste do dia 04/04/15 no CePTS UFMG/COPASA .....	236
<b>FIGURA 5.29:</b> Representação gráfica das trajetórias executadas pelo <i>drogue</i> vertical n° 1 no primeiro canal da lagoa 2 (centro do atuador a 0,16 m de profundidade). Detalhe da trajetória de recirculação seguida por trajetória mais retilínea - teste do dia 04/04/15 no CePTS UFMG/COPASA.....	237
<b>FIGURA 5.30:</b> Representação gráfica das trajetórias executadas pelo <i>drogue</i> vertical n° 3 no primeiro canal da lagoa 2 (centro do atuador a 0,24 m de profundidade). Detalhe da trajetória de recirculação - teste do dia 04/04/15 no CePTS UFMG/COPASA. ....	238
<b>FIGURA 5.31:</b> Representação gráfica das trajetórias executadas pelo <i>drogue</i> vertical n° 3 no primeiro canal da lagoa 2 (centro do atuador a 0,24 m de profundidade). Detalhe da trajetória de recirculação seguida por trajetória mais retilínea - teste do dia 04/04/15 no CePTS UFMG/COPASA.....	239
<b>FIGURA 5.32:</b> Representação gráfica da trajetória executada pelo <i>drogue</i> vertical n° 3 no terceiro canal da lagoa 2 (centro do atuador a 0,24 de profundidade) - teste do dia 11/04/15 no CePTS UFMG/COPASA .....	240

<b>FIGURA 5.33:</b> Medições de velocidade com o molinete <i>Flow Rate Sensor Go!@Link</i> na entrada das lagoas durante a fase 2: <b>(a)</b> velocidades registradas a 10 cm da entrada da lagoa 1 e <b>(b)</b> velocidades registradas a 5 cm da entrada da lagoa 2 .....	241
<b>FIGURA 5.34:</b> Representação gráfica da velocidade medida na lagoa 1 no CePTS UFMG/COPASA – 09/10/2015 em cada um dos pontos de cada seção de medição. ....	240
<b>FIGURA 5.35:</b> Representação gráfica da velocidade medida na lagoa 1 no CePTS UFMG/COPASA – 13/04/2016 em cada um dos pontos de cada seção de medição .....	244
<b>FIGURA 5.36:</b> Representação gráfica da velocidade medida na lagoa 2, com chicanas, no CePTS UFMG/COPASA, em cada um dos pontos de cada seção de medição - 06/10/2015 .....	248
<b>FIGURA 5.37:</b> Representação gráfica da velocidade medida na lagoa 2, com chicanas, no CePTS UFMG/COPASA, em cada um dos pontos de cada seção de medição - 14/04/2016. ....	249
<b>FIGURA 5.38:</b> Representação gráfica dos vetores de velocidade na lagoa 1, no CePTS UFMG/COPASA, em cada um dos pontos de cada seção de medição, bem como as condições do vento durante o monitoramento - 09/10/2015.....	251
<b>FIGURA 5.39:</b> Representação gráfica dos vetores de velocidade na lagoa 2, fase 2, no CePTS UFMG/COPASA, em cada um dos pontos de cada seção de medição, bem como as condições do vento durante o monitoramento - 06/10/2015.....	252
<b>FIGURA 5.40:</b> Registros fotográficos em sequência temporal da aplicação do corante Rodamina na entrada da lagoa 1.....	254
<b>FIGURA 5.41:</b> Registros fotográficos em sequência temporal da aplicação do corante Uranina na entrada da lagoa 1, com destaque ao avanço do fluxo pelas laterais da lagoa	255
<b>FIGURA 5.42:</b> Registro fotográfico da aplicação do corante Uranina na entrada da lagoa 1, com destaque à zona de mistura no primeiro terço da lagoa .....	256
<b>FIGURA 5.43:</b> Registros fotográficos em sequência temporal da aplicação de corante em pontos próximos à saída da lagoa 1. ....	257
<b>FIGURA 5.44:</b> Registro fotográfico da aplicação de corante em ponto central da lagoa 1.	258
<b>FIGURA 5.45:</b> Registros fotográficos em sequência temporal da aplicação de corante na entrada da lagoa 2, fase 2 .....	259
<b>FIGURA 5.46:</b> Registro fotográfico em sequência temporal da aplicação de corante em uma das curvas das chicanas - CePTS UFMG/COPASA. Fenômenos observados em campo indicados nas figuras .....	260
<b>FIGURA 5.47:</b> Registro fotográfico em sequência temporal da aplicação de corante na lagoa 2 no CePTS UFMG/COPASA <b>(a)</b> e <b>(b)</b> tendências de seguir junto ao talude e parcelas de contrafluxo no 1º canal; <b>(c)</b> e <b>(d)</b> curva da primeira chicana. Fenômenos observados em campo indicados por setas nas figuras .....	261

<b>FIGURA 5.48:</b> Curvas concentração do traçador salino versus tempo obtidas nos ensaios realizados durante a fase 1 de operação. ....	263
<b>FIGURA 5.49:</b> Curvas concentração de traçador salino versus tempo obtidas nos ensaios realizados durante a fase 2 de operação. ....	264
<b>FIGURA 5.50:</b> Detalhe do local de fixação de uma das chicanas da lagoa 2 no talude .....	267
<b>FIGURA 5.51:</b> Curvas concentração de traçador fluorescente versus tempo obtidas nos ensaios realizados na lagoa 1 durante a fase 2 de operação.....	272
<b>FIGURA 5.52:</b> (a) Vista e perspectiva da geometria da lagoa 1 no modelo em CFD, considerando a geometria do lodo conforme batimetria e (b) vista com relação aos eixos de referência na origem do sistema cartesiano.....	276
<b>FIGURA 5.53:</b> (a) Vista superficial no plano XY da malha da lagoa 1 – lodo batimétrico - no modelo em CFD e (b) Vista isométrica de corte transversal em um plano XZ que passa pelo meio da lagoa. ....	277
<b>FIGURA 5.54:</b> Vista em perspectiva da geometria da lagoa 1 no modelo em CFD, considerando a geometria do lodo simplificada por formas geométricas.....	278
<b>FIGURA 5.55:</b> Vista superficial da malha da lagoa 1 – lodo geométrico - no plano XY, com destaque para refinamento nas regiões de entrada e saída (indicadas em vermelho). ....	278
<b>FIGURA 5.56:</b> (a) Vista em perspectiva da geometria da lagoa 2 – fase 1 - no modelo em CFD (b) detalhe da geometria do dispositivo de entrada. ....	280
<b>FIGURA 5.57:</b> Vista em perspectiva de parte da malha da lagoa 2 – fase 1 - no modelo em CFD. ....	281
<b>FIGURA 5.58:</b> (a) Vista em perspectiva da geometria da lagoa 2 - fase 2 - no modelo em CFD e (b) vista com relação aos eixos de referência na origem do sistema cartesiano.....	282
<b>FIGURA 5.59:</b> (a) Vista superficial no plano XY da malha da lagoa 2 - fase 2 - no modelo em CFD e (b) Vista em corte transversal, em um plano XZ que passa pelo meio da lagoa.....	283
<b>FIGURA 5.60:</b> Vista superficial dos vetores de velocidade na lagoa 1 no plano XY ( $Z = 0,75\text{m}$ ), considerando regime permanente, cenário base. Setas brancas maiores representam o comportamento médio do fluxo .....	285
<b>FIGURA 5.61:</b> Registro fotográfico da aplicação de corante (a) na entrada e (b) em ponto central da lagoa 1 .....	287
<b>FIGURA 5.62:</b> Exemplo de trajetórias executadas por <i>drogue</i> vertical na lagoa 1 (representação gráfica em sequência numérica e temporal).....	287
<b>FIGURA 5.63:</b> Vista superficial das linhas de fluxo com origem na entrada da lagoa 1, considerando regime permanente, cenário base .....	288
<b>FIGURA 5.64:</b> Registro fotográfico da aplicação de corante em pontos próximos à saída da lagoa 1.....	288

- FIGURA 5.65:** Vista superficial dos vetores de velocidade na lagoa 1 no plano XY ( $Z = 0,40\text{m}$ ) com destaque das zonas de recirculação. Regime permanente, cenário base ..... 289
- FIGURA 5.66:** Vista superficial dos vetores de velocidade na lagoa 1 **(a)** na superfície - plano XY ( $Z = 0,75\text{m}$ ) e **(b)** no meio - plano XY ( $Z = 0,40\text{m}$ ). Regime transiente, após 48h, cenário base ..... 291
- FIGURA 5.67:** Módulo da velocidade **(a)** em um ponto na saída da lagoa 1 e **(b)** no meio da lagoa 1, em um ponto na superfície ( $Z = 0,70\text{m}$ ; linha vermelha) e no fundo ( $Z = 0,35\text{m}$ ; linha vermelha). Regime transiente, cenário base ..... 292
- FIGURA 5.68:** Vista em perspectiva da lagoa 1 com indicação dos pontos de monitoramento de velocidade da FIG. X. Regime transiente, cenário base ..... 292
- FIGURA 5.69:** Vista superficial dos vetores de velocidade na lagoa 1 **(a)** na superfície - plano XY ( $Z = 0,75\text{m}$ ) e **(b)** No meio - plano XY ( $Z = 0,40\text{m}$ ). Regime transiente, após 48h, cenário com rugosidade de 20 mm atribuída ao lodo ..... 295
- FIGURA 5.70:** **(a)** Vista dos vetores de velocidade em plano transversal na lagoa 1 (plano XZ;  $Y = 12,5\text{m}$ ). Regime transiente, após 48h, vento constante – direção predominante e velocidade média. **(b)** Vista em corte ..... 297
- FIGURA 5.71:** Módulo da velocidade no meio da lagoa 1, em um ponto na superfície ( $Z = 0,70\text{m}$ ; linha vermelha) e no fundo ( $Z = 0,35\text{m}$ ; linha pontilhada em azul). Regime transiente, vento constante – direção predominante e velocidade média ..... 298
- FIGURA 5.72:** Evolução dos vetores de velocidade na superfície da lagoa ao longo do tempo (plano XY;  $Z = 0,75\text{m}$ ). Regime transiente, vento constante – direção predominante e velocidade média ..... 299
- FIGURA 5.73:** Vetores de velocidade na superfície da lagoa 1 ( $Z = 0,75\text{m}$ ) **(a)** às 12h e **(b)** às 21h do dia. Regime transiente, vento dinâmico ..... 303
- FIGURA 5.74:** Velocidade no meio da lagoa 1, nas direções x (no sentido da largura - linha pontilhada em azul) e y (no sentido do comprimento - linha contínua em vermelho) ao longo de um dia **(a)** em um ponto na superfície ( $Z = 0,70\text{m}$ ) e **(b)** em um ponto no fundo ( $Z = 0,35\text{m}$ ). Regime transiente, vento dinâmico ..... 304
- FIGURA 5.75:** Vista dos vetores de velocidade em plano transversal na lagoa 1 (plano XZ;  $Y = 12,5\text{m}$ ) **(a)** às 12:00h do dia, com vista de perspectiva e **(b)** e **(c)** às 21:00h do dia, com vista em perspectiva e em planta, respectivamente, dos mesmos vetores. Simulação em regime transiente, vento dinâmico. .... 306
- FIGURA 5.76:** Comparação teórica entre a energia fornecida ao fluido pelo jato de entrada e a energia fornecida ao fluido pela tensão de cisalhamento do vento ..... 307
- FIGURA 5.77:** Comparação entre o **(a)** registro fotográfico da mistura do corante na entrada da lagoa 1 com resultados do modelo em CFD **(b)** considerando o vento dinâmico e **(c)** transiente, sem vento ..... 308
- FIGURA 5.78:** Perfis verticais da temperatura em plano longitudinal na lagoa 1 (plano YZ;  $X = 3,25\text{m}$ ) obtidos via modelo em CFD **(a)** às 15:00h; correspondendo ao momento de maior

gradiente térmico e <b>(b)</b> às 21:00h; correspondendo ao momento da mistura vertical. Regime transiente com balanço térmico em condições dinâmicas .....	311
<b>FIGURA 5.79:</b> <b>(a)</b> vetores de velocidade no plano XY ( $Z=0,65\text{m}$ ) em momento de estratificação térmica e <b>(b)</b> vetores de velocidade no plano XY ( $Z=0,55\text{m}$ ) em momento de mistura vertical. Regime transiente com balanço térmico em condições dinâmicas.....	312
<b>FIGURA 5.80:</b> Comparação entre os dados de temperatura medidos na superfície e no fundo da lagoa 1 em campo durante ensaio de n° 15 (pontos) e os dados simulados em CFD com as mesmas condições (linhas contínuas). Regime transiente com balanço térmico em condições dinâmicas.....	314
<b>FIGURA 5.81:</b> Vetores de velocidade na lagoa 1 às 12:00h - plano XY longitudinal, com $Z = 0,50\text{ m}$ . Modelo transiente unificado .....	318
<b>FIGURA 5.82:</b> Vetores de velocidade na lagoa 1 às 21:00h - plano longitudinal no meio da lagoa (plano ZY, $X = 2,6\text{ m}$ ). Modelo transiente unificado .....	319
<b>FIGURA 5.83:</b> Vetores de velocidade na lagoa 1 às 21:00h - plano XY longitudinal, com <b>(a)</b> $Z = 0,65\text{ m}$ e <b>(b)</b> $Z = 0,30\text{ m}$ . Modelo transiente unificado.....	320
<b>FIGURA 5.84:</b> Comparação teórica entre a energia fornecida ao fluido pelo jato de entrada e a energia fornecida ao fluido pela tensão de cisalhamento do vento – modelo transiente unificado .....	322
<b>FIGURA 5.85:</b> Variação temporal das temperaturas na superfície (linha em verde) e fundo (linha roxa) da lagoa 1, obtidas pelo modelo unificado em CFD .....	322
<b>FIGURA 5.86:</b> Perfis verticais da temperatura em plano longitudinal na lagoa 1 (plano YZ; $X = 3,25\text{m}$ ) obtidos via modelo em CFD <b>(a)</b> às 16:00h; correspondendo ao momento de maior gradiente térmico e <b>(b)</b> às 07:00h; correspondendo a um momento com equalização da temperatura. Modelo transiente unificado .....	323
<b>FIGURA 5.87:</b> Perfis verticais da temperatura em plano transversal na lagoa 1 (plano XZ; $Y = 17\text{m}$ ) obtidos via modelo em CFD <b>(a)</b> às 16:00h; correspondendo ao momento de maior gradiente térmico e <b>(b)</b> às 07:00h; correspondendo a um momento com equalização da temperatura. Modelo transiente unificado .....	324
<b>FIGURA 5.88:</b> Comparação entre as concentrações efluentes do traçador salino no ensaio de campo de n° 2 e as concentrações efluentes do traçador virtual no modelo em CFD. Modelo transiente unificado .....	327
<b>FIGURA 5.89:</b> Evolução temporal da dispersão do traçador virtual em um plano XY próximo à superfície da lagoa 1 ( $z = 0,65\text{m}$ ): <b>(a)</b> no momento da injeção; <b>(b)</b> após 2h da injeção; <b>(c)</b> após 4h da injeção; <b>(d)</b> após 8h da injeção. Modelo transiente unificado.....	328
<b>FIGURA 5.90:</b> Comparação entre as concentrações efluentes do traçador fluorescente nos ensaios de campo de n° 1 e 2 e as concentrações efluentes do traçador virtual no modelo em CFD. Modelo transiente base.....	329
<b>FIGURA 5.91:</b> Comparação entre as concentrações efluentes do traçador virtual nos modelos da lagoa 1 com lodo geométrico e lodo batimétrico. Vazão na lagoa de $19\text{m}^3/\text{d}$ . Modelo transiente simplificado .....	331

<b>FIGURA 5.92:</b> Distribuição espacial dos vetores de velocidade no plano XY que corta o meio da lagoa 2 (em $z = 0,22$ m) – simulação em regime permanente após 10000 iterações do solver .....	333
<b>FIGURA 5.93:</b> Detalhe da distribuição espacial dos vetores de velocidade no plano XY que corta o meio da lagoa 2 (em $z = 0,22$ m), na região de entrada do fluido – simulação em regime permanente após 10000 iterações do solver.....	333
<b>FIGURA 5.94:</b> Detalhe da distribuição espacial dos vetores de velocidade no plano XY que corta o meio da lagoa 2 (em $z = 0,22$ m), no final da primeira chicana – simulação em regime permanente após 10000 iterações do solver. ....	334
<b>FIGURA 5.95:</b> Linhas de fluxo no plano XY que corta o meio da lagoa 2 (em $z = 0,22$ m), com as cores variando com o valor da velocidade – simulação em regime permanente após 10000 iterações do solver .....	334
<b>FIGURA 5.96:</b> Registro fotográfico de corante fluorescente na curva da primeira chicana da lagoa 2, com destaque para a zona de estagnação visualizada junto à parede da chicana.....	335
<b>FIGURA 5.97:</b> Comparação entre os resultados do fluxo próximo à entrada da lagoa 2 obtidos em CFD com resultados de ensaios de campo no mesmo local: <b>(a)</b> vetores de velocidade (CFD); <b>(b)</b> linhas de fluxo (CFD); <b>(c)</b> trajetória dos <i>drogues</i> verticais; <b>(d)</b> movimentação da pluma de corante; <b>(e)</b> vetores de velocidade em 5 pontos na seção L2S1. ....	336
<b>FIGURA 5.98:</b> Vista em planta das <b>(a)</b> linhas de fluxo tridimensionais na região de entrada do fluido na lagoa 2 e <b>(b)</b> da variação espacial da magnitude da velocidade, com as cores variando com o valor da velocidade no plano $z = 0,435$ m – simulação em regime permanente após 10000 iterações do solver.....	337
<b>FIGURA 5.99:</b> Detalhe em perspectiva das linhas de fluxo tridimensionais na região de entrada do fluido na lagoa 2, com as cores variando com o valor da velocidade – simulação em regime permanente após 10000 iterações do solver.....	337
<b>FIGURA 5.100:</b> Vista em corte longitudinal ( $x = 1,73$ m) da variação espacial da magnitude da velocidade na lagoa 2, com as cores variando com o valor da velocidade no plano que corta a tubulação de entrada – simulação em regime permanente após 10000 iterações do solver.....	338
<b>FIGURA 5.101:</b> Velocidade em uma linha reta ao longo do comprimento do primeiro canal, na metade da profundidade da lagoa 2 – fase 2 ( $z = 0,22$ m). ....	339
<b>FIGURA 5.102:</b> Velocidade aferida nas seções L2S1 <i>versus</i> medições com o ADV .....	339
<b>FIGURA 5.103:</b> Superfície de contorno com módulo da velocidade, vetores e linhas de fluxo em um plano XY longitudinal no meio da lagoa 2 ( $Z=0,22$ m) às 12:00h de um dia. Modelo transiente unificado .....	343
<b>FIGURA 5.104:</b> Superfície de contorno com módulo da velocidade, vetores e linhas de fluxo em um plano XY longitudinal no meio da lagoa 2 ( $Z=0,22$ m) às 00:00h de um dia. Modelo transiente unificado .....	344

<b>FIGURA 5.105:</b> Perfis verticais da temperatura em plano transversal na lagoa 2 chicaneada (plano XZ; Y = 12m) obtidos via modelo em CFD <b>(a)</b> às 15:00h; correspondendo ao momento de maior gradiente térmico e <b>(b)</b> às 05:00h; correspondendo a um momento com temperatura equalizada (lagoa desestratificada). Modelo transiente unificado.....	345
<b>FIGURA 5.106:</b> Temperatura em planos horizontais longitudinais na lagoa 2 chicaneada (plano XY) obtidas via modelo em CFD para as 15:00h; correspondendo ao momento de maior gradiente térmico, sendo <b>(a)</b> na superfície da lagoa (Z = 0,4m) e <b>(b)</b> no fundo da lagoa (Z = 0,05m).....	347
<b>FIGURA 5.107:</b> Comparação entre as concentrações efluentes do traçador salino no ensaio de campo de n° 6 e as concentrações efluentes do traçador virtual no modelo em CFD. Modelo unificado.....	348
<b>FIGURA 5.108:</b> Comparação entre as concentrações efluentes do traçador virtual na lagoa 2 nos casos de temperatura do jato de entrada constante e variável (de acordo com a temperatura da superfície da lagoa 1). Modelo unificado.....	349
<b>FIGURA 5.109:</b> Comparação entre os perfis verticais de temperatura no meio da lagoa durante momento de estratificação (12:00h). Modelo unificado com senóide e função step X Modelo unificado com equação adaptada da série de Fourier.....	350
<b>FIGURA 5.110:</b> Comparação entre as concentrações efluentes do traçador virtual nos modelos das lagoas na fase 1 - vazão nas lagoas de 19m <sup>3</sup> /d. Modelo transiente simplificado .....	352
<b>FIGURA 5.111:</b> Velocidade em planos horizontais longitudinais a 20cm de profundidade nas lagoas após 24h de simulação; sendo <b>(a)</b> vetores de velocidade e valores na lagoa 1, com lodo e <b>(b)</b> na lagoa 2, sem lodo.. .....	354
<b>FIGURA 5.112:</b> Velocidade em planos horizontais longitudinais a 20cm de profundidade nas lagoas após 24h de simulação; sendo <b>(a)</b> vetores de velocidade e valores na lagoa 1, com lodo e <b>(b)</b> na lagoa 2, sem lodo. ....	355
<b>FIGURA 5.113:</b> Comparação entre as concentrações efluentes do traçador virtual nos modelos da lagoa 2 na fase 1 - vazão de 19m <sup>3</sup> /d e pulso de traçador de 221 kg/m <sup>3</sup> . Modelo transiente simplificado . ....	358
<b>FIGURA 5.114:</b> Comparação entre as concentrações efluentes do traçador virtual nos modelos da lagoa 2 na fase 1 - vazão de 19m <sup>3</sup> /d e pulso de traçador de 221 kg/m <sup>3</sup> , com alteração da escala no eixo das ordenadas para destaque ao fenômeno de cauda. ....	359
<b>FIGURA 5.115:</b> Linhas de fluxo no plano horizontal da lagoa 2 em diferentes momentos do dia (06:00h, 12:00h, 18:00h) na simulação do cenário com configuração do jato de entrada na direção da saída.....	361
<b>FIGURA 5.116:</b> Comparação entre as concentrações efluentes do traçador virtual nos modelos da lagoa 2 na fase 2 - vazão de 31m <sup>3</sup> /d e pulso de traçador de 267 kg/m <sup>3</sup> . Modelo transiente simplificado . ....	362

## LISTA DE TABELAS

<b>TABELA 3.1</b> - Taxas de acúmulo de lodo em lagoas encontradas na literatura.....	13
<b>TABELA 3.2</b> - Graus de dispersão em unidades de tratamento de esgotos . <b>Erro! Indicador não definido.</b>	
<b>TABELA 3.3</b> - Compilação de trabalhos com uso de CFD em lagoas não mecanizadas com exposição sumária das principais características dos modelos e dos métodos utilizados ...	86
<b>TABELA 3.4</b> - Exposição sumária dos principais resultados obtidos e conclusões de trabalhos com uso de CFD em lagoas não mecanizadas .....	90
<b>TABELA 4.1</b> - Principais dimensões/características das lagoas de polimento do CePTS UFMG/COPASA durante as duas fases operacionais.....	122
<b>TABELA 4.2</b> – Variáveis medidas pela estação meteorológica instalada no CePTS UFMG/COPASA .....	131
<b>TABELA 4.3</b> - Resumo das condições de realização dos monitoramentos em perfil vertical nas lagoas do CePTS UFMG/COPASA.....	135
<b>TABELA 4.4</b> – Dimensões dos <i>drogues</i> verticais utilizados nas lagoas do CePTS UFMG/COPASA ..... <b>Erro! Indicador não definido.</b> .....	139
<b>TABELA 4.5</b> - Descrição das seções e pontos das medições com os molinetes <i>Global Water</i> e <i>Vernier</i> e com o medidor <i>ADV FlowTracker</i> – Lagoa 1 - CePTS UFMG/COPASA .....	142
<b>TABELA 4.6</b> - Descrição das seções (entre parênteses, a distância a partir do talude do início do canal) e pontos das medições com os molinetes <i>Global Water</i> e <i>Vernier</i> e com o medidor <i>ADV FlowTracker</i> – Lagoa 2 - CePTS UFMG/COPASA.....	143
<b>TABELA 4.7</b> – Resumo das condições de realização dos ensaios com traçador salino (cloreto de sódio) nas lagoas do CePTS UFMG/COPASA .....	151
<b>TABELA 4.8</b> – Resumo das condições gerais de realização dos ensaios com traçador fluorescente (uranina) nas lagoas do CePTS UFMG/COPASA.....	153
<b>TABELA 4.9</b> - Resumo das etapas da modelagem em CFD das unidades de tratamento no CePTS UFMG/COPASA .....	158
<b>TABELA 4.10</b> - Propriedades do fluido definidas para as simulações em CFD – abordagem de aproximação à água . .....	165
<b>TABELA 4.11</b> - Propriedades do fluido definidas para as simulações em CFD — abordagem de aproximação às características de águas residuárias e lagoas, de acordo com Stafford et al. (1981) e Peterson et al. (2000) .....	165
<b>TABELA 5.1</b> - Resumo dos valores médios/medianos (desvio padrão) das concentrações dos efluentes ao longo da linha de tratamento.....	192

<b>TABELA 5.2</b> - Eficiências de remoção (medianas) das unidades ao longo da linha de tratamento, bem como pontos intermediários na lagoa 2.....	193
<b>TABELA 5.3</b> - Resumo dos valores médios/medianos (desvio padrão) dos dados ambientais ao longo da linha de tratamento, bem como pontos intermediários na lagoa 2.....	193
<b>TABELA 5.4</b> - Estatística descritiva geral e medidas de dispersão dos dados registrados desde a data de instalação da estação para os parâmetros temperatura (em °C), umidade relativa (%), radiação solar (W/m <sup>2</sup> ), pressão atmosférica (bar) e velocidade do vento (m/s) .	197
<b>TABELA 5.5</b> - Estatística descritiva geral e medidas de dispersão dos dados registrados em cada mês para os parâmetros temperatura (em °C), velocidade do vento (m/s) e radiação solar (W/m <sup>2</sup> ).....	201
<b>TABELA 5.6</b> - Estatística descritiva geral e medidas de dispersão dos dados registrados em cada hora para os parâmetros temperatura (em °C), velocidade do vento (m/s) e radiação solar (W/m <sup>2</sup> ).....	205
<b>TABELA 5.7</b> – Velocidade média em cada ponto de medição e em cada campanha de monitoramento com o ADV <i>FlowTracker</i> – Lagoa 1 .....	243
<b>TABELA 5.8</b> - Velocidade média em cada ponto de medição e em cada campanha de monitoramento com o ADV <i>FlowTracker</i> – Lagoa 2, com chicanas .....	245
<b>TABELA 5.9:</b> Parâmetros hidráulicos obtidos com a realização dos ensaios de traçador salino nas lagoas do CePTS UFMG/COPASA.....	266
<b>TABELA 5.10</b> – Números de dispersão ( $d$ ) obtidos para as lagoas com base em equações de literatura e comparação com os obtidos com as curvas de traçador salino.....	266
<b>TABELA 5.11:</b> Parâmetros hidráulicos obtidos com a realização dos ensaios de traçador fluorescente nas lagoas do CePTS UFMG/COPASA.....	272
<b>TABELA 5.12</b> – Números de dispersão ( $d$ ) obtidos para as lagoas com base em equações de literatura e comparação com os obtidos com as curvas de traçador fluorescente.....	273
<b>TABELA 5.13</b> – Principais características da malha da lagoa 1 – lodo batimétrico - no modelo em CFD.....	277
<b>TABELA 5.14</b> – Principais características da malha da lagoa 1 – lodo geométrico - no modelo em CFD.....	279
<b>TABELA 5.15</b> – Principais características da malha da lagoa 2 – fase 1 - no modelo em CFD .....	281
<b>TABELA 5.16</b> – Principais características da malha da lagoa 2 - fase 2 - no modelo em CFD .....	283

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

a - aceleração

A – Área ou Amplitude de temperatura

AFMV – *Advancing Front Volume Mesher*

ADV - *Acoustic Doppler Velocimeter*

$C_i$  - Concentração do traçador no intervalo  $i$  de medição

$C_d$  - Constante empírica do vento

$C_\mu$  - Constante do modelo de turbulência

$C_{\varepsilon 1}$  - Constante do modelo de turbulência

$C_{\varepsilon 2}$  - Constante do modelo de turbulência

CFD – *Computational Fluid Dynamics*

CE – Condutividade Elétrica

*Courant* - Número de Courant

$d$  – Número de dispersão

$d_p$  - Diâmetro característico das partículas

D – Coeficiente de dispersão ou Derivada material ou Deslocamento vertical na onda

$D_\phi$  - Difusividade cinemática do traçador

DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio

DP – Desvio Padrão

DQO – Demanda Química de Oxigênio

DTR - Distribuição de Tempos de Residência

e – Pressão de vapor da superfície da lagoa ou Numero neperiano

$e_{amb}$  – Pressão de vapor do ambiente externo

ETE – Estação de Tratamento de Esgoto

$E_v$  - Eficiência volumétrica

Evap - Perdas de calor por evaporação

$f$  - Função que descreve a concentração mássica

F - Força

$F_1$  - Função acopladora

$F_2$  - Função que restringe as tensões cisalhantes turbulentas na camada limite

GPS - *Global Positioning System*

H - Profundidade

$h_{est}$  - Entalpia estática

$h_{tot}$  - Entalpia total

$h_s$  - Altura correspondente à rugosidade média

I - Irradiação solar

J - Fluxo mássico

$k$  - Energia cinética turbulência ou Número de onda

$k_{ms}$  - Coeficiente de rugosidade de Manning-Strickler

K - Coeficiente de Degradação de Matéria Orgânica

$K_b$  - Coeficiente de Decaimento Bacteriano

L/B - Relação Comprimento/Largura

L - Dimensão de comprimento

$L_s$  - Taxa de aplicação superficial

m - massa

M - Dimensão de massa

N - Número de tanques em série

$N_y$  - Número de tanques em série

$N_p$  - Número de tanques em série

NA – Nível de Água

NTK – Nitrogênio Total Kjeldahl

OD – Oxigênio Dissolvido

p – Pressão

$P_k$  - Produção de turbulência

$Pe$  - Número de Peclet

PEAD – Polietileno de Alta Densidade

pH – Potencial Hidrogeniônico

POR – Potencial de Oxirredução

PPT – Precipitação

PVC – Cloreto de Polivinila

Q – Vazão

$Q_{ent}$  - Fluxo de calor na entrada

$Q_{adv}$  - Fluxo de calor advectivo

$Q_{dif}$  - Fluxo de calor difusivo

$R_h$  - Umidade relativa local

Re – Número de Reynolds

S - Índice de curto-circuito ou Termo fonte ou Tensor de tensões médias absoluto

$Sc$  - Número de Schmidt

$Sc_t$  - Número de Schmidt turbulento

SS – Sólidos em Suspensão

SSed – Sólidos Sedimentáveis

SSF – Sólidos em Suspensão Fixos

SST – Sólidos em Suspensão Totais ou *Shear Stress Transport*

SSV – Sólidos em Suspensão Voláteis

ST – Sólidos Totais

$t_i$  - Tempo no intervalo  $i$  de medição

$t_{16}$  - Tempo de passagem do 16º percentil do traçador

T – Dimensão de tempo ou Temperatura

TAS – Taxa de Aplicação Superficial

TDH – Tempo de Detenção Hidráulica

$\overline{TDH}_{\Delta t}$  - Tempo médio de detenção baseado na discretização do intervalo de tempo (real)

Tracer – Variável de concentração do traçador

TS – Tanques em Série

$u$  - Componente  $x$  do vetor velocidade  $U$

U - Velocidade

UR – Umidade Relativa

USEPA – Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos

UTM – Sistema Universal Transverso de Mercator

UV – Ultravioleta

Uvent – Velocidade do Vento

$v$  - Componente  $y$  do vetor velocidade  $U$

V – Volume

$w$  - Componente  $x$  do vetor velocidade  $U$

$\beta$  - Coeficiente de dilatação térmica

$\delta$  - Matriz identidade (Delta de Kronecker)

$\tau$  - Tempo de detenção hidráulica teórico (volume/vazão) ou tensão de cisalhamento

$\Theta$  – Dimensão de temperatura

%R - Percentual de recuperação do traçador

$\phi$  - Índice de curto-circuito ou Mudança de fase da onda ou Fração em massa do traçador

$\Delta t_i$  - Incremento de tempo

$\sigma^2_\theta$  – Variância (adimensional)

$\gamma(t)$  – Distribuição Gama

$\Psi$  - Fração de zonas mortas

$\lambda$  - Eficiência hidráulica

$\rho$  – densidade

$\rho_{\text{ref}}$  – densidade de referência

$\dot{m}$  - fluxo mássico

$\eta$  - Coeficiente de Manning ou Vetor unitário normal à superfície

$\nu$  - Viscosidade cinemática

$\nu_t$  = Viscosidade cinemática turbulenta

$\mu$  - Viscosidade dinâmica

$\mu_t$  - Viscosidade turbulenta

$\mu_{\text{ef}}$  - Viscosidade efetiva

$\otimes$  - Produto tensorial

$\xi$  - Condutividade térmica

$\varepsilon$  - Dissipação de energia turbulenta

$\omega$  – Frequência dos turbilhões ou Frequência angular

$\sigma_k$  - Constante do modelo de turbulência

$\sigma_\varepsilon$  - Constante do modelo de turbulência

$\Phi$  - Concentração do traçador

$\Phi_1$  - Representa as constantes do modelo k- $\varepsilon$

$\Phi_2$  - Representa as constantes do modelo k- $\omega$

$\Gamma_t$  - Difusividade turbulenta

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contextualização

Segundo a Organização Mundial de Saúde (OMS), muito progresso foi conseguido na área de saneamento na última década. Cerca de 2,3 bilhões de pessoas passaram a ter acesso a água potável de melhor qualidade entre 1990-2012 e o número de crianças mortas por doenças diarreicas (que são fortemente associadas com deficiências no saneamento básico) reduziu substancialmente, de aproximadamente 1,5 milhão de óbitos em 1990 para pouco mais de 600 mil em 2012 (WHO, 2014). Entretanto, apesar das boas tendências mundiais, muito ainda deve ser feito para reduzir as desigualdades entre as populações. Segundo o mesmo relatório da OMS, 2,5 bilhões de pessoas não têm acesso a condições adequadas de saneamento, 1 bilhão de pessoas defecam a céu aberto (nove em cada dez nas zonas rurais), 748 milhões de pessoas não têm acesso a água potável de qualidade e estima-se que 1,8 bilhão de pessoas usam fontes de água potável contaminadas por fezes.

No Brasil, o último diagnóstico realizado pelo Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) apontou índice de atendimento da população total com rede de água de 82,7%, índice de atendimento da população total com rede de esgoto de 48,3 % e índice de tratamento dos esgotos gerados de 38,7% (SNIS, 2012). Observa-se que o pior índice está no tratamento de esgotos, urgindo, portanto, a correta condução de políticas públicas na busca da universalização, além de grandes investimentos em infraestrutura básica e pesquisas na área que possam auxiliar a seleção e otimização de métodos de tratamento.

A seleção de métodos para tratamento de esgotos na zona urbana ou rural não é tarefa fácil e envolve fatores diversos. A tecnologia considerada mais adequada usualmente será aquela que atende as exigências de eficiência do tratamento ou qualidade do efluente com o menor custo de implantação, operação e manutenção (ARAR, 1988). Nesse sentido, lagoas de estabilização e suas principais variantes (anaeróbias, facultativas, de maturação, de polimento) constituem solução bastante conveniente para tratamento de esgotos em locais cuja disponibilidade de área não é fator limitante, principalmente em países em desenvolvimento, visto que são conceitualmente simples e de reduzidos custos de implantação, operação e manutenção. Por serem sistemas naturais, cuja principal fonte de energia (força motriz) é a luz do sol, são ainda mais atrativas em países de clima tropical (MARA *et al.*, 1992; MAYO, 1995; SENZIA *et al.*, 2002; ALVARADO, 2013; DIAS *et al.*, 2017).

As lagoas de maturação são variantes dos sistemas de lagoas e têm como principal objetivo a remoção de organismos patogênicos através de processos naturais, mas também promovem uma remoção complementar de matéria orgânica e nutrientes, possibilitando que o efluente seja elegível para irrigação agrícola (SANTOS, 2009). Quando lagoas de maturação tratam o efluente de um reator anaeróbio, como um reator anaeróbio de manta de lodo e fluxo ascendente (UASB), são consideradas como fase de polimento no tratamento de águas residuárias, sendo, por esse motivo, comumente chamadas de lagoas de polimento (VON SPERLING, 2007).

Apesar da simplicidade conceitual, quando se leva em consideração os processos bioquímicos, bem como as reações que ocorrem no fluido e as interações com o ambiente externo, as lagoas se tornam ambientes extremamente complexos. Do ponto de vista hidráulico, as definições de projeto devem ser tais que permitam resultar em um tempo de detenção hidráulica (TDH) conhecido e suficiente para que as reações biológicas ocorram a partir de um modelo cinético definido para as reações. Portanto, trata-se de um conceito também relativamente simples. Entretanto, essas premissas são apenas teóricas e podem ocultar fenômenos de curtos-circuitos, zonas de estagnação e de troca lenta, linhas de fluxo com recirculação, dispersão, estratificação térmica, influência do vento e do lodo acumulado, entre outros, que tornam o TDH real e o comportamento hidrodinâmico diferentes dos teóricos, podendo resultar na redução das eficiências de tratamento. No caso das lagoas de maturação ou polimento, por serem dimensionadas principalmente para remoção de patógenos (VON SPERLING, 2007), a exemplo de ovos de helmintos, vírus e bactérias, o TDH pode ter ainda maior influência na eficiência.

A inferência sobre a presença de alguns desses fatores hidrodinâmicos e a sua quantificação (a exemplo do curto-circuito, grau de dispersão e zonas de estagnação) é possível por meio da técnica estímulo-resposta com o uso de traçadores. Essa é a técnica adotada na grande maioria das pesquisas em lagoas (MANGELSON e WATTERS, 1972; RACAULT *et al.* (1984); CHAPPLE (1985); MACDONALD e ERNST (1986); MARECOS DO MONTE e MARA (1987); MORENO (1990); ULUATAM e KURUM (1992); PEDAHZUR *et al.* (1993); FREDRICK e LLOYD (1996); WOOD (1997); SALTER (1999); BRISSAUD *et al.* (2000); SHILTON *et al.* (2000); VORKAS e LLOYD (2000); ALDANA *et al.* (2005); SHORT *et al.* (2010); ALVARADO *et al.* (2012a)). Já a influência de fenômenos como estratificação térmica, mistura vertical, ação do vento, turbulência, presença do lodo e linhas de recirculação

é mais bem descrita com análise de outros dados de campo (tais como medições no perfil vertical da lagoa, uso de *drogues*, dados meteorológicos etc.) e com uso de modelos matemáticos e ferramentas computacionais mais avançadas de análise de fluxo, sendo a *Computational Fluid Dynamics* (CFD) um excelente exemplo e de crescente aplicação na área. De qualquer forma, o conhecimento do real comportamento hidrodinâmico é fundamental para a adequada operação de lagoas, intervenções para melhoria de eficiência em unidades existentes e para contínuo avanço na área de projetos e modelos de dimensionamento.

A Fluidodinâmica Computacional ou Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD – *Computational Fluid Dynamics*) é uma ferramenta matemática e computacional empregada para prever ou analisar fenômenos físicos ou físico-químicos que ocorrem em escoamentos de fluidos dentro de um volume pré-definido, ou fora dele, e que podem ser relacionados com a ação de fatores como dispersão, difusão, convecção, interação com o ambiente externo, condições de contorno e turbulência. Desde a introdução por Wood *et al.* (1995) do potencial dos modelos em CFD para previsão dos padrões de fluxo em lagoas, o interesse na utilização dessa ferramenta na modelagem desses sistemas tem crescido, especialmente em aplicações práticas (ALVARADO *et al.*, 2012b). Neste sentido, há um certo número de estudos que descrevem a utilidade de modelos em CFD para a melhoria de projetos e avaliação hidrodinâmica (WOOD *et al.*, 1998; PETERSON *et al.*, 2000; SHILTON, 2000; VEGA *et al.*, 2003; KARTERIS *et al.*, 2005; SHILTON e MARA, 2005; SWEENEY *et al.*, 2005; ALVARADO *et al.*, 2012a; ALVARADO *et al.*, 2012b; ALVARADO *et al.*, 2013; PASSOS *et al.*, 2016; COGGINS *et al.*, 2017; entre outros).

Sah *et al.* (2012) realizaram compilação e análise de diversos estudos envolvendo modelagem numérica de lagoas, incluindo 13 estudos com uso da ferramenta CFD. No trabalho desses autores ficaram evidenciadas as lacunas atuais na modelagem de lagoas, recomendando direções para trabalhos futuros. Após extensa revisão de literatura na área como parte deste trabalho, foi possível observar que as principais necessidades de avanço e lacunas existentes dizem respeito ao desenvolvimento de modelos tridimensionais; à calibração e validação de modelos com dados experimentais (SAH *et al.*, 2012; SHILTON *et al.*, 2008); à consideração da distribuição espacial do lodo acumulado na geometria dos modelo; à integração entre o modelo hidráulico e os processos bioquímicos que ocorrem na lagoa (SAH *et al.*, 2012) e quanto à consideração do efeito do vento e estratificação térmica no comportamento do fluxo.

Em discussão mais recente, Laurent *et al.* (2014) sugerem um protocolo para uso de CFD como ferramenta de suporte para modelagem de sistemas de tratamento de esgoto e melhoria dos modelos tradicionais. Por tal perspectiva, modelos em CFD não seriam substitutos dos modelos mais simplificados, e sim utilizados para apontar possíveis deficiências nesses, com a tentativa de contribuir com o desenvolvimento de novos modelos (chamados pelos autores de “modelos da próxima geração”).

Diante do exposto, propõe-se neste trabalho a realização de estudos hidrodinâmicos em lagoas de polimento rasas dimensionadas para o atendimento de pequenas comunidades. Os estudos tiveram como base modelos matemáticos, modelos tridimensionais em CFD e ensaios de campo. A pesquisa foi desenvolvida no Centro de Pesquisa e Treinamento em Saneamento UFMG/COPASA (CePTS), em Belo Horizonte – MG. O centro experimental está inserido na ETE Arrudas, operada pela Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA), que recebe e trata a maior parcela do esgoto gerado na cidade. Ressalta-se que, desde o início de operação, as lagoas passaram por diferentes arranjos e condições operacionais (funcionamento em série ou paralelo; com ou sem chicanas; diferentes tempos de detenção hidráulica, vazão afluente e profundidades), sendo que esta pesquisa compreende duas dessas fases.

Buscou-se considerar nos modelos e estudos desenvolvidos como parte deste trabalho as lacunas existentes na literatura, tais como as mencionadas por Sah *et al.* (2012) e sugeridas por Laurent *et al.* (2014). Por fim, um modelo CFD unificado tridimensional e dinâmico das lagoas foi proposto, incluindo os fatores intervenientes no desempenho desses sistemas.

O fato de se tratar de lagoas de polimento rasas não anula a possibilidade de extensão de vários resultados desta pesquisa para outras tipologias e escalas, visto que os mecanismos hidrodinâmicos são similares e não se alterariam significativamente quanto aos aspectos pesquisados se a lagoa em análise recebesse esgoto após outro tipo de tratamento, ao invés do reator UASB. Portanto, espera-se que informações importantes para melhor compreensão do comportamento hidrodinâmico de lagoas sejam apresentadas, auxiliando assim as avaliações e diagnósticos de unidades existentes, melhorias de projetos, intervenções operacionais para melhoria da eficiência e possíveis sugestões de avanços nos estudos e na modelagem desses sistemas. Naturalmente, os resultados estão associados predominantemente às condições climáticas prevalentes no local.

## **1.2 Organização da Tese**

A presente introdução compõe o primeiro capítulo de um total de oito que estruturam este documento. O segundo capítulo consiste em revisão da literatura sobre o tema proposto, iniciando pela apresentação de conceitos de lagoas e suas variantes, geração de lodo e suas características de acúmulo; passando por aspectos hidrodinâmicos de interesse nesses sistemas e finalizando com os principais métodos de avaliação hidrodinâmica. Foi dado especial enfoque ao estado da arte da modelagem de lagoas em CFD. Os objetivos do trabalho são apresentados no terceiro capítulo. Material e métodos são apresentados no capítulo quatro, com a descrição do local de desenvolvimento da pesquisa e das unidades em estudo; descrição dos métodos de monitoramento e análises de campo e descrição dos métodos de modelagem hidrodinâmica. Nos capítulos cinco e seis são apresentados, respectivamente, os resultados e discussão e as principais conclusões da pesquisa. Ressalta-se que no capítulo cinco, um item contendo uma síntese conclusiva e pontos mais relevantes dos resultados segue apresentado no final de cada tópico. No capítulo sete são apresentadas as recomendações e direcionamentos para pesquisas futuras, partindo de pontos menos explorados ou de sugestões de avanço no tema da pesquisa. O último capítulo apresenta a relação das referências utilizadas na tese.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 Lagoas de estabilização: o que são e por que utilizá-las

De acordo com Mara (2004), as lagoas de estabilização são grandes unidades construídas com diques de terra nas quais o esgoto é depurado por processos puramente naturais que envolvem algas e bactérias. O tratamento de esgotos por lagoas de estabilização depende muito do clima, uma vez que os processos biológicos são, em grande parte, afetados pela temperatura e radiação solar (VON SPERLING, 2007). São também sistemas conceitualmente simples e de reduzidos custos de implantação, operação e manutenção, podendo ser utilizados no tratamento de esgotos em pequenas comunidades rurais, cidades e até mesmo indústrias.

Esses sistemas geralmente atingem eficiências de remoção de DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio) entre 75 a 85% (VON SPERLING e CHERNICHARO, 2005). O tratamento por meio de lagoas também fornece uma alta remoção de agentes patogênicos, em comparação com outros métodos de tratamento (KAYOMBO *et al.*, 2004), já que, por exemplo, 100% dos ovos de helmintos podem ser removidos (ARCEIVALA, 1981; JORDÃO e PESSÔA, 2011; VON SPERLING e CHERNICHARO, 2005) e até cinco (VON SPERLING e CHERNICHARO, 2005) ou seis (JORDÃO e PESSÔA, 2011) unidades log de remoção de coliformes termotolerantes podem ser conseguidos, dependendo da tipologia e quantidade de lagoas em série. No entanto, o efluente das lagoas pode apresentar elevados teores de DBO e sólidos suspensos (SS), principalmente devido à presença de algas.

Com exceção das lagoas aeradas (que contam com aeração mecânica), as lagoas de estabilização dependem de processos naturais mais lentos, portanto, demandam TDH e áreas geralmente superior à dos demais sistemas de tratamento. Apesar desses requisitos, o investimento em parcelas extensas de terra (que podem se valorizar ao longo do tempo), é claramente mais vantajoso em comparação com os recursos dispendidos com energia elétrica para operação de sistemas eletromecânicos, que nunca poderão ser recuperados (MARA, 2009; PEÑA e MARA, 2004).

Os fatores acima mencionados tornam a tecnologia bastante atrativa, especialmente para países em desenvolvimento e de clima tropical.

## 2.2 Variantes de lagoas

A rigor, as terminologias “lagoas de estabilização” ou “lagoas de oxidação” se referem apenas às unidades destinadas a estabilizar ou oxidar a matéria orgânica; portanto, se aplicariam às lagoas anaeróbias e facultativas e não se aplicariam às lagoas de maturação ou polimento. Entretanto, há registros na literatura nas quais essas lagoas, e demais variantes, são incluídas, de forma mais genérica, também como “lagoas de estabilização”.

Kellner e Pires (1998) classificam como lagoas de estabilização as lagoas anaeróbias, facultativas e de maturação.

De forma mais abrangente, Jordão e Pessôa (2011) classificam as lagoas de estabilização como:

- *anaeróbias*: nas quais predominam processos de fermentação anaeróbia; imediatamente abaixo da superfície não existe oxigênio dissolvido;
- *facultativas*: nas quais ocorrem, simultaneamente, processos de fermentação anaeróbia, oxidação aeróbia e redução fotossintética; uma zona anaeróbia de atividade bêntica é sobreposta por uma zona aeróbia de atividade biológica, próxima à superfície. As lagoas facultativas são chamadas *primárias*, quando recebem esgoto bruto, e *secundárias* quando recebem o efluente de outra lagoa, em geral anaeróbia;
- *estritamente aeróbias*: nas quais se chega a um equilíbrio da oxidação e da fotossíntese para garantir condições aeróbias em todo meio;
- *de maturação*: têm como objetivo principal remover organismos patogênicos; reduz bactérias, vírus, cistos de protozoários e ovos de helmintos; a parcela de redução de sólidos em suspensão e da DBO é negligenciável;
- *de polimento*: têm como objetivo principal o refinamento de outro processo biológico, em particular de um reator anaeróbio de fluxo ascendente (UASB), objetivando uma remoção adicional de DBO, nutrientes e organismos patogênicos;

- *aeradas*: nas quais se introduz o oxigênio no meio líquido através de um sistema mecânico de aeração; as lagoas aeradas podem ser estritamente aeradas ou aeradas facultativas. As lagoas aeradas de mistura completa devem ser seguidas de uma lagoa de sedimentação; e

- *com macrófitas*: usadas como polimento final de um tratamento por lagoas, com objetivo de reduzir nutrientes, sólidos em suspensão e a DBO remanescente. Várias experiências práticas indicam também a redução de metais. Este tipo de lagoa requer manutenção intensiva (corte regular das plantas que crescem rapidamente, secagem e destino final), e as áreas sombreadas incentivam a proliferação de moscas e mosquitos, razões pelas quais não é recomendável.

Uehara e Vidal (1989) apresentam a classificação “lagoas aeróbias”, com a seguinte definição: “lagoas rasas que permitem a penetração de luz em toda a sua profundidade. As lagoas aeróbias de alta taxa têm profundidade de 0,30m a 0,50m e são misturadas mecanicamente de modo a expor todas as algas a luz solar, evitando assim o desenvolvimento de uma camada de lodo ao fundo. São projetadas e operadas para maximizar a produção de algas”.

Com relação às lagoas facultativas e às lagoas de maturação ou polimento, pode-se consolidar o entendimento que as primeiras são concebidas para remoção de DBO e as segundas para remoção de patógenos. Nesse sentido, pode-se afirmar que as lagoas de estabilização facultativas cumprem o papel de atendimento de proteção ambiental, enquanto as lagoas de maturação/polimento visam à proteção da saúde pública (JORDÃO e PESSÔA, 2011).

### **2.3 Lagoas de polimento**

Segundo Campos (1999) e Von Sperling (2007), os sistemas anaeróbios de tratamento de esgotos cresceram em popularidade e alcance em países tropicais, como o Brasil. Dentre estes processos, destacam-se os reatores anaeróbios de manta de lodo de fluxo ascendente (reatores UASB), que consistem, com poucas variações, em unidades anaeróbias de escoamento ascendente, composta de uma zona de digestão, zona de sedimentação e dispositivo separador de fases gás-sólido-líquido (separador trifásico).

Os sistemas anaeróbios atingem uma eficiência na remoção de DBO na faixa de 60 - 80%, considerada boa quando se leva em consideração os baixos tempos de detenção, a

simplicidade do processo e a inexistência de equipamentos. Porém, tal eficiência pode não ser compatível com os padrões exigidos na legislação ou com a qualidade desejada para o efluente final, trazendo a necessidade do pós-tratamento de seu efluente, seja para remoção de nutrientes ou organismos patogênicos ou mesmo para remoção adicional de DBO (VON SPERLING, 2007). A seleção do pós-tratamento depende da qualidade desejada para o efluente, assim como das normas estabelecidas pelos padrões de lançamento. A utilização de um tratamento anaeróbio seguido de pós-tratamento propicia uma boa relação custo-benefício (KUJAWA-ROELEVELD e ZEEMAN, 2006).

Nesse sentido, uma alternativa de pós-tratamento bastante atraente é representada pelas lagoas de estabilização, pelo fato de se manter em todo o sistema a simplicidade conceitual já assumida para os reatores anaeróbios. Acredita-se que a combinação de reatores UASB com lagoas de estabilização apresenta aplicabilidade extremamente ampla para países em desenvolvimento e de clima quente (VON SPERLING, 2007; KHAN *et al.*, 2011; OLIVEIRA e VON SPERLING, 2011). Além de aumento da eficiência, Von Sperling (2007) destaca que a combinação entre reatores UASB e lagoas também reduz consideravelmente o requisito de área, comparado com sistemas que utilizam somente lagoas. Para diferenciar das concepções clássicas das lagoas facultativas e de maturação, as lagoas não mecanizadas que recebem o efluente de reatores anaeróbios têm sido designadas na literatura de lagoas de polimento.

De acordo com Catunda *et al.* (1994) e Cavalcanti *et al.* (2001b), o efluente anaeróbio pode ser lançado diretamente em lagoas de polimento em série ou com chicanas, sem preocupações de gerar problemas de sobrecarga orgânica na primeira lagoa da série ou no primeiro compartimento da lagoa com chicaneada, visto que haverá a remoção prévia de matéria orgânica nos reatores anaeróbios. Tomando por base essa premissa, as evidências atualmente disponíveis sugerem que as lagoas de polimento não necessitam ser dimensionadas como lagoas facultativas clássicas (para remoção de matéria orgânica), mas sim como lagoas de maturação (planejadas para remoção de patógenos), no que diz respeito à configuração geométrica, TDH e profundidade (VON SPERLING, 2007).

Autores citam profundidades usuais em lagoas de maturação de 0,8 a 1,0 m (VON SPERLING, 2007); de 0,6 a 1,5 m (JORDÃO e PESSÔA, 2011); de 1,0 m (GLOYNA, 1971) e 1,0 a 1,5 m (KELLNER e PIRES, 1998). Para o TDH, Kellner e Pires (1998) e Jordão e Pessôa (2011) sugerem 7 dias e Mara (1996) *apud* Von Sperling (2007) recomenda o mínimo

de 3 dias em cada lagoa, de modo a evitar curtos-circuitos e varrimento de algas. Ainda, Jordão e Pessoa (2011) recomendam relação geométrica comprimento/largura de pelo menos 3/1, que pode ser conseguida facilmente com uso de chicanas. Dessa forma, projetos de lagoas de polimento também devem seguir tais recomendações.

Devido a essas baixas profundidades praticadas em lagoas de polimento, um ambiente ideal é criado para o decaimento bacteriano, principalmente devido às altas concentrações de oxigênio dissolvido (OD), níveis de pH elevado ( $> 8,5$ ) e grande exposição à radiação ultravioleta proveniente da radiação solar (VON SPERLING, 2007). Dias *et al.* (2014, 2017) demonstraram ser possível obter excelentes resultados em termos de remoção de *E. coli* e nitrogênio total praticando profundidades mais rasas, de 0,40 a 0,80 m (especialmente na configuração de menor profundidade), em um sistema composto por um reator UASB seguido por três lagoas de polimento em série e com a inserção de um filtro grosseiro no último terço da terceira lagoa. A remoção de matéria orgânica e sólidos suspensos foi considerada satisfatória no trabalho dos autores. De fato, Von Sperling (2007) afirma que pesquisas têm demonstrado grandes vantagens em termos de eficiência ao se utilizar lagoas com profundidades inferiores a 0,80m.

O regime hidráulico das lagoas de polimento tem uma grande influência na remoção de coliformes. Todos os fatores que afetam a mortalidade bacteriana (radiação solar, predação, ações físico-químicas, presença de bacteriófagos, toxicidade de algas e de outras bactérias, utilização de nutrientes) estão representados pela constante de decaimento  $K_b$ , que deve ser função do regime hidráulico (JORDÃO e PESSÔA, 2011). Na medida em que a mortalidade dos organismos patogênicos (bactérias e vírus), bem como dos coliformes, segue uma cinética de primeira ordem (de maneira similar à estabilização de DBO nos sistemas de lagoas, que também segue uma cinética de primeira ordem), espera-se que, quanto mais próximo do regime idealizado de fluxo em pistão a lagoa está, mais eficiente será na remoção de patógenos. Portanto, de forma a se obter as elevadíssimas eficiências requeridas, é necessária a adoção de células em série ou de um reator de fluxo em pistão (VON SPERLING, 2007).

Von Sperling *et al.* (2005), em estudo de cinco sistemas de lagoas de polimento em quatro localidades brasileiras, observaram que lagoas de polimento rasas são mais eficientes na remoção de coliformes, mesmo operadas com tempos de detenção hidráulica curtos. Isso foi explicado pelo fato de o  $K_b$  ser maior em lagoas mais rasas. Os autores observaram uma

relação aproximadamente inversa entre a profundidade e o decaimento bacteriano. Esse resultado corrobora que esforços de elevar o TDH aumentando também a profundidade não contribuem para a maior desativação de micro-organismos (aumento de  $K_b$ ), uma vez que maiores profundidades reduzem o  $K_b$ . Assim, para aumentar o  $K_b$  é necessário que se aumente a área de superfície, para que menores profundidades sejam mantidas (POSSMOSER-NASCIMENTO, 2014).

Cavalcanti (2003), avaliando a influência da profundidade no decaimento de coliformes termotolerantes, também observou uma relação inversamente proporcional entre a profundidade e o  $K_b$ , constatando que o tempo de detenção hidráulica mais longo em lagoas mais profundas compensa as taxas mais baixas de decaimento bacteriano. O mesmo autor estabeleceu que, para sistemas em regiões tropicais, três dias de TDH são suficientes para redução de DBO, SST e ovos de helmintos para níveis aceitáveis pela legislação, enquanto para uma remoção de coliformes termotolerantes é necessário um TDH de 10 dias. Segundo o autor, esse tempo de detenção mais elevado é necessário devido a imperfeições no regime de escoamento das lagoas. As lagoas são projetadas para operarem com um regime de fluxo em pistão, mas na realidade ocorrem desvios dessa idealidade, ocorrendo misturas, aumentando o número de dispersão e causando consideráveis frações de volumes mortos. Como consequência, o decaimento exponencial de coliformes termotolerantes, tal como esperado, não é observado. Notas a respeito dos regimes hidráulicos e modelos cinéticos em lagoas serão apresentadas em tópico posterior.

Soares *et al.* (2000) avaliaram a remoção de matéria orgânica e patógenos para um sistema de lagoas pós UASB com diferentes relações comprimento/largura (L/B): uma lagoa com chicanas (12,5/1 e 32/1) e uma lagoa sem chicanas (2/1). Os sistemas operavam com TDH de 8 dias e profundidade de 1 metro. A lagoa chicaneada com comprimento/largura 12,5/1 teve remoção de *E. coli* e coliformes totais ligeiramente superior (2,7 unidades log removidas) em relação à lagoa sem chicanas (L/B = 2/1), com remoção de 2,5 unidades log. A remoção global de ovos de helmintos foi de 99,9%. As concentrações médias de DBO e DQO no efluente foram semelhantes nas lagoas com chicanas e sem chicanas.

## **2.4 Geração e características de acúmulo do lodo em lagoas**

Denomina-se lodo o material que se deposita no fundo das lagoas de estabilização ao longo dos anos de funcionamento, sendo constituído por compostos inorgânicos, areia, compostos orgânicos aportados pelo esgoto, microrganismos (bactérias e algas), e subprodutos da atividade dos microrganismos (CAVALCANTI *et al.*, 2002; GONÇALVES, 1999; VON SPERLING, 2007).

Apesar da grande aceitação das lagoas de estabilização para tratamento de esgotos no Brasil, pouca importância tem sido dada ao gerenciamento do lodo gerado nesses sistemas. Tal assertiva se comprova por enquête nacional realizada pela Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) em 1997, tendo sido constatado que cerca de 90% das lagoas de um total de 36 estações de tratamento de esgotos (ETEs) brasileiras nunca tinham recebido remoção do lodo (GONÇALVES, 1999). Entretanto, sabe-se que existe estreita relação entre a qualidade do efluente de um sistema de lagoas e o lodo acumulado nas unidades; seja pela possível saída de sólidos provenientes do lodo sedimentado com o efluente, seja pela perda de volume útil da lagoa, com diminuição do tempo de detenção hidráulica (TDH) real e eventual implicação na eficiência do tratamento. Dentre outras hipóteses, tais considerações evidenciam a grande importância de se conhecer a dinâmica da formação de lodo em lagoas.

A taxa de acúmulo média de lodo em lagoas facultativas é da ordem de apenas 0,03 a 0,08 m<sup>3</sup>/hab.ano (ARCEIVALA, 1981). Nelson *et al.* (2004), avaliando lagoas de estabilização primárias no México, obtiveram valores médios de 0,021 a 0,036 m<sup>3</sup>/hab.ano. Gonçalves *et al.* (1997), pesquisando uma lagoa facultativa primária no estado do Espírito Santo, obteve taxa de acúmulo de 0,07 L/hab.dia (0,023 m<sup>3</sup>/hab.ano), resultante da formação de camada de lodo com altura média de 26,7 cm em 18 anos de operação. De forma geral, taxas registradas na literatura variam de 0,004 a 0,4 m<sup>3</sup>/hab.ano para esgoto doméstico (GLOYNA, 1973; SILVA e MARA, 1979; ARCEIVALA, 1981; DA-RIN e NASCIMENTO, 1988; MENDONÇA, 1990; GONÇALVES *et al.*, 1997; BRITO *et al.*, 1999; CAVALCANTI *et al.*, 2002; NELSON *et al.*, 2004; PASSOS *et al.*, 2014b; PICOT *et al.*, 2005; D'CASTRO FILHO *et al.*, 2005; ALVARADO *et al.*, 2012a; BOUZA-DEAÑO e SALAS-RODRÍGUEZ, 2013; POSSMOSER-NASCIMENTO *et al.*, 2014), sendo os menores valores comumente registrados em lagoas de maturação/polimento e os maiores valores em lagoas anaeróbias ou facultativas primárias. A TAB. 3.1 apresenta sumário com referências de taxa de acúmulo e seus valores.

**TABELA 3.1 – Taxas de acúmulo de lodo em lagoas encontradas na literatura.**

<b>Referência</b>	<b>Taxa de acúmulo (m<sup>3</sup>/hab.ano)</b>	<b>Observações</b>
Nelson <i>et al.</i> (2004)	0,022	Anaeróbia primária
Nelson <i>et al.</i> (2004)	0,036	Facultativa primária
Nelson <i>et al.</i> (2004)	0,021	Facultativa primária
D'Castro Filho <i>et al.</i> (2005)	0,018	Polimento
Gonçalves <i>et al.</i> (1997b)	0,023	Facultativa primária
Arceivala (1981)	0,03 a 0,08	Facultativas
Cavalcanti <i>et al.</i> (2002)	0,028	Polimento
Da-Rin e Nascimento (1988)	0,036	Facultativa primária
Brito <i>et al.</i> (1999)	0,04	Polimento
Gloyna (1973)	0,12	Anaeróbias e facultativas primárias
Picot <i>et al.</i> (2005)	0,04 a 0,148	Facultativas
Alvarado <i>et al.</i> (2012a)	0,026 a 0,030	Facultativa
Bouza-Deaño e Salas-Rodríguez (2013)	0,011	Anaeróbia
Bouza-Deaño e Salas-Rodríguez (2013)	0,027	Facultativa
Bouza-Deaño e Salas-Rodríguez (2013)	0,015	Maturação 1
Bouza-Deaño e Salas-Rodríguez (2013)	0,009	Maturação 2
Passos <i>et al.</i> (2014b)	0,0071	Facultativa primária
Passos <i>et al.</i> (2012)	0,00017	Maturação
Possmoser-Nascimento <i>et al.</i> (2014)	0,020	Polimento 1
Possmoser-Nascimento <i>et al.</i> (2014)	0,004	Polimento 2
Coggins <i>et al.</i> (2017)	0,23	Facultativa primária
Coggins <i>et al.</i> (2017)	0,24	Facultativa primária

O volume ocupado pela camada de lodo e sua distribuição espacial podem ser determinados por meio de estudo batimétrico na lagoa, que pode ser realizado mediante o uso de diferentes tipos de equipamentos. Gonçalves (1999) cita o uso de equipamentos eletrônicos - ecobatímetros, pHmetros e medidores de teores de sólidos em suspensão - e dispositivos de medição direta, como hastes graduadas; esses últimos de baixo custo, fácil montagem e utilização e de resultados satisfatórios, tal como registrado nos trabalhos de Gonçalves *et al.* (1997), Passos *et al.* (2012), Passos *et al.* (2014b), Possmoser-Nascimento *et al.* (2013) e Possmoser-Nascimento *et al.* (2014). Coggins *et al.* (2017) utilizaram um barco de controle remoto, adaptado e equipado com sonar, GPS e software, para registro dos dados batimétricos em lagoas. Para os casos onde não é possível ou viável a estimativa de volume por meio de

aferição direta, métodos empíricos podem ser utilizados, com a cautela de se observar as condições para as quais os métodos podem ser aplicados. Oakley et al. (2005), por exemplo, apresentam uma equação empírica para estimativa do volume anual de lodo esperado ( $V_L$ , em  $m^3/\text{ano}$ ):

$$V_L = 0,00156 \times Q \times SS \quad (3.1)$$

onde:

$Q$  = vazão afluente média ( $m^3/d$ )

$SS$  = sólidos em suspensão do afluente ( $mg/L$ )

A literatura indica que a acumulação de lodo em lagoas não é uniforme em toda a área, sendo que, em geral, a altura e as características do lodo acumulado variam de acordo com a geometria da unidade, o posicionamento das estruturas de entrada e de saída e as condições do fluxo (PASSOS *et al.*, 2014b; VON SPERLING, 2007). Entretanto, a maioria dos relatos sobre a distribuição espacial da camada de lodo em lagoas anaeróbias ou facultativas primárias sugere maior acúmulo nas proximidades dos dispositivos de entrada e saída da lagoa, sendo que nas outras regiões da lagoa a camada geralmente apresenta-se homogênea, com a interface sólido – líquido em cotas pouco variáveis (GONÇALVES, 1999). Peña *et al.* (2000) observaram a forte influência da geometria e do posicionamento relativo das entradas e saídas nos padrões de deposição lodo em duas lagoas anaeróbias na Colômbia. Nelson *et al.* (2004) estudaram três lagoas facultativas em grande escala no México, e descobriram que o maior acúmulo ocorreu perto da entrada única e em alguns dos cantos (zonas mortas). Abis e Mara (2005), Alvarado *et al.* (2012) e Picot *et al.* (2005) relataram comportamentos semelhantes, com acúmulo em torno da área da entrada, em três lagoas em escala piloto no Reino Unido, em 19 lagoas facultativas primárias na França e em lagoa facultativa no Equador, respectivamente. Passos *et al.* (2014b), investigando a distribuição de lodo em uma lagoa facultativa, observaram a grande influência da má divisão do afluente entre duas tubulações de entrada, sendo que a maior parte do lodo se acumulava na lateral que recebia uma maior fração dos esgotos.

Em lagoas de polimento, D'Castro Filho *et al.* (2005) atribuíram a maior sedimentação na região da entrada às características dos dispositivos de entrada e saída e à grande concentração de sólidos sedimentáveis presentes no afluente. Possmoser-Nascimento *et al.*

(2014) registraram maiores acúmulos próximos às estruturas de entrada e saída únicas, com distribuição irregular da camada de lodo.

Padrões de acúmulo de lodo em lagoas, portanto, são influenciados principalmente pelo perfil hidrodinâmico (ALVARADO *et al.*, 2012a), que é determinado em grande parcela pela geometria da lagoa e estruturas de entrada e saída. Por sua vez, o acúmulo excessivo de lodo afeta o desempenho hidráulico, já que causa redução do volume útil, aumento de curto-circuitos e recirculação, reduzindo, portanto, a eficiência do tratamento (ABIS e MARA, 2005). Uma boa compreensão do funcionamento hidrodinâmico de lagoas é fundamental para avaliar um possível interferência do lodo acumulado na eficiência, ou como auxiliar na definição de estratégias de remoção (PASSOS *et al.*, 2014b).

Vega *et al.* (2003) sugeriram o impacto do elevado acúmulo de lodo (50% do volume) sobre o campo de velocidade em uma lagoa anaeróbia. Este cenário proporcionou a ocorrência de um jato de entrada diretamente para a saída (efeito canal), com velocidade média de  $2,8 \times 10^{-3}$  m/s na zona central e de  $1,8 \times 10^{-3}$  m/s nas zonas laterais. Um acúmulo de lodo na faixa de 20% do volume da lagoa produziu uma distribuição mais uniforme da velocidade ( $3,0 \times 10^{-3}$  e  $2,3 \times 10^{-3}$  m/s na zona central e nas laterais, respectivamente), mas com valores ligeiramente mais elevados. Em um cenário da lagoa sem lodo houve uma distribuição uniforme de velocidade em toda a lagoa, mas com maiores valores (de  $4,0 \times 10^{-3}$  m/s, em ambas as regiões). Esta tendência aparentemente contraditória, de se obter velocidades mais elevadas em cenários de menores acúmulos de lodos, foi atribuída pelos autores ao fato de o coeficiente de rugosidade na lagoa ser menor na ausência do lodo. Assim, um menor atrito permitia um fluxo mais rápido.

Nesses cenários simulados no estudo de Vega *et al.* (2003), a redução na parcela de lodo acumulado foi também acompanhada pelo aumento da eficiência volumétrica ( $TDH_{\text{real}} / TDH_{\text{teórico}}$ ), de 0,64 para 0,69 e 0,74; e pelo aumento da eficiência de remoção de DBO, de 39, 45 a 56%; respectivamente para os cenários de 50%, 20% e sem lodo acumulado.

## **2.5 Hidrodinâmica de lagoas**

De acordo com Persson (2000), fatores que influenciam o desempenho hidrodinâmico em lagoas têm sido abordados na literatura e estão principalmente relacionados com a forma

geométrica, incluindo chicanas (MANGELSON e WATTERS, 1972; THACKSTON *et al.*, 1987); topografia; vegetação; fluxo (ADAMSSON *et al.*, 1999; MANGELSON e WATTERS, 1972); localização das entradas e saídas (MANGELSON e WATTERS, 1972; TA e BRIGNAL, 1998); vento (SHAW *et al.*, 1997; SHILTON, 2001; SHILTON e HARRISON 2003b; SWEENEY, 2004); e temperatura (KELLNER *et al.*, 2009; KELLNER e PIRES, 2002; MARECOS DE MONTE e MARA, 1987; TORRES *et al.*, 1997). Outros esforços de pesquisa têm focado na definição da eficiência hidráulica (PERSSON *et al.*, 1999; PERSSON, 2000). Várias pesquisas têm sido realizadas para avaliar o desempenho de lagoas no tratamento de efluentes, e a hidrodinâmica foi identificada como fator crucial na predição da eficiência nesses sistemas.

Diversos aspectos relativos à hidrodinâmica de lagoas têm sido estudados, incluindo medições, modelos numéricos e análises de efeitos individuais e inter-relacionadas de fatores (ALVARADO *et al.*, 2011; FERRARA e HARLEMAN, 1981; PEARSON *et al.*, 1995; SAH *et al.*, 2011; SHILTON, 2001; SHILTON e HARRISON, 2003c; SWEENEY, 2004; VEGA *et al.*, 2003; WATTERS *et al.*, 1973). Todos esses trabalhos comprovaram a importância da hidrodinâmica e impulsionaram o atual conhecimento a respeito de lagoas.

Apesar de diversos estudos terem sido desenvolvidos ao longo do tempo, ainda existem questões a serem elucidadas. A influência dos fatores ambientais, tais como a radiação solar e o vento; os processos biológicos e a hidrodinâmica, ainda não foram totalmente analisados ou não conseguiram ser validados com dados experimentais (WICHERN *et al.*, 2011).

Shilton e Harrison (2003b) e Shilton (2005) destacam a importância do conhecimento do comportamento hidrodinâmico de lagoas de estabilização para compreensão dos fenômenos que ocorrem dentro das unidades e a influência desse na eficiência de remoção de poluentes. De acordo com esses autores, os seguintes fatores são intervenientes e merecem consideração em projetos e avaliações hidráulicas:

- Vazão: maiores vazões aumentam a quantidade de movimento do fluxo de entrada;
- Diâmetro de entrada: entradas menores aumentam a velocidade na região de entrada e assim também a quantidade de movimento na entrada;

- Posição da entrada e sua orientação: definem a forma como a quantidade de movimento de entrada é introduzida no corpo d'água e, portanto, a influência no padrão de fluxo principal;
- Posição de saída: define a distância a partir da entrada e, portanto, o tempo para o fluxo de curto-circuito alcançar a saída;
- Geometria da lagoa e chicanas: forte influência sobre os padrões de fluxo e definem o grau de "canalização" (*channelling*);
- Efeitos da temperatura/densidade: podem influenciar no grau de canalização e circulação do fluxo principal;
- Cisalhamento do vento: velocidades de vento mais elevadas e maiores áreas de superfície da lagoa aumentam a quantidade de movimento introduzida e, como resultado, influenciam o padrão de fluxo principal;
- Aeradores mecânicos: se presentes, constituem uma contribuição significativa de quantidade de movimento e, como resultado, podem ter uma forte influência sobre o padrão de fluxo principal.

Pode-se notar a partir desta listagem que há duas subdivisões principais dos fatores intervenientes na hidrodinâmica das lagoas: configuração geométrica lagoa e definições de projeto e fatores ambientais externos. Ademais, além dos fatores acima elencados, a avaliação hidrodinâmica de lagoas passa pela definição do modelo de escoamento hidráulico que mais se adequa ao sistema ou unidade, bem como do grau de dispersão e turbulência. Os tópicos seguintes versarão a respeito desses principais fatores.

## **2.5.1 Geometria da lagoa**

### 2.5.1.1 Profundidade

A influência da profundidade da lagoa para sua eficiência de tratamento é devido, principalmente, à relação com a atenuação dos raios solares, pelos quais o decaimento bacteriano é diretamente afetado, principalmente em lagoas de polimento ou maturação. É geralmente aceito que o decaimento bacteriano é mais rápido em lagoas rasas do que em lagoas profundas (TOMS *et al.*, 1975; VON SPERLING, 2007). A profundidade é geralmente contabilizada em modelos para determinação empírica do coeficiente de decaimento bacteriano ( $K_b$ ) de lagoas.

A suscetibilidade hidrodinâmica da lagoa às influências do ambiente externo pode, dentre outros fatores, ser relacionada à profundidade. Observa-se que maiores profundidades tendem a reduzir a influência do vento no volume total da lagoa, visto que a ação da tensão cisalhante vai reduzindo ao longo da profundidade. Portanto, lagoas mais rasas são mais propensas à indução da circulação vertical pelo efeito do vento que lagoas de maiores profundidades. Com relação à estratificação térmica, lagoas de maiores profundidades tendem a permanecer por mais tempo estratificadas.

A profundidade também influencia no grau médio de turbulência da lagoa (visto que têm relação com o número de Reynolds) e no TDH do sistema (por ter relação direta com o volume da unidade).

#### 2.5.1.2 Relação comprimento/largura (L/B)

A relação entre o comprimento e a largura é geralmente visto como o fator geométrico mais importante que influencia a hidrodinâmica de lagoas (PERSSON, 2000). Diversos pesquisadores reportam esta mesma assertiva em seus trabalhos, além de recomendarem diferentes razões entre essas duas dimensões para atingir um reduzido grau de mistura e curto-circuito (WATSON e HOBSON, 1989; WPCF, 1990; CRITES, 1994). Thackston *et al.* (1987), por exemplo, recomendam a razão L/B de 5-10:1, enquanto Reed *et al.* (1995) recomendam a faixa de 1-4:1, para um sistema bem projetado (faixas notavelmente diferentes).

As recomendações para razões L/B elevadas são geralmente suportadas na ideia de se aproximar ao fluxo pistonado, conduzindo a movimentação do fluido ao longo da lagoa com perfil de velocidade predominantemente uniforme, e com todos os elementos de fluido permanecendo na unidade em um tempo bem próximo do TDH teórico. Entretanto, segundo Shilton (2005), a suposição tradicional de que em uma lagoa estreita o fluido simplesmente flui de forma lenta, com fluxo pistonado, de uma extremidade para a outra, não é necessariamente correta. Em experimentos com chicanas, Shilton e Harrison (2003) observaram que o comportamento do fluxo quando a lagoa possuía relação comprimento/largura em torno de 4:1 era caracterizado por uma série de células de circulação, se tornando mais “canalizado” (em fluxo pistonado) em razões L/B superiores a 10:1.

Quando Mangelson e Watters (1972) e Watters *et al.* (1973) realizaram o primeiro estudo hidrodinâmico em lagoas nos EUA, eles apontaram a relação L/B como tendo maior

influência no desempenho geral das lagoas que a profundidade ou as configurações de entrada e saída. As lagoas tinham relações L/B variando entre 1,6 e 2,3, e a eficiência hidráulica média ( $\lambda$ , que diz respeito à relação entre o tempo correspondente ao pico de traçador e o TDH teórico) de 0,58; obtida após ensaios com traçadores. Os autores também realizaram testes em uma lagoa em escala laboratorial com L/B = 2. Para o modelo sem chicanas,  $\lambda$  variou entre 0,52 e 0,64. Quando chicanas foram utilizadas para alterar a relação L/B, a eficiência hidráulica foi aumentada para 0,72 (com L/B= 5,26) e para 0,93 (com L/B = 13).

Thackston *et al.* (1987) relataram pesquisa realizada em lagoas para tratamento de material contaminado resultante de dragagem. A maioria das lagoas apresentava formato retangular, com L/B variando entre 0,7 e 4,1. Os autores realizaram análise de regressão com base nos dados de traçadores existentes para as lagoas que apresentaram eficiência hidráulica entre 25% e 100%, chegando à Equação 3.2:

$$\lambda = 0,9 \left[ 1 - e^{\left( -0,3 \frac{L}{B} \right)} \right] \quad (n = 7, R^2 = 0,61) \quad (3.2)$$

Onde  $\lambda$  é a eficiência hidráulica (-), L representa o comprimento da lagoa (m) e B a sua largura (m).

Tendo em vista a faixa limitada de L/B para a qual é válida essa equação, Thackston *et al.* (1987) utilizaram os dados de Mangelson e Watters (1972), Watters *et al.* (1973) e Marske e Boyle (1973) e modificaram a Equação 3.2 para a Equação 3.3:

$$\lambda = 0,84 \left[ 1 - e^{\left( -0,59 \frac{L}{B} \right)} \right] \quad (n = 38, R^2 = 0,80) \quad (3.3)$$

A equação sugere que, quanto maior a relação L/B, maior a eficiência hidráulica, mas até certo ponto (por ser uma exponencial). Por outro lado, em estudos com lagoas experimentais aqui no Brasil, Pearson *et al.* (1995) chegaram à conclusão de que o aumento da razão L/B de lagoas facultativas dentro da faixa de 1:1 a 6:1 não resulta em ganho significativo para o desempenho da lagoa ou melhoria da qualidade do efluente, tanto em termos de variáveis físico-químicas (como a DBO), quanto em termos microbiológicos (como coliformes).

Entretanto ressalta-se que, no caso da avaliação da DBO, não se levou em conta a separação entre DBO particulada (que não depende do regime hidráulico) e DBO solúvel no efluente, o que pode conduzir a interpretações equivocadas.

Na mesma linha, Persson *et al.* (1999) e Persson (2000) estudaram 13 lagoas hipotéticas por meio de modelagem numérica, quatro das quais foram utilizadas para inferências a respeito do efeito de L/B em  $\lambda$ . Eles também apresentaram revisão com dados publicados e tabelaram parâmetros hidrodinâmicos para diversos valores de L/B: índice de curto-circuito (S) (TA e BRIGNAL, 1998) e eficiência volumétrica ( $E_v$ ), definidos como (equações 3.4 e 3.5):

$$S = \frac{t_{16}}{t_{50}} \quad (3.4)$$

$$E_v = \frac{\bar{t}}{\tau} \quad (3.5)$$

onde:

$S$  = índice de curto-circuito (-)

$E_v$  = eficiência volumétrica (-)

$\bar{t}$  = tempo de detenção hidráulica real (d)

$\tau$  = tempo de detenção hidráulica teórico = volume/vazão (d)

$t_{16}$  = tempo de passagem do 16° percentil do fluido na saída (d)

$t_{50}$  = tempo de passagem do 50° percentil do fluido na saída (d)

O valor do 16° percentil foi proposto por Ta e Brignal (1998) em conjunto com o 84° como medidas do desvio do fluxo em pistão da curva de distribuição dos tempos de residência, de forma que a metade da diferença entre eles dividida pelo 50° percentil resultaria em um desvio que foi utilizado para medir a eficiência de pistonamento. A partir da mesma distribuição e análise dos desvios, a relação entre os 16° e o 50° percentis (o índice S) forneceria uma medida de curto-circuito. Menores valores de S correspondem a maior presença de curtos-circuitos na lagoa. Já a eficiência volumétrica indica o volume efetivamente ocupado pelo fluxo principal.

Segundo os trabalhos mencionados nas lagoas com base nesses parâmetros, os efeitos de curtos-circuitos reduzem (ou seja, aumento de  $S$ ) e a eficiência volumétrica aumenta à medida que a relação  $L/B$  aumenta.

A partir de estudos em lagoas de laboratório e em campo, Shilton e Harrison (2003b) observaram que relações de comprimento/largura ( $L/B$ ) de 1:1 e 2:1 tendem a promover um fluxo circular ao longo da circunferência da lagoa, caso uma entrada horizontal esteja posicionada em um dos cantos. Entretanto, em testes de laboratório com uma lagoa de  $L/B = 3$ , foi observado que, quando a entrada estava alinhada com o ponto de saída, o comportamento hidrodinâmico mudava consideravelmente. Segundo os autores, o fluxo se movia ao longo da lagoa em até aproximadamente um terço do seu comprimento e então retornava em contracorrente de forma bastante acentuada pelo meio da lagoa, como se um defletor invisível estivesse no local. Segundo Shilton (2005), a razão para esse fenômeno é que, como a lagoa se tornou mais estreita, há a possibilidade de surgimento de células de circulação em contracorrente com mais ou menos o diâmetro da largura da lagoa; e uma série dessas células pode realmente atuar de forma efetiva. De acordo com o autor, mais pesquisas são necessárias para melhor definir tal efeito antes de ser recomendado como técnica de projeto. Ademais, a formação de células de recirculação também está relacionada a outros fatores, como a atuação do vento e do jato de entrada.

Pouquíssimas referências não estão de acordo com a grande influência da relação  $L/B$  sobre a hidrodinâmica.

### 2.5.1.3 Dispositivos de entrada e saída

A importância das estruturas de entrada e de saída para a hidrodinâmica e eficiência de tratamento de lagoas vem sendo compreendida ao longo do tempo. Em estudos iniciais, Mangelson e Watters (1972) e Watters *et al.* (1973) investigaram uma variedade de configurações de entrada e de saída (diâmetros, tipos, localização). Os autores sugeriram que essas estruturas afetam a eficiência hidráulica, mas tal influência seria menos significativa em comparação com a relação comprimento/largura da lagoa. Em contraposição a essa linha de pensamento, Pearson *et al.* (1995), estudando um complexo com 17 lagoas experimentais, afirmaram que o posicionamento e a configuração das entradas e saídas podem ter maior impacto benéfico na eficiência de tratamento da lagoa do que o formato geométrico (relação  $L/B$ ). Também Wood (1997), Persson (2000); Shilton (2001); Shilton e Harrison (2003b)

sugeriram que a posição de entrada e sua relação com a saída são mais importantes do que se pensava anteriormente.

Persson (2000) relata que as lagoas com os dispositivos de entrada e saída posicionados em cantos diagonalmente opostos da lagoa, ou opostas umas às outras ao longo do eixo longitudinal central da lagoa, apresentaram desempenho hidráulico semelhante. Nesse estudo, curtos-circuitos foram observados sempre quando a entrada e a saída eram próximos. A lagoa com uma entrada prevista ao longo de toda a largura apresentou o melhor desempenho hidrodinâmico, com menor índice de curto-circuito e maior eficiência volumétrica, dentre as configurações estudadas quanto a essa variável (tais conclusões foram tiradas desconsiderando a interferência dos ventos). Shilton e Harrison (2003b) testaram em laboratório um dispositivo de entrada ao longo da largura da lagoa com difusores igualmente espaçados e relataram melhoria hidráulica na lagoa, comparado ao caso de entrada simples. Entretanto, segundo os autores, a melhoria não foi tão significativa quanto o esperado e que há de se considerar os custos e as questões práticas ao se comparar com outras opções.

No trabalho de Vega *et al.* (2003), utilizando fluidodinâmica computacional (CFD), arranjos de entrada e saída foram simulados de acordo com a situação de campo (dispositivos alinhados na linha central longitudinal da lagoa) e também em cantos diagonalmente opostos. Os valores de velocidade média foram distribuídos mais uniformemente ao longo da lagoa (formato quadrado) nos casos em que os dispositivos de entrada e saída estavam localizados em cantos diagonalmente opostos. As velocidades médias foram de  $10 \times 10^{-3}$  m/s na zona central e  $5,8 \times 10^{-3}$  m/s nas zonas laterais da lagoa com dispositivos alinhados e de  $2,6 \times 10^{-3}$  m/s na zona central e  $2,8 \times 10^{-3}$  m/s nas zonas laterais da lagoa com dispositivos diagonalmente opostos.

De acordo com Shilton (2005), é comum o pensamento de que a entrada em uma lagoa, geralmente de pequenas dimensões, terá pequena influência no fluxo de um sistema de tão grande volume. Nesse sentido, apesar do efeito de jato provocado pelo dispositivo de entrada em uma lagoa ser local, ele proporciona uma fonte de quantidade de movimento em uma direção fixa e para um ponto fixo. Esta quantidade de movimento é transferida para a massa volumétrica da lagoa e assim passa a guiar o fluxo principal (SHILTON, 2000; SHILTON, 2005). As condições de fluxo originadas por essa força motriz dependem em grande parte da magnitude, locação e orientação dessa fonte de quantidade de movimento (SHILTON, 2005).

Para fins de redução do efeito de jato, o uso de dispositivos de entrada horizontais de maior diâmetro foi avaliado por Shilton (2001) e Shilton e Harrison (2003b). Os autores concluíram que, apesar da redução da velocidade no fluxo principal, o padrão de fluxo na lagoa permaneceu o mesmo; de forma que o curto-circuito foi atrasado, mas o efeito líquido na melhoria da eficiência de tratamento foi insignificante.

Os mesmo autores avaliaram entradas com descarga de efluente na direção vertical, obtendo resultados diversos (funcionando bem em alguns casos e em outros não). Problemas ocorriam quando, ao ser lançado em direção vertical, o traçador passava a se mover ao longo de duas plumas de fluxo adjacentes às paredes. A partir de tais estudos, sugeriu-se a provisão de pequenos defletores locados nas paredes, de forma a bloquear esse fluxo e promover um espalhamento já na entrada. Tal abordagem foi testada tanto em laboratório quanto via modelagem computacional, com obtenção de excelentes resultados em ambos os casos. Entretanto, entradas na direção vertical podem favorecer o acúmulo de lodo nessas proximidades.

Agunwamba (2006) apresentou um estudo focando apenas na posição vertical de entradas e saídas. O estudo foi realizado através de um modelo em escala 1:20 de uma lagoa. Ao comparar quantitativamente o índice de curto-circuito ( $S$ ), o autor observou que o caso em que a entrada estava localizada na parte inferior e a saída na superfície da lagoa apresentou o menor grau de curto-circuitos. Dessa forma, sugeriu que a entrada e a saída devem ser locadas tão longe uma da outra quanto possível, para criar um caminho de fluxo longo e garantir uma utilização máxima do volume da lagoa. O estudo também mostrou que a implantação de entradas e saídas no mesmo nível resultou no maior grau de curtos-circuitos. O autor ressaltou que tais conclusões dizem respeito às condições experimentais em vigor. Mais especificamente, que o afluyente tinha a mesma densidade que o fluido na lagoa. Além disso, ressaltou que fatores como a estratificação vertical podem alterar o efeito das entradas e saídas na eficiência das lagoas (e esses fatores não foram considerados no estudo). O índice de curto-circuitos revelou aumentar tanto com o número de dispersão quanto com a velocidade real do fluxo, com coeficientes de correlação de 0,319 a 0,926 e de 0,806 a 0,997, respectivamente.

Trabalhos de laboratórios e modelagem com lagoas têm indicado que em lagoas com padrões de recirculação de fluxo guiados pelo dispositivo de entrada, o dispositivo de saída tem

apenas uma influência local, e sua relocação não altera o fluxo principal. Dessa forma, há de se pensar que a otimização em projetos pode ser feita principalmente por meio da locação do dispositivo de entrada em conjunção com a forma geométrica ou inserção de defletores.

#### 2.5.1.4 Defletores e chicanas

Defletores e chicanas são comumente utilizados como técnica para melhoria hidráulica e de eficiência de lagoas. Na literatura internacional não há uma distinção clara quanto aos dois termos utilizados, de forma que dispositivos inseridos nas lagoas com o intuito de desviar o fluxo são comumente chamados de “*baffle*”, sejam essas estruturas fixas, removíveis, longitudinais, transversais etc. Já na literatura nacional é mais comum nomear de “chicanas” as estruturas mais perenes ou fixas, geralmente incorporadas na construção da lagoa e como parte da sua geometria, e de “defletores” as estruturas menores, de utilização em pontos específicos das lagoas e geralmente removíveis. Este tópico de revisão, por considerar predominantemente referências internacionais, trata essas estruturas como sinônimos.

Em casos em que o fluxo principal é determinado pelo dispositivo de entrada, as chicanas podem ser utilizadas para otimizar o fluxo. Para lagoas com comportamento hidráulico ditado predominantemente pelo vento, chicanas podem ser utilizadas para reduzir curtos-circuitos que podem ocorrer sob certas condições de vento (SHILTON, 2005).

A melhoria significativa da eficiência de tratamento de lagoas proposta pela instalação de defletores pode levar à impressão de que seria errado não prover esses dispositivos em lagoas facultativas e de maturação (MARA, 2009). Shilton e Mara (2005) salientaram que certamente há grande potencial de significativa otimização de custos mediante a inclusão inteligente de defletores em lagoas facultativas e de maturação em países tropicais. No entanto, as dimensões e a orientação desses dispositivos dentro de uma lagoa requerem avaliação cuidadosa.

Watters *et al.* (1973) foram pioneiros no estudo dos efeitos do chicaneamento sobre o comportamento hidrodinâmico de lagoas. Os autores examinaram o comprimento e o espaçamento ótimo de defletores, com comprimentos de 50%, 70% e 90% da largura e espaçamento de 1/3, 1/5 e 1/7 a 1/9 do comprimento da lagoa. De acordo com o estudo, na situação dos defletores sendo a metade da largura do tanque, a eficiência hidráulica máxima pode ser conseguida utilizando seis defletores (uma relação de espaçamento de 1/7) na lagoa, sendo que mais do que seis (uma relação de espaçamento menor que 1/7) causaria curto-

circuito por meio do centro da lagoa, portanto, diminuindo a eficiência hidráulica. Este fenômeno foi contornado quando aumentou-se o comprimento das chicanas. No entanto, estendendo-se o comprimento da chicana a 90% em toda a largura da lagoa, criou-se um percurso de fluxo muito estreito nas curvas, acompanhado de aumento da velocidade do fluxo, redução do TDH real e, conseqüentemente, da sua eficiência hidráulica. Concluiu-se nesse estudo que um espaçamento de 1/7 do comprimento da lagoa com um comprimento de chicana de 70% da largura da lagoa é a configuração mais favorável para chicaneamento no sentido transversal.

Experimentos também foram conduzidos nesse estudo para comparar o efeito de defletores verticais e também longitudinais. A provisão de chicanas na horizontal pareceu ser mais eficiente do que no regime vertical para um mesmo número de defletores, e tanto o chicaneamento no sentido transversal quanto no sentido longitudinal apresentaram essencialmente os mesmos resultados. Quanto a este último ponto, nota-se que foi objeto deste experimento uma lagoa com entradas múltiplas, de forma que, caso fosse entrada simples, se esperaria que o chicaneamento no sentido transversal fosse mais eficiente (já que reduziria o efeito de jato da entrada).

Pedahzur *et al.* (1993) investigaram os efeitos de defletores em uma lagoa examinando não só o padrão de fluxo hidrodinâmico, mas também a qualidade da água, constatando que a instalação de quatro defletores ou mais não conseguiu melhorar a eficiência de tratamento na lagoa em termos microbiológicos e de DBO. Entretanto, no caso da DBO, é prudente ressaltar que a análise não foi feita considerando a separação entre DBO particulada (que não depende do regime hidráulico) e DBO solúvel no efluente, o que pode conduzir a interpretações de desempenho equivocadas quanto a este parâmetro.

Por meio do exame dos perfis de velocidade em lagoa chicaneada, Shilton e Harrison (2003b) descobriram que, uma vez que a quantidade de movimento de entrada é redirecionada e dissipada após interação com o compartimento inicial do defletor, o comprimento restante da chicana passa a contribuir pouco. Isto sugere uma economia significativa em termos de custos de implantação. Quanto ao número, um modelo de defletor único não apresentou resultados tão bons quanto de dois defletores. Quatro defletores forneceram melhoria adicional, mas o acréscimo no número de defletores além deste número foi considerado desnecessário, uma vez que foi observada apenas pequena melhoria na eficiência do tratamento.

Resultados da modelagem em CFD de uma lagoa anaeróbia, realizada por Vega *et al.* (2003), mostraram que os dispositivos de entrada e saída em posições diagonalmente opostas e uma relação L/B de 2:1, com acréscimo de dois defletores transversais em 1/3 e 2/3 do comprimento, foram as medidas mais eficazes para melhoria do desempenho hidrodinâmico e do padrão de dispersão da lagoa.

Abbas *et al.* (2006) estudaram a influência da geometria na eficiência de lagoa por meio de modelagem computacional em CFD, e relataram que lagoas retangulares com relação comprimento/largura de 4:1 e com dois ou quatro defletores apresentam as características mais eficazes para a melhoria da hidrodinâmica e da eficiência de remoção global de DBO. Oliveira *et al.* (2011) investigaram o efeito conjunto de chicanas e entradas/saídas verticais configuradas em diferentes profundidades. Os autores concluíram que o chicaneamento longitudinal de uma lagoa facultativa primária, em combinação com entradas e saídas na vertical, não melhoraram significativamente o desempenho da lagoa. Ressalta-se que, uma vez que esses estudos foram desenvolvidos em situações restritas, a interpretação dos resultados pode conduzir a enganos, quando aplicada a outros cenários.

### **2.5.2 Modelos teóricos de escoamento e cinética de reação (lagoa como reatores)**

O modelo hidrodinâmico de uma lagoa pode ser descrito em função do tipo de fluxo e do padrão de mistura na unidade. O padrão de mistura depende da forma geométrica do reator, quantidade de energia introduzida por unidade de volume, tamanho ou escala da unidade e outros fatores. Há dois modelos hidráulicos básicos, idealizados, a partir dos quais derivam outras alternativas. Esses modelos são os de *fluxo em pistão* e de *mistura completa* e a partir de tais os reatores podem ser caracterizados como de *fluxo em pistão*, *mistura completa*, *fluxo disperso* ou *arranjos de células em séries e/ou paralelo*. Quanto ao padrão de fluxo, esse pode ser intermitente, com entrada e saída do líquido de modo descontínua, contínuo, com entrada e saída de líquido de forma ininterrupta (VON SPERLING, 2007), em estado estacionário (vazão constante) ou variável.

Os modelos de fluxo em pistão e mistura completa são modelos idealizados e extremos quanto à descrição do grau de mistura. No modelo de *fluxo em pistão*, as partículas do fluido entram continuamente em uma extremidade do reator, passam através do mesmo, e saem na outra extremidade, na mesma sequência em que entram. O fluxo se processa como um êmbolo ou pistão, sem misturas longitudinais e as partículas permanecem no reator por um período

igual ao tempo de detenção hidráulica (LEVENSPIEL, 2000; METCALF e EDDY, 2003; TCHOBANOGLIOUS e SCHROEDER, 1985; VON SPERLING e CHERNICHARO, 2005). Em teoria, este tipo de fluxo tende a ser reproduzido em lagoas longas ou com chicanas longitudinais, com elevada relação comprimento largura, na qual a dispersão longitudinal também tende a ser mínima. Já no regime de *mistura completa*, na definição dos mesmos autores, as partículas que adentram o reator são imediatamente e uniformemente dispersas em todo o volume, saindo da unidade em proporção à sua distribuição estatística. Assim, a corrente de saída deste reator tem a mesma composição do fluido em seu interior. A mistura completa pode ser obtida em tanques mais circulares ou quadrados, e o conteúdo do tanque deve ser contínua e uniformemente distribuído.

Quando se assumem condições estacionárias, o escoamento em sistemas de lagoas pode se situar entre esses dois modelos idealizados, apresentando grau de mistura intermediário, caracterizado como de *fluxo disperso*. No entanto, devido à maior dificuldade na sua modelagem, usualmente são feitas aproximações para um dos modelos hidráulicos ideais. (METCALF e EDDY, 2003; TCHOBANOGLIOUS e SCHROEDER, 1985; VON SPERLING e CHERNICHARO, 2005). O modelo de *reatores de mistura completa em série* é também utilizado para descrever o regime hidráulico entre os dois regimes ideais. Nesse caso, de acordo com a formulação teórica, se a série for composta de um apenas um reator, o modelo reproduz um reator de mistura completa. Se o sistema apresentar um número infinito de reatores em série, o fluxo em pistão é reproduzido. Esses dois modelos podem ser utilizados para se obter melhor aproximação matemática da condição real de mistura (intermediária entre fluxo em pistão e mistura completa) sem a necessidade de utilizar equações diferenciais parciais que descrevam os fenômenos de advecção-dispersão nas lagoas.

Apresenta-se a seguir descrição matemática sucinta desses modelos.

#### 2.5.2.1 Fluxo em pistão

O balanço de massa em um reator pode ser descrito, de forma geral, por meio da expressão (em termos de taxas) (Equação 3.6):

$$\text{Acúmulo} = \text{entrada} - \text{saída} + \Delta \text{Composto} \quad (3.6)$$

Em linguagem matemática, a Equação 3.6 pode ser reescrita como (Equação 3.7):

$$\frac{d(CV)}{dt} = Q.C_o - Q.C + r_c.V \quad (3.7)$$

onde:

$C$  = concentração do composto em um tempo  $t$  ( $ML^{-3}$ )

$t$  = tempo (T)

$C_o$  = concentração afluyente do composto ( $ML^{-3}$ )

$V$  = volume de controle ( $L^3$ )

$Q$  = vazão ( $L^3T^{-1}$ )

$r_c$  = taxa de produção ou consumo do composto ( $ML^{-3}T^{-1}$ ), sendo (Equação 3.8):

$$r_c = \pm kC^n \quad (3.8)$$

Para a qual:

$n$  = ordem da reação (0, 1, 2...)

$k$  = constante da reação ( $T^{-1}$ )

Na Equação 3.7, o termo  $r_c.V$  foi considerado de sinal positivo, de forma que o sinal relativo ao processo passa a fazer parte do termo (negativo para degradação de um composto e positivo para aumento do composto).

Com a expansão da derivada no termo da esquerda, tem-se a expressão geral (Equação 3.9):

$$C \cdot \frac{dV}{dt} + V \cdot \frac{dC}{dt} = Q.C_o - Q.C + r_c.V \quad (3.9)$$

Considerando volume fixo do reator ( $dV/dt = 0$ ), e considerando o balanço de massa em um elemento diferencial desse volume ( $\Delta V$ ), com escoamento em pistão (coeficiente de dispersão longitudinal igual a zero), obtém-se (Equação 3.10):

$$\Delta V \cdot \frac{\partial C}{\partial t} = Q.C_x - Q.C_{x+\Delta x} + r_c \cdot \Delta V \quad (3.10)$$

Onde:

$x$  = ponto de referência ao longo do comprimento do reator (L)

$\Delta x$  = distância diferencial (L)

Substituindo a forma diferencial do termo  $Q.C_{x+\Delta x}$  na Equação 3.10, tem-se a Equação 3.11:

$$\Delta V \cdot \frac{\partial C}{\partial t} = Q \cdot C - Q \cdot \left( C + \frac{\Delta C}{\Delta x} \Delta x \right) + r_c \cdot \Delta V \quad (3.11)$$

Mas, considerando-se que, para uma área de seção transversal  $A$  do reator, o volume diferencial será  $\Delta V = A \cdot \Delta x$  e dividindo toda a expressão por  $A \cdot \Delta x$ , ter-se-á (Equação 3.12):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = - \frac{Q}{A} \frac{\Delta C}{\Delta x} + r_c \quad (3.12)$$

Ao se considerar o limite da expressão quando  $\Delta x \rightarrow 0$ , ter-se-á, após simplificações (Equação 3.13):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = - \frac{Q}{A} \cdot \frac{\partial C}{\partial x} + r_c \quad (3.13)$$

Considerando condições estacionárias no sistema ( $\partial C / \partial t = 0$ ), reação de primeira ordem (isto é,  $r_c = -kC$ ), e tomando-se  $TDH = V/Q$  e  $V = LA$ , a Equação 3.13 poderá ser resolvida via integração entre os limites de entrada ( $C = C_o$ ;  $x = 0$ ) e saída do reator ( $C = C$ ;  $x = L$ ), resultando na Equação 3.14:

$$C = C_o \cdot e^{-k \cdot TDH} \quad (3.14)$$

Com a Equação 3.14, pode-se modelar o perfil de concentrações do composto ao longo do comprimento de reator com fluxo pistonado. Tem-se, nesta situação que a concentração afluente ( $C_o$ ) é reduzida por um fator exponencial, que por sua vez dependente do TDH e da constante da reação de primeira ordem  $k$ .

### 2.5.2.2 Mistura completa

Dada a homogeneidade das concentrações no interior do reator em regime de mistura completa, não faz sentido utilizar uma seção transversal do reator para realizar o equacionamento do sistema - tal como feito no item anterior para o regime de fluxo em pistão - mas sim um balanço de massa considerando o volume inteiro do reator ( $V$ ): Portanto, tem-se após estas considerações a Equação 3.15:

$$V \cdot \frac{dC}{dt} = Q \cdot C_o - Q \cdot C + r_c V \quad (3.15)$$

Para uma reação de primeira ordem no reator ( $r_c = -kC$ ), a Equação 3.15 resulta, após simplificações, na Equação 3.16:

$$\frac{dC}{dt} + \left( k + \frac{Q}{V} \right) \cdot C = \frac{Q}{V} \cdot C_o \quad (3.16)$$

A equação diferencial acima pode ser resolvida por meio da multiplicação de ambos os lados da equação por um fator de integração  $e^{(k+Q/V)t}$ , permitindo assim o desenvolvimento matemático com posterior integração de ambos os lados da expressão.

Resolvendo a equação diferencial para  $C$  e considerando que  $C = C_o$  no tempo  $t = 0$ . Tem-se para um tempo  $t$  qualquer, a Equação 3.17:

$$C = \left[ C_o \cdot e^{-\left(k+\frac{Q}{V}\right)t} \right] + \frac{Q \cdot C_o}{k \cdot V + Q} \cdot \left[ 1 - e^{-\left(k+\frac{Q}{V}\right)t} \right] \quad (3.17)$$

Tomando-se o limite desta expressão para  $t \rightarrow \infty$ , os termos entre colchetes tendem a zero. A expressão fica como apresentada na Equação 3.18:

$$C = \frac{Q \cdot C_o}{k \cdot V + Q} \quad (3.18)$$

Como  $TDH = V/Q$ , tem-se a Equação 3.19:

$$C = \frac{C_o}{1 + k.TDH} \quad (3.19)$$

A Equação 3.19 é a que usualmente aparece na literatura para reações de primeira ordem.

Em teoria, pelas Equações 3.14 e 3.19, pode-se deduzir que para uma mesma concentração afluente e um mesmo tempo de detenção hidráulica, um reator em regime de fluxo em pistão é significativamente mais eficiente que um de mistura completa, ou seja, possui menor concentração de saída. Dessa forma, um reator de mistura completa necessita de maior volume para atingir a mesma eficiência que um de fluxo em pistão, e essa diferença aumenta à medida que a eficiência requerida também aumenta.

#### 2.5.2.3 Fluxo disperso

O modelo físico para reatores de fluxo disperso depende da intensidade de dispersão e das condições de contorno existentes (LEVENSPIEL, 2000). Para o equacionamento, pode-se utilizar o mesmo modelo diferencial utilizado para o reator de fluxo em pistão, acrescentando no balanço de massa os efeitos da dispersão (KELLNER e PIRES, 1998).

Assim, para generalizar esse balanço, deve ser adotada uma expressão para o fluxo de massa,  $\eta_x$ . Considerando-se  $\eta_x = f \cdot U_x$ , onde  $f$  é uma função que descreve a concentração mássica na direção  $x$ , o balanço de massa, partindo-se da Equação 3.10, resulta na Equação 3.20:

$$\Delta V \cdot \frac{\partial C}{\partial t} = A \eta_x - A \eta_{x+\Delta x} + k \cdot C \cdot \Delta V \quad (3.20)$$

Da mesma forma que no caso do fluxo em pistão,  $A$  é a área da seção transversal,  $\Delta x$  o comprimento do elemento diferencial de controle e  $\Delta V$  o volume do elemento diferencial de controle representado pelo produto de  $A$  por  $\Delta x$ . Para regime permanente ( $\partial C / \partial t = 0$ ), a Equação 3.20 resulta, após simplificações, na Equação 3.21:

$$\nabla \eta_x + k \cdot f = 0 \quad (3.21)$$

O fluxo mássico na direção  $x$  pode ser representado, após consideração da primeira Lei de Fick da difusão (METCALF e EDDY, 2003; INCROPERA *et al.*, 2012), pela Equação 3.22:

$$J_x = -D \cdot \frac{\partial f}{\partial x} \quad (3.22)$$

Sendo  $D$  o coeficiente de dispersão ( $L^2/T$ ).

Para um sistema binário que possui velocidade média do fluido constante, o fluxo de massa na direção  $x$  relativa à velocidade mássica média pode ser expresso por meio da Equação 3.23:

$$J_x = f \cdot (U_x - U) \quad (3.23)$$

Sendo  $U_x$  a velocidade mássica média na direção  $x$  e  $U$  a velocidade média de escoamento do fluido. Combinando as equações 3.21, 3.22 e 3.23 obtém-se, após extenso desenvolvimento matemático, a seguinte equação diferencial adimensional que descreve o fluxo disperso (Equação 3.24):

$$d \cdot \frac{\partial^2 f}{\partial z^2} - \frac{\partial f}{\partial z} - k \cdot (TDH) \cdot f = 0 \quad (3.24)$$

Sendo, nesta equação, para um comprimento do reator  $L$ , o número de dispersão descrito por  $d = D/U \cdot L$  (KELLNER E PIRES, 1998; LEVENSPIEL, 2000; METCALF E EDDY, 2003; VON SPERLING E CHERNICHARO, 2005) e a variável espacial adimensional  $z = x/L$ .

Kellner e Pires (1998) mencionam duas propostas de condições de contorno encontradas na literatura para resolução da Equação 3.24:

- Dankwerts (1953) *apud* Wehner e Wilhelm (1956):
  - $f(0^-) = 1$  e  $f(0^+) = 1 + d \cdot \frac{\partial f(0^+)}{\partial z}$
  - $\frac{\partial f(1)}{\partial z} = 0$

Nas quais  $f(0^-)$  representa o percentual remanescente do composto imediatamente antes de sua entrada no reator,  $f(0^+)$  representa o percentual remanescente imediatamente após entrada no reator, e,  $f(1)$  o percentual remanescente na saída do reator.

De acordo com essa condição de contorno, o fluxo que entra na tubulação,  $f(0^-)$ , é praticamente igual àquele dentro do reator,  $f(0^+)$ . A diferença entre  $f(0^-)$  e  $f(0^+)$  aparece devido à dispersão dentro do tubo, representada pelo termo  $d \cdot \partial f(0^+) / \partial z$ . Sendo assim, teoricamente existe uma descontinuidade nesta condição de contorno (WEHNER e WILHELM, 1956).

- Hulburt (1944) *apud* Wehner e Wilhelm (1956):

- $f(0^-) = 1$  e  $f(0^+) = 1$
- $\frac{\partial f(1)}{\partial z} = 0$

Ao propor essa condição de contorno, o autor despreza a dispersão que ocorre imediatamente após a entrada do composto no reator tubular (desconsidera o termo  $d \cdot \partial f(0^+) / \partial z$ ), mas eliminou-se assim a descontinuidade da condição de Danckwerts.

Em termos de semelhança, nota-se que ambas as soluções admitem que, na saída do reator ( $z = 1$ ), todo o reagente desaparece (segunda condição de contorno). Agunwamba (1990) observou resultados praticamente iguais com o uso das duas proposições na solução da equação de escoamento parcialmente disperso (ao nível de significância de 0,01 na análise estatística), recomendando a solução de Hulburt, por simplificar consideravelmente a técnica de solução.

Utilizando as condições de contorno de Danckwerts, Wehner e Wilhelm (1956) obtiveram a expressão geral para cálculo da concentração efluente de um composto em um reator com escoamento disperso (Equação 3.25):

$$C = C_o \cdot \frac{4 \cdot a \cdot e^{1/2 \cdot d}}{(1+a)^2 \cdot e^{a/2 \cdot d} - (1-a)^2 \cdot e^{-a/2 \cdot d}} \quad (3.25)$$

Sendo:

$$a = \sqrt{1 + 4.k.t.d} \quad (3.26)$$

Tal equação é encontrada em quase todos os referenciais teóricos a respeito de hidráulica de reatores.

Em lagoas já em operação, o número de dispersão  $d$  pode ser obtido por meio de ensaios de estímulo-resposta com uso de traçadores, tópico que será coberto em item posterior. Em caso de projetos e prognósticos, o número de dispersão pode ser obtido por meio de estimativas baseadas em equações empíricas (Equações 3.27 a 3.31):

Polprasert e Bhattarai (1985):

$$d = \frac{0,184.t.v.(B + 2H)^{0,489} \cdot B^{1,511}}{(L.H)^{1,489}} \quad (3.27)$$

Agunwamba *et al.* (1992), fórmula original simplificada:

$$d = 0,102 \left( \frac{(3.(B + 2.H).t.v)}{4.L.B.H} \right)^{-0,410} \cdot \left( \frac{H}{L} \right) \cdot \left( \frac{H}{B} \right)^{-(0,981+1,385.H/B)} \quad (3.28)$$

Yanez (1993):

$$d = \frac{(L/B)}{-0,261+0,254.(L/B)+1,014.(L/B)^2} \quad (3.29)$$

Nameche e Vasel (1998) adaptada:

$$d = \frac{1}{0,31.(L/B)+0,055.(L/H)} \quad (3.30)$$

e Von Sperling (1999):

$$d = \frac{1}{L/B} \quad (3.31)$$

onde:

L = comprimento da lagoa (m)

B = largura da lagoa (m)

H = profundidade da lagoa (m)

$\nu$  = viscosidade cinemática da água (m<sup>2</sup>/d)

t = tempo de detenção hidráulica (d)

sendo  $\nu = 0,325 \cdot T^{-0,450}$  (VON SPERLING, 1999; para T = 10 a 30°C, R<sup>2</sup> = 0,986)

#### 2.5.2.4 Tanques em série

O modelo de tanques em série (TS) foi elaborado para permitir uma abordagem mais simplificada para modelagem do regime de fluxo disperso, com a possibilidade de associação a qualquer modelo cinético (LEVENSPIEL, 2000).

Sistemas de TS podem ocorrer na prática em lagoas de maturação ou reatores de lodos ativados com divisões internas, ou pode ser utilizado como modelo teórico para representar condições hidráulicas intermediárias entre reatores de mistura completa e fluxo em pistão (por isso é uma alternativa ao modelo de fluxo disperso). Quando o volume total é distribuído em um único tanque ou reator, o sistema se comporta como um reator de mistura completa convencional. Por outro lado, quando o volume total é distribuído em um número infinito de tanques ou reatores, o modelo reproduz o fluxo pistonado. Um número intermediário de tanques considerados reproduz o fluxo disperso, podendo tender para um ou outro tipo ideal, dependendo do número de subdivisões adotadas (VON SPERLING, 2007). Neste modelo, assume-se que cada um dos reatores da série é de mistura completa.

Considerando o caso de substância biodegradável e reações de primeira ordem, a equação que representa a concentração efluente para um único reator é a Equação 3.19. Portanto, para o modelo de TS, o efluente do primeiro reator será (Equação 3.32):

$$C_{e1} = \frac{C_o}{1 + k.t_1} \quad (3.32)$$

Onde  $t_1$  é o TDH do reator 1.

Considerando um segundo reator em série, tem-se que o efluente do primeiro reator será o afluente do segundo. Logo (Equação 3.33):

$$C_{e2} = \frac{C_{e1}}{1 + k.t_2} = \frac{C_o}{(1 + k.t_1) \cdot (1 + k.t_2)} \quad (3.33)$$

Seguindo o mesmo raciocínio, a Equação 3.33 pode então ser generalizada para um número “n” de tanques em série (de diferentes volumes e tempos de detenção hidráulica  $t$ ):

$$C_{en} = \frac{C_o}{(1 + k.t_1) \cdot (1 + k.t_2) \dots (1 + k.t_n)} \quad (3.34)$$

Se os reatores apresentam o mesmo volume e, portanto, o mesmo TDH ( $t_1 = t_2 = \dots t_n$ ), então a Equação 3.34 pode ser simplificada para (Equação 3.35):

$$C_e = \frac{C_o}{(1 + k.t_1)^n} = \frac{C_o}{\left(1 + k \cdot \frac{TDH}{n}\right)^n} \quad (3.35)$$

onde:

$C_e$  = concentração efluente final (M/L<sup>3</sup>)

$k$  = constante da reação (T<sup>-1</sup>)

$t$  = tempo de detenção hidráulica de um reator apenas (T)

TDH = tempo de detenção hidráulica total do sistema (T)

$n$  = número de reatores, todos de igual volume (-)

Quando se tem um arranjo de reatores em série, é possível que a distribuição do fluxo de entrada seja realizado por meio de divisão entre eles. Assim, cada reator é alimentado não só pelo efluente da célula de montante, mas também por uma fração do afluente geral (VON SPERLING, 2007). Em um arranjo em série com  $n$  reatores de volumes iguais ou diferentes com alimentação incremental, todas as frações do fluido não recebem a mesma exposição ao tratamento. A primeira fração é tratada em  $n-1$  reatores, a terceira em  $n-2$  e assim por diante (VON SPERLING, 2007). Quando os reatores têm o mesmo volume e recebem a mesma

fração da vazão total, a concentração do efluente seguindo reação de primeira ordem é dada pela Equação 3.36 (ARCEIVALA, 1981):

$$C_e = \frac{C_o}{1 + k \cdot \left( \frac{n \cdot V_1}{Q} \right)} \quad (3.36)$$

onde:

$n$  = número de reatores em série com alimentação incremental

$V_1$  = volume de cada reator (assumindo volumes iguais) ( $L^3$ )

$Q$  = vazão total afluyente ao sistema ( $L^3/T$ )

Em casos onde se considera a recirculação de fração do efluente (que pode ser maior, menor ou igual à vazão afluyente) para a entrada do reator, tem-se que a concentração de entrada no reator ( $C_o'$ ) passa a ser uma média ponderada entre os fluxos afluyente e de recirculação (Equação 3.37):

$$C_o' = \frac{C_o \cdot Q_o + C_r \cdot Q_r}{Q_o + Q_r} \quad (3.37)$$

onde:

$C_o'$  = concentração de entrada no reator (mistura do afluyente com o recirculado) ( $M/L^3$ )

$C_o$  = concentração afluyente ( $M/L^3$ )

$C_r$  = concentração do fluido recirculado ( $M/L^3$ )

$Q_o$  = vazão afluyente ( $L^3/T$ )

$Q_r$  = vazão de recirculação ( $L^3/T$ )

Em tais casos, as vazões de entrada e saída do reator é igual a  $Q_o + Q_r$  e a concentração de saída do reator é obtida utilizando-se as equações pertinentes em função do modelo hidráulico adotado.

O modelo de tanques em série também pode ser deduzido utilizando-se de uma distribuição gama para os tempos de detenção. A função gama é dada por (Equação 3.38):

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} p^{x-1} e^{-p} dp \quad (3.38)$$

De forma que, para um  $n$  inteiro positivo,

$$\Gamma(n+1) = n! \quad (3.39)$$

Adaptando a função para um número  $N$  de reatores em série, tem-se a distribuição gama  $g(t)$ , dada por (Equação 3.40):

$$g(t) = \frac{N}{\bar{t}\Gamma(N)} \left( \frac{N\tau}{\bar{t}} \right)^{N-1} e^{-\frac{N\tau}{\bar{t}}} \quad (3.40)$$

Na qual:

$\bar{t}$  = tempo de detenção hidráulica médio real = TDH<sub>real</sub> (T)

$\tau$  = tempo de detenção hidráulica teórico (T)

Quando  $N = 1$ , a distribuição gama se torna uma distribuição exponencial.

#### 2.5.2.5 Constantes cinéticas K e K<sub>b</sub>

Os valores dos coeficientes de remoção de DBO (K) e de decaimento bacteriano (K<sub>b</sub>) em uma lagoa são sempre calculados em função do modelo hidrodinâmico assumido, sendo que grande parte das referências da literatura reporta os valores de K e K<sub>b</sub> para o modelo de mistura completa.

Para lagoas com regime tendendo ao fluxo em pistão e mistura completa, e considerando as reações de degradação de DBO e decaimento de coliformes como de primeira ordem, o K ou K<sub>b</sub> pode ser calculado por meio do rearranjo das equações 3.14 e 3.19, tendo por base valores das concentrações afluente e efluente, bem como do tempo de detenção hidráulica, resultando em (Equações 3.41 e 3.42):

Fluxo em pistão:

$$k = \frac{1}{t} \ln \left( \frac{C_o}{C_e} \right) \quad (3.41)$$

Mistura completa:

$$k = \frac{1}{t} \left( \frac{C_o}{C_e} - 1 \right) \quad (3.42)$$

onde:

$k$  = coeficiente de degradação de DBO ( $K$ ) ou coeficiente de decaimento bacteriano ( $K_b$ ) ( $T^{-1}$ )

$C_o$  = concentração afluente de DBO ( $M/L^3$ ) ou coliformes ( $NMP/L^3$ )

$C_e$  = concentração efluente de DBO ( $M/L^3$ ) ou coliformes ( $NMP/L^3$ )

$t$  = tempo de detenção hidráulica ( $T$ )

Conforme já mencionado, esses regimes são idealizados. Na prática, todas as lagoas operam em regime de fluxo disperso, condição intermediária entre os dois primeiros. Nesse caso, o  $K$  ou  $K_b$  não é explícito na equação do modelo de fluxo disperso e sua obtenção demanda utilização de métodos numéricos para resolução da Equação 3.25.

Para utilização do modelo hidráulico de fluxo disperso em projetos, o coeficiente de remoção de DBO ( $K$ ) pode ser obtido através das relações empíricas desenvolvidas por Arceivala (1981) e Vidal (1983) *apud* von Sperling (2007), expressas nas Equações 3.43 e 3.44, respectivamente:

$$K = 0,132 \cdot \log L_s - 0,146 \quad (3.43)$$

$$K = 0,091 + 2,05 \times 10^{-4} \cdot L_s \quad (3.44)$$

onde  $L_s$  é a taxa de aplicação superficial, em kg DBO/ha.d.

De forma análoga, para estimativa do  $K_b$  segundo o modelo de fluxo disperso pode-se fazer uso da Equação 3.45, obtidas por meio de análise de dados de 186 lagoas no mundo (VON SPERLING, 2005):

$$K_b = 0,549 \cdot H^{-1,456} \quad (3.45)$$

onde H = profundidade da lagoa (m)

Para temperaturas diferentes de 20°, o K ou K<sub>b</sub> pode ser corrigido por meio da Equação 3.46:

$$K_T = K_{20} \cdot \theta^{(T-20)} \quad (3.46)$$

Em que:

K<sub>T</sub> = valor de K ou K<sub>b</sub> em uma temperatura do líquido T qualquer (d<sup>-1</sup>)

K<sub>20</sub> = valor de K ou K<sub>b</sub> na temperatura do líquido de 20° (d<sup>-1</sup>)

θ = coeficiente de temperatura (-)

Vale destacar que diferentes valores do coeficiente de temperatura (θ) são propostos na literatura, variando de acordo com o modelo assumido e até mesmo para diferentes valores de K ou K<sub>b</sub>.

### 2.5.3 Estratificação térmica e circulação vertical

A hidrodinâmica de lagoas de estabilização e maturação tem sido estudada amplamente em termos das relações geométricas superficiais (comprimento e largura), buscando averiguar sua adequabilidade aos conhecidos modelos hidráulicos de reatores (mistura completa, fluxo em pistão, fluxo disperso). No entanto, o componente vertical, vinculado à profundidade, tem também grande importância no comportamento das lagoas, e tem sido muito menos abordado pela literatura especializada. Em projetos, as dimensões das lagoas são usualmente estabelecidas a partir de relações teóricas e empíricas que fornecem, direta ou indiretamente, uma estimativa do tempo de detenção hidráulica (TDH) necessário para atingir uma determinada qualidade do efluente. Entretanto, muitos fatores podem causar distúrbios no padrão de fluxo de uma lagoa, influenciando o TDH real. Um dos fatores é a estratificação térmica, um fenômeno natural que geralmente é negligenciado em projetos (KELLNER e PIRES, 2002).

Devido às diferenças de temperatura ou salinidade entre as camadas líquidas das lagoas, um gradiente de densidade é formado e as camadas mais leves (zona do epilímnio) tendem a se

sobrepor às mais densas (zona do hipolímnio), criando condição de estratificação (DOR *et al.*, 1993). Tal fenômeno tende a ser prejudicial ao comportamento hidrodinâmico da lagoa de estabilização, já que pode proporcionar curtos-circuitos do afluente via superfície ou fundo da lagoa; principalmente se o afluente tiver uma temperatura significativamente diferente do fluido presente na lagoa e se não há grande mistura na entrada (SHILTON, 2005). Nas palavras de Kellner *et al.* (2009), “em lagoas completamente misturadas, o fluxo que se encaminha para a saída é radial, tomando água, igualmente, de todas as direções. No entanto, em lagoas estratificadas, como os dispositivos de saída localizam-se na região do epilímnio e, por serem as vazões efluentes pequenas em relação ao volume total da lagoa, o fluxo vem apenas dessa zona (...). A região de tomada de água é aquela determinada pelo volume útil da lagoa, com influência direta sobre o tempo de detenção hidráulica (TDH) da lagoa e a ocorrência de curtos-circuitos”. Portanto, trata-se de uma possibilidade de redução do volume útil (zona ativa) da lagoa e, conseqüentemente, do TDH real e da eficiência.

A desestratificação térmica, por sua vez, pode ocorrer quando as temperaturas se igualam durante o resfriamento da massa líquida, o que pode provocar uma mistura vertical que pode ser benéfica à eficiência da lagoa, tanto do ponto de vista hidrodinâmico (redução de curtos circuitos) quanto do ponto de vista de remoção de poluentes (melhor oxigenação da massa líquida, redistribuição de constituintes ao longo do perfil vertical etc.). Por outro lado, pode contribuir com a piora da qualidade do efluente se ocorrer ressuspensão do lodo durante a mistura. A estratificação também pode ser quebrada pelo vento que sopra sobre a superfície da água. Neste caso, as camadas superficiais do corpo d’água são misturadas graças aos efeitos de cisalhamento que o vento exerce sobre o líquido e, no decorrer do tempo, as camadas mais densas e menos turbulentas misturam-se às menos densas (CHU e SOONG, 1997). Shilton (2005) e Abis e Mara (2006) sugerem que a mistura e turbulência proporcionada pelo jato de entrada podem também quebrar a estratificação. Segundo Uhlmann (1979) a quebra da estratificação térmica é frequentemente acompanhada da mistura e homogeneização vertical dos constituintes de qualidade nas lagoas, ao menos em escala local.

A ideia de que a ação do vento pode ser responsável pela quebra da estratificação é comumente encontrada na literatura. Sweeney *et al.* (2005) afirmam que até mesmo ventos mais brandos (~1.5 m/s) quebram parcialmente a estratificação e sugerem a inclusão do efeito de mistura proporcionado pelo vento em modelos que incluam a transferência de energia e

estratificação em lagoas maiores. Por outro lado, Abis e Mara (2006) concluíram em seu trabalho que o principal fator para a quebra da estratificação em lagoas de estabilização experimentais no Reino Unido foi a queda da temperatura do ar, afirmando que nem o fluxo de entrada nem a velocidade do vento tiveram impacto significativo no perfil térmico. Mas atribuíram este fato à pequena área das lagoas (33,6 m<sup>2</sup>, 40,6 m<sup>2</sup> e 39,5 m<sup>2</sup>).

De acordo com Kellner e Pires (2002), a principal causa para a ocorrência de estratificação térmica em lagoas de estabilização é o aquecimento das camadas superficiais devido à radiação solar incidente; e a desestratificação é atribuída principalmente ao resfriamento dessas camadas superficiais. Os autores sugerem o gradiente térmico de 0,6 °C/m como valor limite para identificação da ocorrência de estratificação em regiões de clima tropical.

A estratificação térmica pode ser estável, persistindo durante meses, ou intermitente, aparecendo durante algumas horas do dia (DOR *et al.*, 1993; PEDAHZUR *et al.*, 1993; TORRES *et al.*, 1997). Em lagoas de maiores profundidades essa estratificação tende a ser mais estável, visto que os gradientes de temperatura tendem a ser maiores. Abis e Mara (2006) observaram grandes períodos de estratificação ao longo do ano em lagoas de estabilização em escala piloto no Reino Unido, com profundidade de 1,5 m. Silva (1982) e Vidal (1983) relataram perfis verticais de temperatura em lagoas de 1,25 m e 1,50 m, respectivamente, que indicaram períodos diários de estratificação e desestratificação nessas lagoas.

Também há relatos em literatura de estratificação térmica em lagoas rasas em escala real com 0,2 m de profundidade na Nigéria (AGUNWAMBA, 1997; UKPONG *et al.*, 2006a); em lagoas em escala laboratorial com 0,40 m de profundidade (UKPONG *et al.*, 2006a) e em lagoa de escala laboratorial com profundidades de 0,36m e 0,54 m (BOKIL E AGRAWAL, 1977). Ukpong *et al.* (2006a, 2006b) e Kellner e Pires (2002) afirmam que a elevada turbidez favorece condições de estratificação mesmo em lagoas de profundidades bastante reduzidas. Isso ocorre porque os sólidos suspensos contribuem para a atenuação dos raios solares, favorecendo o aquecimento das camadas superiores do fluido e possibilitando a ocorrência de gradientes mais elevados. É importante notar que a turbidez em lagoas de estabilização é bem superior à observada em lagos, devido à grande concentração de algas em suspensão nas primeiras.

Perfis de temperatura, oxigênio dissolvido e pH indicaram uma forte estratificação térmica em uma lagoa em Israel, com a diferença de temperatura entre o topo e fundo da lagoa de 10°C (PEDAHZUR *et al.*, 1993). Isso fez com que o afluente relativamente frio se deslocasse para o fundo da lagoa e fluísse rapidamente ao longo de um caminho preferencial em direção à saída. Estudos com traçador no mesmo trabalho confirmaram a ocorrência de curto-circuito, atribuída pelos autores às condições de estratificação. A ocorrência de curto-circuito associado à estratificação térmica também foi relatada por MacDonald e Ernst (1986). Entretanto, é importante ressaltar que, apesar da associação direta possivelmente válida desses autores, não foram realizadas medições diretas na lagoa para confirmar tal comportamento.

Torres *et al.* (1997) estudaram a influência da estratificação térmica na eficiência de mistura de uma lagoa no sudeste da Espanha. Foi descoberto que, durante o inverno, depois que a temperatura da camada superficial reduzia, a zona ativa da lagoa se estendia em toda a profundidade da lagoa. Já durante o verão, como uma termoclina estável era formada em função da estratificação, essa zona ativa se estendia da superfície até a profundidade correspondente à saída do efluente. Os volumes das zonas ativas foram estimados como sendo 70% e 20% do volume total da lagoa durante o inverno e verão, respectivamente, afetando o TDH nessa mesma proporção.

Embora o número de dispersão em lagoas de estabilização seja influenciado diretamente pela relação entre comprimento e largura, a diminuição no TDH real pode mascarar os seus efeitos (KELLNER e PIRES, 2002). Arceivala (1983) observou que algumas lagoas de estabilização localizadas em climas quentes apresentavam números de dispersão superiores quando havia estratificação.

Medições precisas de temperatura tomadas em simultâneo ao longo da profundidade da lagoa são necessárias para entender melhor esses fenômenos, sendo que apenas trabalhos preliminares nesta área foram realizados (SHILTON, 2005; SWEENEY *et al.*, 2005). Abis e Mara (2005) afirmam que são raros na literatura de lagoas de estabilização dados contínuos de temperatura em lagoas por mais de 2-3 meses, devido à dificuldade e os custos do monitoramento de longo período. Ademais, há muito menos dados publicados para lagoas rasas (como as lagoas de maturação), comparadas com as lagoas facultativas, de maiores profundidades.

Em adição às medições e campanhas em campo, algumas formulações matemáticas teóricas podem auxiliar na análise do fenômeno de estratificação térmica e circulação vertical nas lagoas. Naturalmente, o balanço térmico considerando as leis da termodinâmica é de grande importância e certamente fornecerá tendências de comportamento hidrodinâmico frente aos ciclos de aquecimento e resfriamento que as lagoas são submetidas, mas esse balanço completo é de muito difícil resolução e obtenção, em vista das incertezas nas estimativas de coeficientes e fluxos de calor. Além do balanço térmico e sua formulação baseada nas leis de transferência de calor, há parâmetros que podem ser auxiliares nessa análise e suas formulações e deduções podem ser facilmente encontrados na literatura. São números adimensionais que expressam características da transferência de calor em um fluido determinado ou que relacionam forças que interferem nessa transferência. Alguns desses parâmetros de interesse são brevemente apresentados abaixo.

O Número de Biot (Bi) é um parâmetro adimensional e pode fornecer um índice simples da razão entre o coeficiente de transferência convectiva de calor na superfície da lagoa e a condutância específica do fluido dentro dela, ou seja, a razão das resistências térmicas dentro da lagoa e na sua superfície (Equação 3.47).

$$Bi = \frac{h \cdot L_c}{k_{cond}} \quad (3.47)$$

em que:

$L_c$  = comprimento característico (m), podendo ser calculado como volume/área

$h$  = coeficiente convectivo de transferência de calor (W/m<sup>2</sup>.K)

$k_{cond}$  = coeficiente condutivo de transferência de calor (W/m.K)

Adaptando conceitos de literatura (GEBHART, 1993; INCOPRERA, 2012), pode-se sugerir que valores do número de Biot menores que 0,1 implicam que a condução de calor no fluido contido na lagoa é muito mais rápida que a convecção de calor a partir de sua superfície, e gradientes de temperatura são negligenciáveis dentro dela. Isto pode indicar a baixa possibilidade de ocorrência de estratificação ou, no campo da modelagem numérica, a aplicabilidade (ou inaplicabilidade) de certos métodos para resolução de problemas de transferência de calor transiente. Em outras palavras, um número de Biot estimado como menor que 0,1 caracterizaria a lagoa como "termicamente fina", e a temperatura poderia ser considerada constante e uniforme em todo o volume. Por outro lado, um número de Biot

maior que 0,1 (sistema "termicamente espesso") inviabilizaria tal pressuposto, e equações de transferência de calor para regime transiente seriam necessárias para descrever o campo de temperatura variante no tempo (e não espacialmente uniforme dentro do corpo material).

A importância de se considerar ou não as forças de empuxo devido às variações de temperatura em um fluxo convectivo pode ser inferida pelo cálculo do número adimensional de Richardson, em uma de suas variações, que representa a importância da convecção natural em relação à convecção forçada. Neste caso, o número de Richardson ( $Ri$ ) (Equação 3.48) pode ser obtido pela razão entre o número de Grashof ( $Gr$ ) (Equação 3.49) e o quadrado do número de Reynolds ( $Re$ ) (Equação 3.50):

$$Ri = \frac{Gr}{Re^2} = \frac{g\beta L_c \Delta T}{U^2} \quad (3.48)$$

sendo:

$$Gr = \frac{g\beta L_c^3 \Delta T}{\nu^2} \quad (3.49)$$

e

$$Re = \frac{UL_c}{\nu} \quad (3.50)$$

onde:

$$\Delta T = T_{\text{sup}} - T_{\text{ref}} \quad (\Theta) \quad (3.51)$$

$g$  = aceleração da gravidade ( $L/T^2$ )

$U$  = velocidade característica ( $L/T$ )

$\beta$  = coeficiente de expansão volumétrica ( $\Theta^{-1}$ )

$\nu$  = viscosidade cinemática do fluido ( $L^2/T$ )

O número de Grashof ( $Gr$ ) representa a relação entre as magnitudes das forças de empuxo e das forças viscosas na convecção natural e o número de Reynolds uma estimativa do grau de turbulência no regime de fluxo. Um valor de  $Ri$  próximo à unidade, ou superior, indica que os efeitos do empuxo, e conseqüentemente a mistura no perfil vertical das lagoas, são significantes nas condições de fluxo em estudo.

O número de Rayleigh ( $Ra$ ) é uma medida do balanço entre as forças que promovem a convecção e as que se lhe opõem (a fricção devido à viscosidade e a difusão térmica, que opera no sentido de anular o gradiente de temperatura), podendo ser calculado pelo produto entre o número de Grashof e o número de Prandtl, resultando na Equação 3.52.

$$Ra = Gr \cdot Pr = \frac{g\beta L_c^3 \Delta T}{\nu\alpha} \quad (3.52)$$

na qual  $\alpha$  é a difusividade térmica ( $m^2/s$ ) e  $Pr$  é o número de Prandtl, que descreve a relação entre a difusividade da quantidade de movimento e a difusividade térmica, sendo dado por (Equação 3.53):

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (3.53)$$

O limiar teórico aproximado de convecção é sugerido na literatura pelo valor do número de Rayleigh ( $Ra$ ) de 1708, sendo menor em superfícies livres (MANNEVILLE, 2006). A partir do número de Rayleigh crítico, o movimento convectivo passa a operar como transferidor de calor, em detrimento do transporte de calor por condução, resultando assim em mistura.

#### 2.5.4 Ação do vento

A influência do vento sobre a superfície de um corpo d'água é tema já consolidado na oceanografia física e limnologia. Um clássico estudo foi feito por Langmuir (1938) no lago George (EUA), no qual o autor relata observações de movimentos da água induzidos pelo vento.

A influência do vento ocorre via atuação de tensões de cisalhamento proporcionadas pelo escoamento do fluxo do vento na interface com o fluido. A equação que relaciona a tensão de cisalhamento com a velocidade do vento é apresentada em diversas referências de literatura, principalmente aquelas na área de limnologia, oceanografia física e dinâmica dos fluidos. Na sua forma geral, pode ser escrita como apresentado na Equação 3.54 (TUNDISI e TUNDISI, 2008):

$$\tau_{vento} = C_d \rho_{ar} u_{vento}^2 \quad (3.54)$$

Na qual:

$\tau_{vento}$  = tensão de cisalhamento proporcionada pelo vento (N/m<sup>2</sup>)

$u_{vento}$  = velocidade do vento (m/s)

$\rho_{ar}$  = densidade do ar (kg/m<sup>3</sup>)

$C_d$  = constante empírica (-)

De acordo com Shilton e Harrison (2003b), o efeito do vento (descrito pela sua velocidade e direção) é um dos fatores físicos que causam o padrão de fluxo não ideal em lagoas de estabilização. Pesquisas sobre os efeitos do vento sobre a hidrodinâmica das lagoas tem mostrado que a tensão de cisalhamento na superfície da lagoa pode alterar o padrão de fluxo (SWEENEY, 2004; SHILTON, 2001).

Brissaud *et al.* (2000, 2003), Frederick e Lloyd (1996), Lloyd *et al.* (2003) e Vorkas e Lloyd (2000) observaram que a velocidade do vento diminui a eficiência de tratamento de lagoas de estabilização, devido à promoção de curtos-circuitos hidráulicos. Eles observaram que, mesmo a baixas velocidades de vento, na faixa de 0,5 a 2,6 m/s, curtos-circuitos podem se desenvolver em lagoas por esse motivo. Vorkas e Lloyd (2000) concluíram em suas pesquisas com flutuadores e traçadores em uma lagoa facultativa na Colômbia que o vento pode afetar significativamente zonas mortas e o grau de dispersão em uma lagoa, de forma que mudanças na velocidade e direção do vento podem rapidamente alterar padrões do fluxo. De acordo com os autores, velocidades superficiais nas lagoas induzidas pelo vento podem ser até 100 vezes maiores que a velocidade média do fluxo advectivo, o que seria, sem dúvida, bastante significativo. Formas de proteção de lagoas contra o efeito do vento foram investigadas por Wong e Lloyd (2004), com vistas à observação do seu impacto no TDH real. O experimento foi conduzido com quebra-ventos atuando em condições controladas de vento e também em condições naturais, e os dados foram analisados em conjunto com resultados de experimentos com flutuadores, *drogues* e traçador. Os autores concluíram que os efeitos do vento, independentemente da sua direção, reduzem o TDH real até mesmo em baixas velocidades (redução em 25% do TDH em velocidades de 0,3 m/s, por exemplo), e que o uso adequado de dispositivos para quebrar o vento pode proporcionar reduções nessa velocidade em 70 a 90%, com impacto benéfico no desempenho das lagoas.

Por outro lado, o vento exerce influência nas condições de mistura e na reaeração atmosférica (VON SPERLING e CHERNICHARO, 2005), fenômenos importantes na distribuição vertical do oxigênio dissolvido, algas, nutrientes e matéria orgânica nas lagoas. Ainda, de acordo com Banda *et al.* (2006), os efeitos da velocidade e direção do vento podem melhorar o desempenho de lagoas, caso elas estejam localizadas de modo que o sentido do fluxo principal do efluente seja contrário ao sentido predominante do vento.

Shilton e Harrison (2003a, 2003b) sugerem que a dinâmica do fluxo determinada pelos dispositivos de entrada nas lagoas pode superar os efeitos do vento, eliminando assim as preocupações do curto-circuito hidráulico causado por esses efeitos. Eles argumentaram que a quantidade de movimento proporcionada pelo fluxo de entrada pode sustentar o padrão de fluxo nas lagoas.

Saraiva *et al.* (2005) avaliaram a quantidade, distribuição e constante de sedimentação de sólidos em uma lagoa facultativa primária em larga escala operando principalmente sob condições de ventos fortes. Os dados mostraram que o vento soprando predominantemente no sentido das saídas para as entradas na lagoa exercia uma maior influência sobre a deposição de sólidos do que o próprio fluxo hidráulico, além de manter a lagoa em mistura completa durante a maior parte do tempo.

Nota-se que há duas linhas de pensamento divergentes na literatura a respeito da influência do vento em lagoas. Alguns autores consideram que o impacto do vento é significativo (BADROT-NICO *et al.*, 2010; CASAROTTI *et al.*, 2012; FARES e LLOYD, 1995; LIGGET e HADJITHEODOROU, 1969 *apud* THACKSTON *et al.*, 1987; MARECOS DO MONTE, SILVA e MARA, 1979; SWEENEY, 2004; TCHOBANOGLIOUS *et al.* 2003; UKPONG, 2013; VON SPERLING, 2007; VORKAS e LLOYD, 2000; WOOD, 1997); seja contribuindo com a redução do desempenho da lagoa por meio do aumento do curto-circuito ou com a melhoria do desempenho com a indução da mistura vertical. Apesar de ser a sugestão geral da literatura, são muito limitados os esforços experimentais nesses trabalhos para sustentar essa hipótese (SHILTON, 2001). Nesse sentido, este mesmo autor obteve, em seus trabalhos, melhor ajuste de modelos em lagoas a dados experimentais quando se considerava o efeito do vento. Entretanto, ao realizar análise teórica comparativa entre os efeitos do vento e as forças inerciais do fluxo de entrada (que são maiores em menores diâmetros da tubulação), Shilton concluiu que essa diferença de resultado não é tão significativa e que os pesquisadores podem

ter superestimado o efeito do vento, na medida em que as descargas de entrada são responsáveis por forças inerciais que tendem a ser dominantes na determinação do padrão de fluxo (na maioria das condições de vento e de projeto encontradas nas lagoas, exceto quando em condições de elevadas velocidades do vento ou com grandes diâmetros da tubulação de entrada).

Com o intuito de proporcionar uma base de comparação entre o aporte de energia em uma lagoa a partir do dispositivo de entrada e o aporte de energia a partir do cisalhamento do vento ao longo da superfície, aproximações teóricas dessa quantidade de energia podem ser utilizadas para ambas as situações (SHILTON, 2001; SHILTON e HARRISON, 2003b). Nesse sentido, a energia fornecida pela entrada ( $P_{ent}$ ), em Watts, pode ser estimada por (Equação 3.55):

$$P_{ent} = 0,5 \rho_{\text{água}} u^3 A \quad (3.55)$$

onde:

$\rho_{\text{água}}$  = massa específica da água (kg/m<sup>3</sup>)

$u$  = velocidade da água (m/s)

$A$  = área da seção transversal da entrada (m<sup>2</sup>)

Se o afluente entra via tubulação circular com uma dada vazão  $Q$  (m<sup>3</sup>/s), e assumindo o valor de 1000 kg/m<sup>3</sup> para a densidade da água, a relação entre a energia de entrada, o diâmetro do tubo ( $\phi$ ) e a vazão é dada pela Equação 3.56:

$$P_{ent} = \frac{811Q^3}{\phi^4} \quad (3.56)$$

Já a energia provida pelo vento ( $P_{vento}$ ) pode ser estimada pela Equação 3.57:

$$P_{vento} = \tau_{vento} u_s A_{lagoa} \quad (3.57)$$

onde:

$u_s$  = velocidade da água na superfície da lagoa (m/s)

$A$  = área da superfície da lagoa (m<sup>2</sup>)

Entretanto, Larsen (1999) *apud* Shilton (2005) notou que a velocidade induzida pelo vento na superfície da lagoa ( $u_s$ ), é aproximadamente igual a 3% da velocidade do vento ( $u_{vento}$ ); achado que é sustentado por uma gama de estudos realizados por Wood (1997). Substituindo essa relação e a Equação 3.54 na Equação 3.57, a expressão matemática para a energia provida pelo vento se torna (Equação 3.58):

$$P_{vento} = 0,03C_d \rho_{ar} u_{vento}^3 A_{lagoa} \quad (3.58)$$

Com os avanços e disponibilidade da tecnologia na área de informática, tem-se recomendado o uso de ferramentas computacionais para incluir a velocidade do vento e sua direção em projetos e avaliações do sistema hidráulico de lagoas (SHILTON, 2001; SWEENEY, 2004; WOOD, 1997). A CFD (Fluidodinâmica Computacional) é uma dessas ferramentas. A vantagem dos métodos de análise e projeto com uso de CFD, em relação aos métodos clássicos, advém do fato de que, no primeiro caso, a tensão de cisalhamento proporcionada pela ação do vento pode ser incluída no estágio de projeto ou de análise operacional de lagoas, permitindo o conhecimento detalhado do fluxo nessas unidades (BANDA *et al.*, 2006b).

A despeito das diferentes opiniões na literatura, sabe-se que as lagoas de estabilização são atualmente concebidas com base em critérios de projeto que não levam em consideração a velocidade do vento e sua direção predominante (BANDA *et al.*, 2006b), seja o efeito desse benéfico ou não, de influência considerável ou não. Portanto, é importante a continuidade dos estudos sobre o efeito do vento e sua magnitude de influência na hidrodinâmica das lagoas, de modo a contribuir com a reflexão sobre a necessidade ou não de considerar tal variável nos projetos e avaliações de desempenho.

### 2.5.5 Métodos para avaliação hidrodinâmica em lagoas

O conhecimento do comportamento hidrodinâmico é fundamental para otimização de lagoas, já que características de mistura, presença de zonas de estagnação, zonas de troca lenta, curtos-circuitos, acúmulo de lodo e velocidades do fluido são fatores determinantes da eficiência das mesmas.

Shilton (2001) cita como métodos disponíveis para se obter essas informações os estudos com traçadores, rastreamento com *drogues* (flutuadores com adaptações) modelagem física e modelagem matemática. Entretanto, a grande maioria das pesquisas em lagoas utiliza a

técnica estímulo-resposta com o uso de traçadores (SHILTON, 2001), que tem suas limitações.

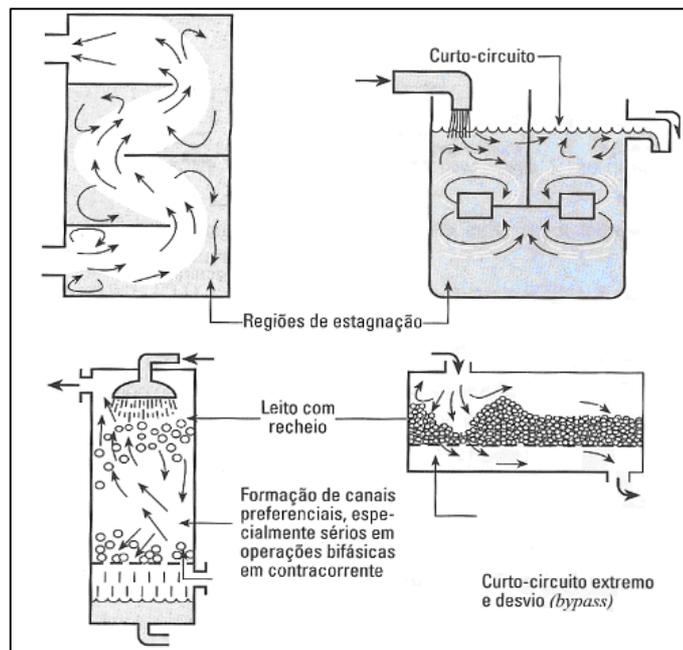
O uso combinado de ensaios com traçadores, flutuadores, modelos matemáticos e dados de monitoramento em campo parece ser o método mais eficaz para obtenção de informações a respeito do real comportamento hidrodinâmico em lagoas.

## **2.6 Traçadores**

Os desvios da idealidade que ocorrem em escoamentos reais são ocasionados por fenômenos hidrodinâmicos que podem ocorrer no interior da unidade. Alguns desses fenômenos foram descritos por Levenspiel (2000); Metcalf e Eddy (2003), Sasaki (2005) e ilustrados por Levenspiel (2000) (FIG. 3.1):

- a) Escoamento preferencial – ocorre quando grandes quantidades de elementos do fluido escoam através da unidade em tempo menor que outros;
- b) Curto-circuito – ocorre quando elementos do fluido escoam através da unidade sem percorrer todo seu interior. Este fenômeno indica deficiência de projeto e não é desejável, uma vez que diminui a eficiência do dispositivo;
- c) Zonas mortas – são regiões da unidade consideradas isoladas ou inacessíveis, onde o fluido nelas aprisionados não interage com as regiões ativas. Ou seja, não há troca de matéria entre as regiões mortas e a fração ativa do equipamento;
- d) Zonas estagnantes – são regiões da unidade onde o fluido aprisionado interage fracamente com a região ativa. A troca de matéria entre estas regiões ocorre lentamente;
- e) Reciclo – ocorre quando parcelas do fluido são recirculadas para a entrada ou ao interior da unidade;
- f) Retromistura - ocorre quando parcelas do fluido apresentam movimento na direção contrária ao fluxo principal.

Tal terminologia pode ser vista no presente trabalho na descrição dos fenômenos hidrodinâmicos observados nas unidades pesquisadas.



**FIGURA 3.1:** Ilustração de fenômenos hidrodinâmicos em escoamentos não ideais (LEVENSPIEL, 2000).

Para estudos em lagoas, Kellner *et al.* (2009) descrevem mais simplificada tais desvios por meio da compartimentalização do volume do reator em zonas advectiva, morta e de mistura. Para os autores, a zona advectiva é aquela onde a maior parte do fluxo ocorre e a principal diferença entre a zona morta e a zona de mistura é a velocidade de troca do líquido entre a zona em questão e a zona advectiva. Nesse sentido, a zona morta apresenta uma taxa de troca muito menor quando comparada à região de mistura. Ainda de acordo com os autores, as zonas mortas não fazem parte do volume pelo qual o líquido escoar; dessa maneira, o volume efetivo da lagoa é menor que o volume total e o TDH real é menor que o TDH teórico, ocorrendo então os chamados curtos-circuitos. As zonas mortas podem ser formadas por material sedimentado no fundo da lagoa, desenvolvendo bancos de lodo, e por regiões da massa líquida, principalmente do hipólímnio, quando estagnadas devido à ocorrência de estratificação térmica duradoura.

Algumas dessas anomalias do escoamento podem ser detectadas a partir dos dados experimentais obtidos com uso de traçadores, que são substâncias introduzidas em um sistema hidráulico (unidade com escoamento de fluidos), sem que suas características sejam alteradas durante a realização dos ensaios, e cuja presença no líquido pode ser detectada com precisão. Os traçadores constituem importante ferramenta na análise do comportamento hidrodinâmico

e obtenção de modelos que representem o escoamento em uma unidade. Levenspiel (2000) apresenta um dos mais conhecidos referenciais teóricos a respeito do assunto.

A rigor, pode-se definir traçador como uma espécie (química ou biológica) utilizada para “marcar” uma fase específica ou parte de um sistema. Mais especificamente, traçador é qualquer substância, ou partícula/entidade (química ou biológica), que pode ser usada para seguir, quer pontualmente ou de forma contínua, o comportamento de um determinado sistema ou de um componente, tal como volume de água, quer em ambiente aberto (hidrologia de superfície) ou subterrâneo (ambiente poroso ou fissurado) (BJØRNSTAD e MAGGIO, 2000 *apud* SILVA *et al.*, 2009).

Após compilação da literatura (LEVENSPIEL, 2000; MACEDO, 2007; METCALF e EDDY, 2003; SILVA *et al.*, 2009), pode-se considerar que um traçador ideal é aquele que atende aos seguintes requisitos:

- a) apresentar comportamento hidrodinâmico idêntico ao do fluido estudado;
- b) apresentar característica adicional que permita diferenciá-lo do fluido em estudo (identificação inequívoca);
- c) o traçador, ou esta característica adicional que o distingue, não deve existir (se possível) no meio em que o traçador será empregado (baixo *background*);
- d) o método de detecção e de medição do traçador deve ser fácil, de alta eficiência e passível de ser realizado através de equipamento simples e de baixo custo;
- e) ser conservativo, ou seja, não deve estar sujeito a perdas indesejáveis durante o trânsito entre o local de injeção e o de coleta, ou ainda, entre o local de coleta e o de medição (ter boa estabilidade);
- f) composição química não deve ser tóxica aos seres vivos;
- g) estar disponível no mercado nacional e ter baixo custo;

- h) ser facilmente miscível no líquido e não alterar significativamente as características do escoamento do fluido na unidade, nem suas propriedades, tais como densidade, viscosidade, temperatura;
- i) apresentar boa solubilidade em água limpa e em águas residuárias, não reagir com os poluentes ou com os constituintes do sistema, incluindo deixar resíduos;
- j) não ser adsorvido pela biomassa do reator, apresentando baixa difusividade molecular;
- k) apresentar facilidade de injeção no reator;
- l) não ser adsorvido em bolhas de gás, tais como CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, O<sub>2</sub>.

Os traçadores podem ser de origem natural ou artificial e de utilização interna ou externa. Os traçadores internos são elementos estáveis ou radioativos que ocorrem naturalmente no sistema sob estudo, geralmente de difícil quantificação. Já os traçadores externos são aqueles adicionados ao sistema a ser estudado (ALEXANDER e QUINLAN, 1992; SILVA *et al.*, 2009).

Dentre os tipos de traçadores externos disponíveis, citam-se os traçadores radioativos, traçadores fluorescentes, traçadores por elementos químicos, traçadores salinos e até mesmo traçadores biológicos (uso de esporos, bactérias e vírus), com vantagens e desvantagens no uso de cada tipo.

Os traçadores biológicos formam uma classe separada de traçadores, uma vez que não são solutos, mas sim uma suspensão de partículas submicroscópicas, que na água se comportam como partículas coloidais (SILVA *et al.*, 2009). De modo geral, devem apresentar as seguintes características: fácil crescimento em grandes culturas, não serem patogênicos (para animais, plantas e humanos), não estarem presentes no meio em estudo, não terem movimento próprio, entre outros (COSTA *et al.*, 2002; ROSSI *et al.*, 1998; SCHÄFER, 2004). Os principais micro-organismos utilizados como traçadores são vírus, bactérias, leveduras, protozoários e esporos. As bactérias são os microrganismos comumente utilizados em estudos hidrológicos, enquanto o uso de leveduras e protozoários é limitado devido ao tamanho e tempo de sobrevivência; já os vírus apresentam o inconveniente de alguns serem patogênicos aos seres humanos (HARVEY, 1997). Dentre os numerosos traçadores biológicos possíveis,

os bacteriófagos apresentam-se como os mais vantajosos, por serem vírus de dimensões muito reduzidas, específicos para uma bactéria hospedeira e, geralmente, serem inócuos para qualquer outro organismo. Esses traçadores apresentam menores limites de detecção que os traçadores químicos e seu impacto ambiental é praticamente nulo, dada a sua curta persistência. No entanto, estes agentes têm como inconvenientes sua forte interação com o meio físico (não são conservativos) e a necessidade de um alto grau de sofisticação para sua cultura (COSTA *et al.*, 2002; ROSSI *et al.*, 1998; SCHÄFER, 2004; SILVA *et al.*, 2009).

Traçadores químicos são compostos não-radioativos, tais como haletos (iodetos, brometos), ânions ou moléculas orgânicas que são detectáveis por análises químicas. Porém, apresentam geralmente limitações de estabilidade térmica, reatividade em potencial e altos limites de detecção. Apesar dos altos limites de detecção, o baixo custo do material não-radioativo permite a injeção de grandes quantidades, compensando a sensibilidade do método. A análise dos traçadores químicos (elementos) pode ser feita por cromatografia líquida de alta eficiência, ressonância magnética nuclear e espectrometria de massas (CHRYSIKOPOULOS e KRUGER, 1986; SILVA *et al.*, 2009).

Traçadores fluorescentes são compostos orgânicos ou inorgânicos que apresentam fluorescência, tais como os corantes fluorescentes usuais: fluoresceína, isotiocianato de fluoresceína, rodamina-B, rodamina-WT, eosina, evans blue e uranina (sal de sódio da fluoresceína). O fenômeno da fluorescência, pelo seu usual baixíssimo limite de detecção, geralmente transforma esses traçadores em elementos de alta sensibilidade analítica e baixo custo de análise (em um aparelho muito utilizado, conhecido como espectrofluorímetro). Também têm a vantagem de serem detectáveis em baixas concentrações – já que geralmente não tem concentração de *background* – e não serem tóxicos, com exceção da rodamina-B, que é relatada na literatura como potencialmente carcinogênica (SMART, 1984). Ademais, a rodamina-B possui a desvantagem de ter uma maior tendência a adsorver nos sedimentos ou em outras partículas aquáticas que não se comportam da mesma maneira hidráulica do composto do estudo (CAMARGO VALERO e MARA, 2009). De forma geral, os traçadores fluorescentes apresentam inconvenientes como risco de degradação pela ação da luz solar e adsorção à sólidos orgânicos, mas não são absorvíveis e não apresentam os problemas relacionados à densidade (SMART e LAIDLAW, 1977; LIN *et al.*, 2003; DIERBERG e DEBUSK, 2005). O mais amplamente utilizado é a rodamina-WT.

Os traçadores radioativos podem ser átomos ou moléculas marcadas isotopicamente e cujos elementos sejam radioativos, sendo bastante utilizados por apresentarem baixos limites de detecção. Os radioisótopos utilizados dependem das propriedades do material, energia de radiação e tempo de meia vida. Os traçadores radioativos são bons para medidas contínuas, pois emitem radiações (gama ou beta) com grande sensibilidade e baixa interferência. Esses fatores têm contribuído para o uso preferencial de materiais não radioativos como traçadores em estudos biológicos e ambientais (CHRYSIKOPOULOS e KRUGER, 1986; GILLILAND e CONLEY; MACEDO, 2007). São menos reativos, têm densidade próxima à da água e requerem menores quantidades nos ensaios, mas apresentam a desvantagem de dependerem de aparato mais sofisticado para leitura de dados (e por isso muitas vezes equipamentos mais caros e de difícil aquisição), bem como de pessoal treinado para manipulação dos equipamentos e para evitar que ocorram acidentes com danos ambientais mais graves.

Os traçadores salinos são classificados como químicos, mas foram tratados separadamente aqui para diferenciar do traçador “elemento químico”, analisado individualmente. São geralmente mais baratos e de mais fácil aquisição e quantificação (podendo ser utilizado um condutivímetro comum), não são tóxicos e não apresentam riscos de poluição ambiental ou à saúde, mas apresentam como desvantagens a possível adsorção no meio que está sendo avaliado, a maior densidade da solução e a necessidade de aplicação de grandes quantidades da substância para superar os valores de background na maioria dos casos em que são aplicados.

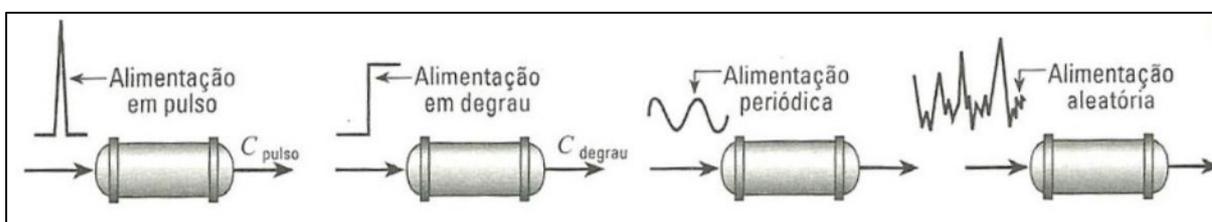
Essas e outras características, vantagens e desvantagens também são comentadas com ênfase em sistemas naturais de tratamento de esgotos, por autores como Alvarado *et al.* (2011); Keefe *et al.* (2004); Kellner *et al.* (2009); Lange *et al.* (2011); Lin *et al.* (2003); Chazarenc *et al.* (2003); Torres *et al.* (1999); Camargo Valero e Mara (2009); Whitmer *et al.* (2000); Xu *et al.* (2004).

Nos estudos hidrodinâmicos com traçadores, a curva de resposta auxilia na determinação do tempo médio em que as moléculas do fluido que escoam pelo reator permanecem em seu interior, ou seja, o tempo de detenção hidráulica real ( $TDH_{real}$ ). Também pode fornecer boas indicações a respeito do regime hidráulico de um reator e da existência de fenômenos que influenciam a sua eficiência, tais como caminhos preferenciais, curtos-circuitos, zonas mortas, zonas estagnantes, reciclo e retroalimentação do fluido.

### 2.6.1 Técnica de estímulo-resposta com uso de traçadores

A técnica de estímulo-resposta consiste na introdução de certa quantidade de um traçador na entrada do reator no início do ensaio (estímulo), com medição contínua, ou em intervalos de tempo regulares, da concentração do traçador no efluente (resposta). Conhece-se, portanto, a massa total de traçador adicionada e sua concentração inicial, obtendo como resposta a concentração do traçador no efluente em função do tempo transcorrido desde o início do ensaio.

O traçador pode ser injetado de várias formas: injeção instantânea (injeção pulso); injeção contínua; injeção gradual; injeção em forma de rampa; injeção exponencial; injeção pulsante. Levenspiel (2000) comenta os principais tipos de injeção de traçador, e alguns deles são ilustrados na FIG. 3.2. A injeção do traçador deve ocorrer de modo a minimizar a perturbação ao escoamento em estudo e permitir que todo o fluido que entra na unidade esteja igualmente “marcado” (MACEDO, 2007). A não observância destas características introduzirá modificações nos dados produzidos pelo ensaio que dificilmente poderão ser detectadas e que serão consideradas como particularidades provenientes do escoamento, quando na verdade podem não ser.



**FIGURA 3.2:** Exemplos de tipos de alimentação experimental que podem ser utilizados em ensaios de estímulo-resposta com traçadores (LEVENSPIEL, 2000).

Dentre essas técnicas de injeção de traçador em um sistema hidráulico, a alimentação do tipo pulso destaca-se pela simplicidade e economicidade. Essa técnica consiste na injeção de um traçador de concentração conhecida no início do reator de forma instantânea e registros contínuos do mesmo na saída do reator ao longo do tempo.

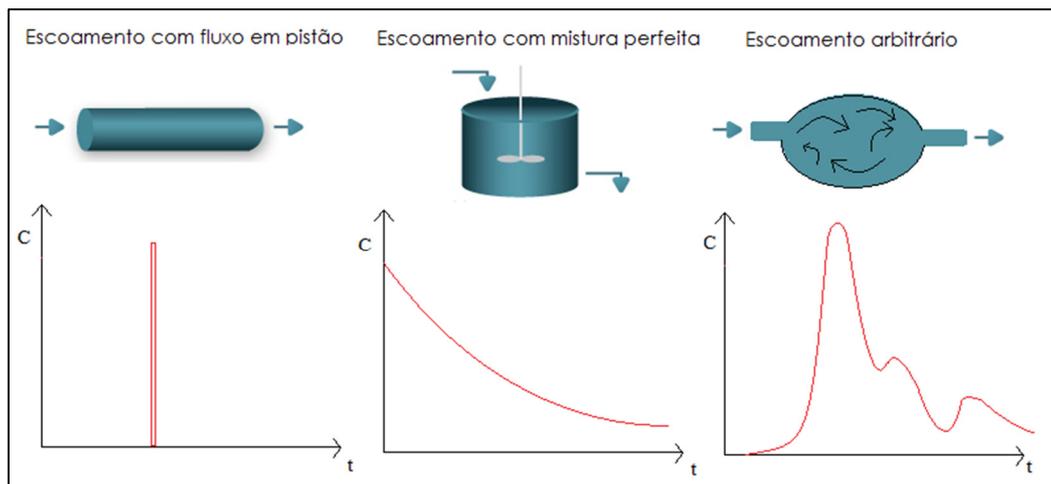
O estímulo do tipo pulso pode ser matematicamente definido pela distribuição delta de Dirac  $\delta(x)$ . Tal distribuição aplicada a um pulso no decorrer do tempo  $t$ , e na qual o pulso ocorre em  $t = t_0$ , pode ser escrita simbolicamente como (Equação 3.59):

$$\delta(t-t_0) = \begin{cases} \infty & \text{para } t = t_0 \\ 0 & \text{para } t \neq t_0 \end{cases} \quad (3.59)$$

De forma que a “largura” da curva de pulso tenda a zero e que ela seja infinitamente alta, porém com área igual a unidade. Logo, tem-se a Equação 3.60:

$$\int_0^{\infty} \delta(t-t_0) dt = 1 \quad (3.60)$$

A FIG. 3.3 ilustra respostas obtidas a partir de testes com traçador de alimentação instantânea, tipo pulso, em três tipos de regime hidráulico encontrados em reatores (fluxo em pistão, mistura completa e escoamento arbitrário). As respostas de testes em reatores reais sempre diferem, em maior ou menor grau, dos regimes ideais, de acordo com os fenômenos já mencionados.



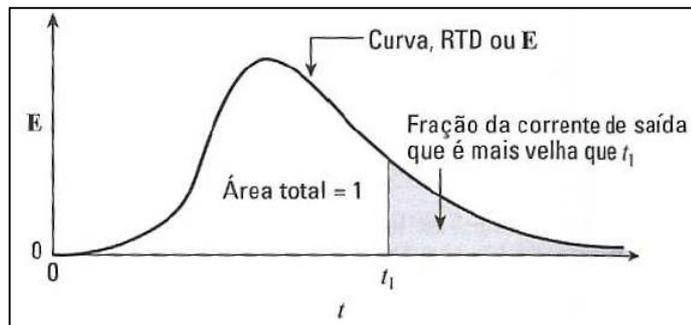
**FIGURA 3.3:** Exemplos de curvas de resposta (concentração do traçador ao longo do tempo) de ensaios em reatores de fluxo pistonado, mistura perfeita/completa ou escoamento arbitrário, após alimentação do tipo pulso (adaptado de LEVENSPIEL, 2000).

Os elementos do fluido adotam caminhos diferentes no interior do reator, que levam a tempos diferentes para atingirem a saída. Assim, define-se o parâmetro E (distribuição do tempo de saída), que representa a distribuição do tempo das partículas na saída do reator, ou simplesmente a DTR (distribuição dos tempos de residência). A unidade de tal parâmetro é

definida como o inverso do tempo ( $t^{-1}$ ). Por conveniência, ao representar a DTR de modo que a área sob a curva seja igual à unidade, ter-se-á a Equação 3.61 (LEVENSPIEL, 2000):

$$\int_0^{\infty} E \cdot dt = 1 \quad (3.61)$$

A FIG. 3.4 ilustra o procedimento de normalização da distribuição tal como sugerido na Equação 3.61.



**FIGURA 3.4:** Curva de distribuição da idade de saída ( $E$ ) ou curva da distribuição do tempo de residência (DTR) para um fluido escoando através de um reator (LEVENSPIEL, 2000).

Levenspiel (2000) destaca uma importante restrição da curva  $E$ : o fluido passa somente uma vez pelo reator, o que implica que não deve haver escoamento, difusão ou redemoinhos ascendentes na entrada ou saída do reator, caracterizando assim, a condição de contorno de sistema fechado (ao contrário, se não houvesse tal condição e os elementos de fluido cruzassem mais de uma vez o contorno do reator, ter-se-ia condição de sistema aberto).

A partir da Equação 3.61 e FIG. 3.4, tem-se que a fração da corrente de saída com idade (tempo gasto por um elemento dentro do reator) entre  $t$  e  $t+dt$  é dada pela Equação 3.62:

$$E \cdot dt \quad (3.62)$$

A fração mais nova que  $t_1$  pela Equação 3.63:

$$\int_0^{t_1} E \cdot dt \quad (3.63)$$

É a fração mais velha que  $t_1$  (área sombreada da FIG. 3.4) pela Equação 3.64:

$$\int_{t_1}^{\infty} E \cdot dt = 1 - \int_0^{t_1} E \cdot dt \quad (3.64)$$

Portanto, a curva  $E$  é considerada a distribuição necessária para considerar o escoamento de fluxo não ideal (LEVENSPIEL, 2000). Sua determinação, de forma simples, utiliza um traçador não reativo em ensaios de estimo-resposta, através de diferentes tipos de alimentação experimental já apresentados na FIG. 3.2.

Conhecendo-se o volume ( $V$ , em  $m^3$ ) do reator pelo qual o fluido escoava com vazão ( $Q$ , em  $m^3/s$ ), é possível encontrar a curva  $E$  a partir da curva  $C_{pulso}$  (curva da variação da concentração de um traçador em função do tempo na saída do reator). Para encontrar a curva  $C_{pulso}$  é necessário introduzir instantaneamente  $M$  unidades de massa de um traçador (kg ou mols) e realizar registros da concentração do mesmo em função do tempo no fluido de saída do reator (LEVENSPIEL, 2000). A partir do balanço de massa para o reator, as equações abaixo (Equações 3.65 e 3.66) são definidas com intuito de encontrar a área ( $A$ ) sob a curva  $C_{pulso}$  e a média da curva de  $C_{pulso}$  ( $\bar{t}$  = tempo de detenção hidráulica médio real =  $TDH_{real}$ ):

$$A = \int_0^{\infty} C \cdot dt \cong \sum_i C_i \cdot \Delta t_i = \frac{M}{Q} \quad [MTL^{-3}] \quad (3.65)$$

$$\bar{t} = \frac{\int_0^{\infty} t \cdot C \cdot dt}{\int_0^{\infty} C \cdot dt} \cong \frac{\sum_i t_i \cdot C_i \cdot \Delta t_i}{\sum_i C_i \cdot \Delta t_i} = \frac{V}{Q} \quad [T] \quad (3.66)$$

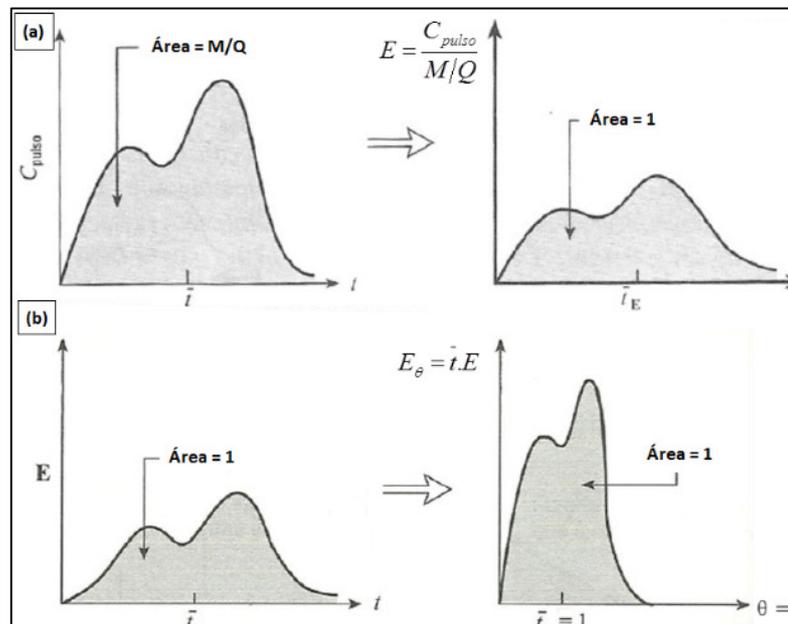
De posse da curva  $C_{pulso}$  é possível encontrar a curva  $E$  alterando a escala de concentração, de modo que a área sob a curva seja igual à unidade (LEVENSPIEL, 2000). Tal mudança pode ser obtida pela Equação 3.67:

$$E = \frac{C_{pulso}}{M/Q} \quad (3.67)$$

Levenspiel (2000) ainda apresenta outra função representante da DTR, denominada  $E_\theta$  (Equação 3.68), na qual o tempo é medido em termos do tempo médio de residência  $\theta = t/\bar{t}$ :

$$E_\theta = \bar{t} \cdot E = \frac{V}{Q} \cdot \frac{C_{pulso}}{M/Q} = \frac{V}{M} \cdot C_{pulso} \quad (3.68)$$

A FIG. 3.5a ilustra a transformação da curva experimental  $C_{pulso}$  em uma curva  $E$  e a FIG. 3.5b a transformação da curva  $E$  em  $E_\theta$ .



**FIGURA 3.5:** (a) Transformação de uma curva experimental  $C_{pulso}$  em uma curva  $E$  e (b) transformação de uma curva  $E$  em uma curva  $E_\theta$  (adaptado de LEVENSPIEL, 2000).

### 2.6.1.1 Modelo de dispersão

Para caracterizar o espalhamento de um pulso ideal de um traçador introduzido no fluxo de entrada de um reator, considera-se que um processo semelhante a difusão seja imposto ao escoamento pistonado. Chama-se tal fenômeno de dispersão longitudinal, ou simplesmente dispersão, de modo a distingui-lo da difusão molecular. O coeficiente de dispersão  $D$  (dimensão  $L^2T^{-1}$ ) representa este processo de espalhamento. Assim (LEVENSPIEL, 2000):

- $D$  grande significa um espalhamento rápido da curva de traçador
- $D$  pequeno significa um espalhamento lento
- $D = 0$  significa espalhamento inexistente; logo, escoamento pistonado

O grau de dispersão pode ser também descrito pela razão apresentada na Equação 3.69:

$$d = \frac{D}{u.L} \quad (3.69)$$

denominada número de dispersão (adimensional); sendo  $u$  a velocidade de escoamento e  $L$  o comprimento característico do reator. O inverso do número de dispersão é conhecido como número de Peclet ( $Pe$ ), e representa a razão entre a taxa de advecção de uma grandeza física pelo fluxo e a taxa de dispersão da mesma grandeza por um gradiente apropriado. Logo (Equação 3.70):

$$Pe = \frac{u.L}{D} \quad (3.70)$$

Que também pode ser obtido por meio do produto entre o número de Reynolds ( $Re$ ) e o número de Schmidt ( $Sc$ ), definido por (Equação 3.71):

$$Sc = \frac{\mu}{\rho.D} \quad (3.71)$$

Em que  $\mu$  é a viscosidade dinâmica do fluido (Pa.s ou N.s/m<sup>2</sup> ou kg/m.s) e  $\rho$  é a densidade do fluido (kg/m<sup>3</sup>).

Avalia-se  $d$  ou  $D$  por meio da curva resposta do teste de traçador. Tais variáveis estão teoricamente relacionadas à determinação do tempo de detenção hidráulica médio real  $\bar{t}$  e da variância  $\sigma^2$  (medida de espalhamento da curva, em T<sup>2</sup>). A média, para dados contínuos ou discretos, é definida como (Equação 3.72):

$$\bar{t} = \frac{\int_0^{\infty} t C dt}{\int_0^{\infty} C dt} = \frac{\sum_i t_i C_i \Delta t_i}{\sum_i C_i \Delta t_i} \quad (3.72)$$

A variância como (Equação 3.73):

$$\sigma^2 = \frac{\int_0^{\infty} (t - \bar{t})^2 C dt}{\int_0^{\infty} C dt} = \frac{\int_0^{\infty} t^2 C dt}{\int_0^{\infty} C dt} - \bar{t}^2 \quad (3.73)$$

Ou, na forma discreta (Equação 3.74):

$$\sigma^2 \cong \frac{\sum (t_i - \bar{t})^2 C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} = \frac{\sum t_i^2 C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} - \bar{t}^2 \quad (3.74)$$

Uma vez que o processo envolve mistura ou redistribuição de material devido à intrusão, cisalhamento ou vórtices/turbilhões, e visto que isto se repete um número considerável de vezes durante o escoamento do fluido através do recipiente, considera-se essas perturbações como sendo de natureza estatística, como na difusão molecular (LEVENSPIEL, 2000). Portanto, analogamente, pode-se considerar que todas as contribuições à mistura do fluido na direção  $x$  podem ser descritas por meio da equação diferencial dada pela lei de Fick adaptada ao fenômeno de dispersão, ou seja (Equação 3.75):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (3.75)$$

onde  $D$ , o coeficiente de dispersão axial ou longitudinal, é o parâmetro que caracteriza unicamente o grau de mistura completa durante o escoamento.

Na forma adimensional, onde  $z = x/L$  e  $\theta = t/\bar{t} = tu/L$ , a equação diferencial básica que representa o modelo de dispersão na forma axial se torna (Equação 3.76):

$$\frac{\partial C}{\partial \theta} = \left( \frac{D}{uL} \right) \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - \frac{\partial C}{\partial z} \quad (3.76)$$

Na qual o termo entre parêntese é o já mencionado número de dispersão  $d$ . Assim:

- $D/uL \rightarrow 0$ , indica dispersão negligenciável; logo, escoamento pistonado
- $D/uL \rightarrow \infty$ , indica grande dispersão; logo, escoamento com mistura perfeita

De acordo com Metcalf e Eddy (2003), para fins práticos, os seguintes valores do número de dispersão podem ser utilizados para avaliar o grau de dispersão em unidades de tratamento de esgotos para (TAB. 3.2):

**TABELA 3.2** - Graus de dispersão em unidades de tratamento de esgotos (METCALF e EDDY, 2003).

<b>Grau de dispersão</b>	<b>Número de dispersão (d)</b>
Nenhuma dispersão	$d = 0$ (fluxo em pistão ideal)
Dispersão baixa	$d \leq 0,05$
Dispersão moderada	$0,05 < d < 0,25$
Dispersão elevada	$d \geq 0,25$
	$d \rightarrow \infty$ (mistura completa)

Segundo Levenspiel (2000), este modelo representa, de forma bem satisfatória, escoamentos que não se desviem em demasia do fluxo em pistão.

O modelo de dispersão tal como apresentado pode ser subdividido em modelo de dispersão de pequena intensidade e modelo de dispersão de grande intensidade:

➤ Modelo de dispersão de pequena intensidade (para  $D/uL < 0,01$ )

Se for fornecido um pulso ideal a um fluido que está escoando, observar-se-á uma modificação desse pulso devido à dispersão. Para pequenas extensões de dispersão ( $D/uL < 0,01$ ), a forma do espalhamento na curva do traçador não sofre mudança significativa à medida que o traçador passa pelo ponto de medição (durante o tempo em que estiver sendo medido). Nestas condições, a solução da Equação 3.76 resulta em uma família de curvas de Gauss (ou curvas normais), simétricas, matematicamente descritas por (LEVENSPIEL, 2000):

$$C = \frac{1}{2\sqrt{\pi(D/uL)}} e^{\left[ \frac{(1-\theta)^2}{4(D/uL)} \right]} \quad (3.77)$$

que representa as equações:

$$E_\theta = \bar{t} \cdot E = \frac{1}{\sqrt{4\pi(D/uL)}} e^{\left[ \frac{(1-\theta)^2}{4(D/uL)} \right]} \quad (3.78)$$

com

$$E = \sqrt{\frac{u^3}{4\pi DL}} e^{\left[ \frac{(L-ut)^2}{4(D/uL)} \right]} \quad (3.79)$$

e

$$\bar{t}_E = \frac{V}{Q} = \frac{L}{u} \quad \text{ou} \quad \bar{\theta}_E = 1 \quad (3.80)$$

$$\sigma_\theta^2 = \frac{\sigma_t^2}{\bar{t}^2} = 2 \left( \frac{D}{uL} \right) \quad \text{ou} \quad \sigma^2 = 2 \left( \frac{DL}{u^3} \right) \quad (3.81)$$

A solução dada por essas equações é para a condição de sistema fechado. Todavia, para pequenas intensidades de dispersão, essas equações podem ser utilizadas para aproximar a solução em reatores fechados ou abertos no que diz respeito às condições de contorno (LEVENSPIEL, 2000; METCALF e EDDY, 2003).

Ao se comparar com a expressão base do modelo gaussiano, é possível observar que o termo  $D/uL$  é o parâmetro característico das curvas, de forma que ele pode ser determinado em uma curva experimental a partir do cálculo da variância, pela medição da sua altura máxima ou sua largura no ponto de inflexão ou ainda encontrando a largura que inclui 68% da área.

Para este modelo de pequenas extensões de dispersão, duas importantes simplificações podem ser feitas, de acordo com Levenspiel (2000): a aditividade dos tempos de residência e aditividade das variâncias. Essa última permite tratar qualquer alimentação de traçador com uma única injeção, não importando qual seja sua forma, assim como extrair a variância da curva  $E$  do reator. Assim, escrevendo para uma alimentação na forma de injeção:

$$\Delta\sigma^2 = \sigma_{saída}^2 - \sigma_{entrada}^2 \quad (3.82)$$

então

$$\frac{\sigma_{saída}^2 - \sigma_{entrada}^2}{(\bar{t}_{saída} - \bar{t}_{entrada})^2} = \frac{\Delta\sigma^2}{(\Delta\bar{t})^2} = \Delta\sigma_{\theta}^2 = 2\left(\frac{D}{uL}\right) \quad (3.83)$$

Deste modo, não importará a curva de alimentação que o valor de  $D/uL$  do reator pode ser encontrado.

➤ Modelo de dispersão de grande intensidade (para  $D/uL > 0,01$ )

Considera-se neste modelo que há um grande desvio do escoamento pistonado, de forma que a resposta ao pulso de injeção de traçador é mais espalhada, passando pela saída de forma suficientemente lenta para provocar mudança em sua forma, o que resulta em uma curva  $E$  não simétrica.

Se este grande desvio do escoamento pistonado ocorre em reator de sistema fechado (o fluido entra e sai do vaso apenas uma única vez, significando, que não deve haver escoamento ou

difusão ou redemoinhos ascendentes na entrada ou na saída) pode-se obter a curva por métodos numéricos, ou avaliar exatamente sua média e sua variância como foi realizado pela primeira vez por van der Laan (1958) *apud* Levenspiel (2000). Deste modo, tem-se as Equações 3.85 e 3.85:

$$\bar{t}_E = \bar{t} = \frac{V}{Q} \quad \text{ou} \quad \bar{\theta}_E = \frac{\bar{t}_E}{\bar{t}} = \frac{\bar{t}_E Q}{V} = 1 \quad (3.84)$$

$$\sigma_{\theta}^2 = \frac{\sigma_t^2}{\bar{t}^2} = 2 \left( \frac{D}{uL} \right) - 2 \left( \frac{D}{uL} \right)^2 \left[ 1 - e^{-uL/D} \right] \quad (3.85)$$

Já se o vaso é de contorno aberto (os elementos de fluido podem cruzar mais de uma vez os contornos do sistema em análise), a expressão analítica para a curva  $E$  não é complexa, e os resultados são dados pelas Equações 3.86 a 3.89, deduzidas pela primeira vez por Levenspiel e Smith (1957) *apud* Levenspiel (2000):

$$E_{\theta} = \frac{1}{\sqrt{4\pi(D/uL)\theta}} e^{\left[ \frac{(1-\theta)^2}{4\theta(D/uL)} \right]} \quad (3.86)$$

$$E_t = \frac{u}{\sqrt{4\pi Dt}} e^{\left[ \frac{(L-ut)^2}{4Dt} \right]} \quad (3.87)$$

$$\bar{\theta}_E = \frac{\bar{t}_E}{\bar{t}} = 1 + 2 \left( \frac{D}{uL} \right) \quad \text{ou} \quad \bar{t}_E = \frac{V}{Q} \left( 1 + 2 \frac{D}{uL} \right) \quad (3.88)$$

$$\sigma_{\theta}^2 = \frac{\sigma_t^2}{\bar{t}^2} = 2 \left( \frac{D}{uL} \right) + 8 \left( \frac{D}{uL} \right)^2 \quad (3.89)$$

Conforme citado por Levenspiel (2000), as experiências mostram que o modelo de dispersão representa bem o escoamento em leitos de enchimento, assim como quando o escoamento é

turbulento. Entretanto, o mesmo autor alerta que deve-se ter cautela ao utilizar o modelo de dispersão onde a mistura completa for grande, particularmente se o sistema não for fechado.

Conforme já mencionado, os ensaios de traçadores e as análises matemáticas das curvas de resposta podem fornecer o valor de  $D$  para o reator. Entretanto, em casos de impossibilidade de realizar tais testes (inviabilidade técnica ou econômica), projetistas e pesquisadores têm utilizado modelos em menor escala e relações empíricas (METCALF e EDDY, 2003). Um valor aproximado de  $D$  para grandes valores de número de Reynolds é dado pela Equação 3.90 (DAVIES, 1972):

$$D = 1,01 \cdot \nu \cdot Re^{0,875} \quad (3.90)$$

onde:

$D$  = coeficiente de dispersão (m<sup>2</sup>/s)

$\nu$  = viscosidade cinemática (m<sup>2</sup>/s)

$Re$  = número de Reynolds (-)

## 2.6.2 Traçadores em lagoas

Provavelmente, o primeiro estudo com traçadores em lagoas ocorreu em Logan, Utah, nos Estados Unidos, utilizando Rodamina WT (MANGELSON e WATTERS, 1972). A partir desse, vários outros estudos foram desenvolvidos, como Racault *et al.* (1984); Chapple (1985); Macdonald e Ernst (1986); Marecos do Monte e Mara (1987); Moreno (1990); Uluatam e Kurum (1992); Pedahzur *et al.* (1993); Fredrick e Lloyd (1996); Wood (1997); Salter (1999); Brissaud *et al.* (2000); Shilton *et al.* (2000); Vorkas e Lloyd (2000); Aldana *et al.* (2005); Short *et al.* (2010) e Alvarado *et al.* (2012a).

Interessante destacar as pesquisas de Fredrick e Lloyd (1996), que utilizaram *Serratia marcescens* como traçador na determinação do TDH e zonas de curto-circuito em uma lagoa de estabilização no Reino Unido. Esses autores observaram redução do TDH médio de 11,5 dias (teórico) para menos de dois dias, com o aparecimento do pico do traçador entre 3 e 6 h após a injeção. Os autores não observaram condições de estratificação térmica na lagoa e atribuíram o curto-circuito existente à atuação dos ventos.

Já Salter (1999) utilizou como traçador o fluoreto de sódio em lagoas na Inglaterra com TDH extremamente curto (cerca de 26h). Os estudos indicaram variação significativa entre ensaios

com traçadores na mesma lagoa, que o autor sugeriu como ocasionado pela interferência das condições climáticas e eventos relacionados (como vento e estratificação térmica).

Moreno (1990) utilizou como traçador a água com o isótopo do hidrogênio trítio ( $^3\text{H}_2\text{O}$ ) em lagoas da Espanha. A pesquisa revelou percentuais de volume morto nas lagoas na faixa de 10 a 42%. Moreno também concluiu que o comportamento das lagoas estudadas se assemelhou a reatores de mistura completa a um nível de confiança de 99%.

Camargo Valero e Mara (2007) utilizaram cloreto de amônio marcado ( $^{15}\text{NH}_4\text{Cl}$ ) como traçador em uma lagoa de maturação em escala piloto no Reino Unido, não necessariamente para avaliação hidrodinâmica, mas com o intuito de acompanhar as transformações do íon amônio associadas com a absorção por algas e subsequente sedimentação.

Cavalcanti *et al.* (2001a), estudando lagoa de polimento, utilizaram o cloreto de potássio (KCl) como traçador químico, medindo a concentração de potássio no efluente final.

Peña *et al.* (2000) utilizaram cloreto de lítio (LiCl) em ensaios de traçador em lagoas anaeróbias na Colômbia. Segundo os autores, este composto tem sido amplamente divulgado como um bom traçador, visto apresentar taxa de aderência a sólidos muito baixa (o que é requerido para ensaios em lagoas). Os resultados obtidos mostram que o acúmulo de lodo e o posicionamento incorreto de entradas e saídas influenciam o desempenho hidráulico das lagoas. Os valores numéricos de dispersão obtidos mostraram a predominância de padrões de fluxo de mistura dentro das lagoas. No entanto, foi relatada a presença de curtos-circuitos e zonas mortas.

Torres *et al.* (1997) e Torres *et al.* (2000) relataram os experimentos feitos em uma lagoa facultativa utilizando a sulfo-rodamina-B como traçador. Os pesquisadores verificaram que o TDH real foi de até 20% do TDH teórico. Segundo os autores, o volume ativo na lagoa apresentou comportamento hidráulico de reator em mistura completa.

Kellner *et al.* (2009) utilizaram rodamina-B em um estudo para verificação da interferência da estratificação térmica em uma lagoa facultativa e uma de maturação. Nos três ensaios hidrodinâmicos validados, embora os tempos de detenção hidráulico real obtidos tenham sido menores que os teóricos, os números de dispersão calculados, bem como as curvas de saída, mostraram características de reatores de mistura completa, com presença de zonas mortas e

volume útil de aproximadamente 60% na lagoa facultativa e 30% na lagoa de maturação. Tais autores também observaram convergência entre os testes realizados e o modelo matemático empregado para estimativa do volume útil das lagoas.

Wen e Qian (1991) realizaram estudos de traçadores em três lagoas experimentais na China, obtendo para essa o número de dispersão e o tempo de detenção hidráulica médio. Eles identificaram zonas de estagnação nos cantos de uma lagoa quadrada e nas redondezas e próximo à superfície das chicanas em lagoas chicaneadas. Em comparação com a lagoa quadrada, as lagoas com chicanas apresentaram menor grau de curto-circuito, e padrão de fluxo mais próximo ao do regime pistonado.

Os estudos de Pedahzur *et al.* (1993) com Rodamina em lagoa em Israel revelaram o aparecimento do pico na saída em 15 a 20 horas após a injeção do traçador (o TDH teórico da lagoa era de 5 dias), seguido de uma longa cauda de baixas concentrações.

Grande parte das pesquisas reporta o uso de rodamina-WT como traçador. MacDonald e Ernst (1986) avaliaram a eficiência da desinfecção de lagoas de maturação em dois sistemas de tratamento de esgoto na Austrália conduzindo ensaios de traçador com rodamina. Os autores relataram a existência de curto-circuito em ambas as lagoas. Shilton (2000) utilizou rodamina-WT em uma lagoa da Nova Zelândia. Também o fez Wood (1997) em dez lagoas na Austrália; Short *et al.* (2010) em lagoas em escala piloto e Coggins *et al.*, (2017) em lagoas de maturação e facultativa no mesmo país. Alvarado *et al.* (2011, 2012a, 2012b) apresentam resultados da utilização desse traçador em lagoa de estabilização em Cuenca – Equador.

Beyene e Rao (2013) avaliaram o desempenho hidráulico de uma lagoa facultativa secundária em escala real na Etiópia por meio de ensaios com rodamina-WT. Os testes foram realizados durante os meses mais frios do ano, de forma a evitar os efeitos da estratificação térmica. Os resultados indicaram pobre eficiência hidráulica da lagoa, com grave indícios de curto-circuito e grandes zonas mortas (indicadas pela longa cauda de curva DTR). O TDH real médio encontrado (7,57 dias) foi bem inferior ao teórico (16,1 dias).

Praticamente todos os pesquisadores que utilizaram traçador no estudo da hidrodinâmica de lagoas observaram a existência de curto-circuito hidráulico. Shilton (2001) sugere que este comportamento é, na verdade, uma característica inerente a todos os sistemas de lagoas.

Segundo Dorego e Leduc (1996), o período de coleta em ensaios com traçadores em lagoas deve ser no mínimo duas vezes o TDH teórico. Para Simi e Mitchell (1999), em seus estudos sobre tratamento de efluentes em refinaria de petróleo, o período de coleta de amostras deve ser de três vezes o TDH; valor esse também recomendado por Kellner e Pires (1998). Shilton (2005) menciona que o tempo necessário para que o traçador deixe o sistema pode ser de até cinco vezes o TDH teórico da lagoa. Outros autores, como Moreno (1990), sugerem que basta acompanhar a concentração efluente durante duas vezes o TDH teórico.

Em termos de concentração do traçador a ser empregada, há de se observar os limites máximos e mínimos de detecção do aparelho analisador, além do *background* na lagoa relativo ao traçador utilizado. Quanto a esse último ponto, Headley e Kadlec (2007) citam, junto com demais recomendações práticas para estudos de traçador em *wetlands*, a necessidade de o traçador superar de 10 a 20 vezes o valor de *background* do fluido em análise.

Outras observações para ensaios em lagoas são apresentadas por Kellner e Pires (1998), que recomendam a obtenção de pelo menos 10 pontos entre o início do teste e o THD esperado e por Yanez (1986), recomendando que o intervalo máximo entre amostragens não ultrapasse 24h. De uma forma geral, para validação do experimento é necessário recuperar no mínimo 85% da massa inicial do traçador injetado (COSSIO, 1993).

Para caracterizar um pulso em um teste com traçador em lagoas, Bracho *et al.* (2009) recomendam que a duração de aplicação seja inferior a 2% do TDH do sistema analisado. Thirumurthi (1969) e Marske e Boyle (1973) recomendam proporção semelhante, de 1/60 do TDH.

## **2.7 Drogues (flutuadores com adaptações)**

Os *drogues* são objetos flutuantes dispostos em corpos aquáticos para medição e determinação da velocidade e do padrão do fluxo. Vários são os registros do uso de *drogues* em pesquisas envolvendo corpos d'água de grandes dimensões, como em estudos de correntes oceânicas. Josanto e Sarma (1985), por exemplo, em seus estudos oceanográficos, utilizaram flutuadores com bandeiras e luz para noite, de forma a facilitar a visualização e demarcação

do percurso. Para registro da trajetória, os *drogues* eram acompanhados pela equipe em um barco (JOSANTO e SARMA, 1985).

Em menor escala, Martin *et al.* (1990) utilizaram *drogues* para seus estudos em transportes advectivos em pequenos viveiros de aquicultura. O movimento *drogue* foi registrado por imagens de vídeo e, a partir dessas, as velocidades calculadas.

Alguns pesquisadores utilizaram variações diversas de *drogues* em lagoas de estabilização, utilizando-os como ferramenta de análise de fluxo e validação de modelos, tal como apresentado no item seguinte.

### **2.7.1 Uso de *drogues* em lagoas**

Apesar de pouco utilizada, a técnica de rastreamento com *drogues* pode ser mais adequada para análises hidráulicas em lagoas que o uso de traçadores (PEÑA *et al.*, 2000; TORRES *et al.*, 1997; TORRES *et al.*, 2000), devido à sua simplicidade e baixo custo e principalmente quando se compara com os possíveis impedimentos associados ao uso de traçadores químicos em lagoas de escala real. As limitações do método incluem a natureza bidimensional do movimento do *drogue*, a interferência potencial do vento e a incapacidade de extrapolar os resultados do rastreamento para determinar o TDH real (FYFE *et al.*, 2007). Contudo, o rastreamento com o *drogue* pode fornecer informações úteis a respeito do padrão de mistura predominante de uma lagoa, bem como da incidência e extensão de curtos-circuitos e zonas mortas. Como alternativa, a modelagem em fluidodinâmica computacional (CFD) tem sido utilizada para esse propósito, no entanto, este pode ser um exercício complexo, que demanda muito tempo e um que ainda exige calibração e verificação com dados de campo (FYFE *et al.*, 2007).

Mangelson (1971) utilizou *drogues* para realizar uma observação geral das correntes de fluxo em lagoas de estabilização, constatando que os mesmos não se moviam diretamente para a saída, e sim circulares e em deriva à montante. Mangelson sugeriu que a posição da tubulação de entrada era o principal condicionador do padrão de fluxo observado na lagoa.

Fredrick e Lloyd (1996) utilizaram laranjas como *drogues*, introduzidas na tubulação de entrada de uma lagoa facultativa, de forma a visualizar o padrão de fluxo. Assim como no trabalho de Mangelson, não houve qualquer tipo de quantificação nos ensaios.

Posteriormente, Vorkas e Lloyd (2000) utilizaram também laranjas como *drogues* em uma lagoa facultativa em Ginebra, Colômbia, que, em conjunto com testes com um traçador, auxiliaram na análise do efeito do vento no padrão de fluxo na lagoa.

Nesta mesma linha dos estudos a respeito do impacto do vento no desempenho de lagoas, Wong e Lloyd (2004) utilizaram pequenas frutas (“*berries*”) de aproximadamente 7 mm de diâmetro como flutuadores na superfície e vários tipos de mini *drogues* com atuadores para detectar fluxos sub-superficiais. Os movimentos dos *drogues* foram registrados com uma câmara digital e posteriormente analisados para obtenção de padrões e velocidades, bem como análise em conjunto com resultados de um teste com traçador.

Barter (2003) utilizou pequeno *drogue* em lagoa de oxidação na Nova Zelândia com o objetivo de obter informações sobre a velocidade e movimento do fluido. O *drogue* foi montado a partir de tubo de PVC flexível, estruturado com fio de aço em espiral, e contendo furos de 25 mm ao longo de todo o comprimento. O tubo foi posicionado verticalmente e ficava submerso, mas era conectado à uma esfera de poliestireno que servia como flutuador e a um peso de chumbo de 20g que servia de lastro. Em associação ao *drogue*, o autor fez análise qualitativa da dispersão do fluido com uso de rodamina-WT como corante e acompanhamento em um pequeno barco com auxílio de um GPS de mão. O autor relata que: (i) os *drogues* seguiram com precisão o movimento e velocidade do corante injetado; (ii) o movimento e velocidade do fluido na lagoa foram determinados pelas pás do misturador da lagoa; e (iii) a direção do vento teve pequena influência na velocidade e movimento do fluido, mas em áreas não afetadas diretamente pelas pás do misturador (nas áreas próximas às pás, nenhuma influência foi observada). O estudo demonstrou que o uso combinado de corante e *drogues* apresenta relativamente baixo custo e constitui meio eficaz de determinar velocidades e movimentos do fluido em lagoas. Velocidades médias entre 0,4 e 14,7 cm/s foram observadas na lagoa. O autor recomenda o uso de métodos semelhantes para ajudar na validação de modelos computacionais.

Vega *et al.* (2003) mediram a velocidade do fluido em uma lagoa anaeróbia com uma espécie de *drogue* composto de tubos de PVC, de 25 mm de diâmetro e 1,2 m de comprimento, tampados em ambas as extremidades e preenchidos com areia até flutuarem na vertical com 90% do comprimento submerso. Os valores médios de velocidade medidos em diferentes

pontos foram reprodutíveis e julgados confiáveis. Valores de velocidade nos experimentos variaram de  $1,89 \times 10^{-3}$  a  $7,68 \times 10^{-3}$  m/s, dependendo da localização ponto.

Aparentemente, o primeiro monitoramento quantitativo com *drogues* em lagoa de estabilização foi realizado por Shilton e Kerr (1999). Os autores rastrearam os *drogues* utilizando teodolitos, registrando a posição dos mesmos. Uma série de leituras ao longo do tempo possibilitou a obtenção de vetores de velocidade do fluxo. Os *drogues* foram montados com um flutuador preenchido com água (de forma a minimizar a área exposta à ação dos ventos), conectado a placas de PVC de 20 cm x 20 cm em forma de cruz, que servia de vela ou atuador.

Outros autores utilizaram o dispositivo apresentado por Shilton e Kerr (1999), ou variações dele. Fyfe *et al.* (2007), por exemplo, utilizaram a técnica em uma lagoa de um estábulo leiteiro na Austrália. Os ensaios com o *drogue* nesse trabalho revelaram padrões de vórtices de mistura dentro da lagoa, com velocidades mais elevadas ao longo do perímetro (bordas) e velocidades mais baixas no centro. Se o efluente estivesse seguindo a trajetória do *drogue* ao longo do perímetro, levaria 45 minutos para atingir a saída. Os autores registraram velocidades na lagoa relativamente mais elevadas em comparação com aquelas registradas em outros estudos com *drogues*. Observaram também que o fluxo de entrada contribuiu para formação de linhas de fluxo do tipo “jato”, causando curto-circuitos. De acordo com os autores, a influência desse jato foi limitada aos primeiros 15m da entrada, sugerindo que os curto-circuitos ocorrem apenas sob condições de fluxos intensos na entrada. Também foi observado nesse estudo que uma quantidade de *drogues* não se deslocou ao longo da lagoa, permanecendo em movimentos oscilatórios nos arredores da região de entrada. Os autores atribuíram tal comportamento à formação de pequenos remoinhos, o que, por vezes, aprisionou e impulsionou os *drogues* em contrafluxo.

Casarotti *et al.* (2012) avaliaram a influência do vento em diferentes profundidades de lagoa facultativa em escala real, com uso de flutuadores compostos por tubos verticais de PVC parcialmente preenchidos com brita 1. Os flutuadores foram concebidos com diferentes dimensões (15, 25 e 35 cm de comprimento) e os atuadores foram também feitos de placas encaixadas em forma de cruz, presos à base de cada tubo.

Passos *et al.* (2014a) adaptaram o *drogue* de Shilton e Kerr com introdução de um segmento de tubo de PVC fechado que funcionou como um flutuador. No interior desse tubo foi

embutido um GPS de navegação, programado para registro automático do trajeto percorrido pelo equipamento durante todo o período que permaneceu em uma lagoa facultativa (escala real). O *drogue*, concebido e montado como parte da pesquisa, apresentou resultados amplamente satisfatórios. Constatou-se limitação em relação à memória interna do GPS (para o caso de grandes lagoas) e a própria configuração do aparelho. O vento pareceu não influenciar a trajetória do *drogue*, nem houve perda de sinal devido à imersão no fluido. As trajetórias registradas corresponderam bem ao verificado em campo e no modelo em CFD desenvolvido para a mesma lagoa. Concomitantemente ao uso do dispositivo, os autores também utilizaram laranjas como *drogues* e observaram que essas foram claramente impulsionadas pelo vento, já que todas se moveram de acordo com a direção predominante do vento.

Shilton e Bailey (2006) utilizaram *drogues* em lagoa de escala reduzida (protótipo de dimensões de 2,715 m x 1,750 m x 125 mm). Os *drogues* eram tubos preenchidos com água com as partes visíveis pintadas de preto. A lagoa era filmada e um sistema de computadores conectados à câmera registrava o trajeto dos *drogues*. Segundo os autores, a técnica de processamento de imagem para o rastreamento de *drogues* demonstrou ser um modo particularmente eficaz de quantificação do regime hidráulico em lagoas e pode ser considerada como valioso complemento aos estudos de traçador tradicionais. Ainda segundo os autores, a técnica pode ser utilizada ao longo de dias, com a vantagem de destacar claramente eventuais flutuações no comportamento das lagoas que de outra forma poderiam passar despercebidas. Velocidades médias entre 0,4 e 14,7 cm/s foram observadas na lagoa.

Em lagoa facultativa na cidade de Natal – RN, Meneses (2006) realizou ensaios com um corante utilizado como traçador e com cocos e laranjas verdes utilizados como *drogues*. A partir dos ensaios com os *drogues*, Meneses constatou a grande influência que o vento teve na superfície da lagoa.

No geral, os estudos apontaram a técnica de rastreamento *drogues* como uma boa auxiliar nos estudos da hidrodinâmica de lagoas, servindo de complemento aos tradicionais ensaios com traçadores.

## **2.8 Fluidodinâmica Computacional (CFD)**

### **2.8.1 Definição, histórico e aplicações**

A Fluidodinâmica Computacional (CFD – *Computational Fluid Dynamics*) é uma ferramenta matemática e computacional empregada para prever ou analisar fenômenos físicos ou físico-químicos que ocorrem em escoamentos de fluidos dentro de um volume pré-definido, ou fora dele, e que podem ser relacionados com a ação de fatores como dispersão, difusão, convecção, interação com o ambiente externo, condições de contorno e turbulência.

Programas de simulação em CFD começaram a aparecer no início dos anos de 1980, com o desenvolvimento dos estudos de algoritmos matemáticos complexos, e exigiam poderosos computadores, conhecimento profundo da dinâmica dos fluidos e grandes quantidades de tempo para criar simulações. Consequentemente, CFD permaneceu por algum tempo uma ferramenta utilizada quase exclusivamente em pesquisas.

Os recentes avanços no poder de computação, juntamente com gráficos poderosos e interfaces 3D interativas, resultaram na criação de modelos de CFD que permitem análises de resultados com muito menos trabalho, reduzindo o tempo e, portanto, os custos envolvidos. Atualmente, modelos avançados contêm algoritmos que permitem soluções robustas de escoamento de fluidos em tempo razoável.

A partir do século XXI, a utilização de CFD se expandiu amplamente no setor comercial, em particular devido ao crescimento acelerado da potência dos computadores; desenvolvimento de pacotes de CFD disponíveis comercialmente, voltados para aplicação flexível em qualquer problema de fluxo; e aumento da disponibilidade de interfaces amigáveis de CFD para definição do problema e visualização da solução (SHILTON, 2001).

Existem vários problemas de mecânica dos fluidos nos quais CFD pode ser aplicada. Os temas mais pesquisados estão na área da Engenharia Aeronáutica (aerodinâmica de aviões, turbinas, asas etc.), Engenharia Mecânica (sistemas automotivos, motores, fluidos lubrificantes etc.), Engenharia Química (reatores, transferências de calor e massa, geração de energia etc.) e Engenharia Ambiental (dispersão de poluentes em solos, na atmosfera e em corpos d'água, sistemas hidráulicos etc.). Apesar da maioria dos estudos e aplicações se concentrar nessas áreas, há utilizações na medicina (fluxo do sangue nos vasos sanguíneos) e até mesmo nos esportes (aerodinâmica em veículos de corrida, natação, ciclismo). Com todas

essas vantagens e possíveis aplicações, a *Computational Fluid Dynamics* é hoje uma ferramenta consistente, ajudando a reduzir as escalas de tempo dos projetos e melhorar os processos de engenharia e ciências correlatas de todo o mundo.

## **2.8.2 Visão geral da matemática do CFD**

Basicamente, as etapas da modelagem em CFD envolvem a construção de uma geometria que represente o problema; desenvolvimento de uma malha de cálculo em todo o domínio da geometria; definição de condições de contorno, modelos de cálculos e equações de interesse; processamento, visualização e análise. O método consiste na resolução das equações governantes do escoamento por meio de um processo numérico em cada elemento de malha. Posteriormente, os resultados podem ser analisados numericamente e visualmente, com uso de gráficos, figuras, animações etc. e comparados com dados experimentais para calibração e validação.

As equações governantes da dinâmica dos fluidos, bases de fundamento da modelagem em CFD, representam as leis da física de conservação de massa, quantidade de movimento e de energia. A lei de conservação de massa advém de uma das propriedades da matéria, que não pode ser criada, nem destruída (lei da continuidade), de forma que em cada volume de controle do modelo CFD a lei da conservação exige que um balanço de massa seja aplicado. Em relação à quantidade de movimento, as equações são definidas a partir da segunda lei de Newton do movimento, que diz que o somatório das forças agindo sobre um elemento é igual ao produto da sua massa pela aceleração do elemento. Já a equação da conservação da energia é derivada do balanço fornecido pela primeira lei da termodinâmica.

A partir das leis básicas, as equações governantes são manipuladas matematicamente, apresentadas em sua forma diferencial parcial e posteriormente discretizadas para aplicação em modelos de CFD. Equações que descrevem outros processos, tais como combustão, radiação e transformações químicas, também podem ser resolvidas em conjunto com as equações básicas. Muitas vezes, um modelo de aproximação é usado para derivar equações adicionais, sendo modelos de turbulência um exemplo particularmente importante.

No escoamento turbulento, as flutuações de velocidade influenciam o progresso do escoamento médio, fazendo com que exiba, aparentemente, aumento da resistência à deformação. Em outras palavras, o movimento flutuante age sobre o movimento médio de tal

forma que a viscosidade aparentemente aumenta. Isto é o fundamento teórico central no desenvolvimento de um grande número de modelos de turbulência conhecidos como modelos de viscosidade turbulenta ou modelos de primeira ordem (SCHLICHTING e GERSTEN, 2003). Existe uma larga gama de modelos de viscosidade turbulenta que são classificados pelo número de equações diferenciais usados, podendo variar de zero (modelo algébrico) a duas equações. Os modelos de duas equações apresentam maior generalidade e oferecem uma boa harmonização entre esforço numérico e precisão computacional (ANSYS, 2013), sendo assim os mais usados na prática de CFD. Apesar disso, cada modelo apresenta um número grande de características próprias o que dificulta a escolha da formulação mais apropriada para cada caso em análise. Cita-se como modelos de turbulência os modelos  $k-\varepsilon$  (produção e dissipação de energia cinética turbulenta),  $k-\omega$  (frequência dos turbilhões) e *SST* (*Shear Stress Transport* – modelo híbrido do  $k-\varepsilon$  e  $k-\omega$ ). Versteeg e Malalasekera (2007) apresentam referencial teórico completo a respeito desses e de outros modelos disponíveis.

Um referencial teórico completo a respeito das equações fundamentais e suas derivações pode ser encontrado em diversos livros textos, como Versteeg e Malalasekera (2007) e Tu *et al.*, (2012).

Outra etapa importante da solução numérica é a definição da malha. Ela representa a discretização do domínio de solução. A malha é considerada como uma coleção de volumes algoritmicamente descritos cobrindo toda a área do domínio coincidindo com as fronteiras. Os volumes são referidos como células ou elementos de malha. Os vértices dos volumes são referidos como nós da malha.

Há uma série de métodos de solução diferentes usados em códigos CFD. O mais comum é conhecido como a técnica de volumes finitos. Nesta técnica, a região de interesse é dividida em pequenas sub-regiões chamadas volumes de controle, cada um com seus nós e vértices. As equações são discretizadas e resolvidas iterativamente para cada volume de controle. Como resultado, uma aproximação do valor de cada variável em pontos específicos ao longo do domínio pode ser obtida. Desta forma, torna-se possível uma visão completa do comportamento do fluxo.

### 2.8.3 CFD em lagoas de estabilização

Os principais mecanismos de remoção de poluentes em uma lagoa de estabilização são de natureza biológica, onde os próprios microrganismos presentes naturalmente no esgoto degradam a matéria orgânica e atuam no tratamento do efluente. Entretanto, apesar de o tratamento ser essencialmente biológico, a remoção ocorre associada a parâmetros físicos, e maior eficiência pode ser conseguida com ajuste desses parâmetros, como a configuração geométrica da lagoa, locação dos dispositivos de entrada/saída e o tempo de detenção hidráulica.

Mesmo que bastante discutido e consolidado na literatura, o comportamento hidrodinâmico das lagoas de estabilização geralmente é descrito de forma simplificada, tanto nos projetos como nas avaliações de desempenho, já que o equacionamento de todas as variáveis e relações envolvidas no escoamento do fluido é complexo e muitas vezes inviável do ponto de vista de tempo e esforço. Além disso, o sistema hidráulico é geralmente descrito como se fosse uma caixa preta, sem análises de fluxo no interior das lagoas (SHILTON, 2001). Os modelos nessa perspectiva se baseiam na simplificação das leis físicas que regem o escoamento. Alternativamente, a CFD apresenta-se como uma ferramenta de grande potencial de ser aplicada na modelagem desses fenômenos, predizendo o comportamento do fluido (no caso, o esgoto sendo tratado) e suas interações internas e externas, bem como possibilitando diversos tipos de análises do escoamento, com grande precisão e sem necessidade de grandes esforços experimentais.

Nesta mesma linha de pensamento, a seguinte recomendação, de Finney e Middlebrooks (1980), é apresentada: *“O tempo de detenção hidráulica é usado em muitos dos métodos de projeto e pesquisa, mas muito pouco tem sido feito para determinar fatores que influenciam o tempo de detenção hidráulica real. Uma previsão consistente do desempenho de uma lagoa, por qualquer método, sem projeções precisas de tempo de detenção hidráulica é impossível. Recomenda-se que pesquisas futuras sobre desempenho de lagoas considere o efeito das condições físicas e climáticas no tempo de residência hidráulica”*. Também Shilton (2001) afirma que *“um modelo de lagoas permitiria engenheiros investigar uma gama de diferentes configurações das lagoas e assim otimizar a configuração hidráulica para se obter a melhor eficiência possível; o que certamente representa um maior avanço comparado à corrente abordagem de caixa preta”*.

Segundo Shilton (2001), os resultados das simulações em CFD dão ao projetista ou pesquisador um “olhar interno”, com informações a respeito de como o fluido se mistura e se move através do sistema, contrastando com as simplificações de caixa preta da maioria das abordagens tradicionais. Além de investigar o comportamento hidrodinâmico, a simulação em CFD pode também incorporar a modelagem das reações que ocorrem dentro do próprio fluido e também a sua interação com o ambiente externo, a fim de capturar os efeitos da ação do vento, temperatura, radiação solar etc. No entanto, para utilização segura em projetos, mais pesquisas sobre a validação de modelos de CFD com os dados experimentais são necessárias (SHILTON *et al.*, 1999).

Daigger (2011) faz uma discussão sobre as perspectivas de usos e desenvolvimentos futuros da modelagem de tratamento de águas residuárias, relata a grande lacuna existente na área e a necessidade de maior atenção a ferramentas disponíveis, como a CFD. Mais recentemente, Wicklein *et al.* (2016) apresentaram o primeiro grande esforço de consolidação das práticas de modelagem de sistemas de tratamento de esgotos via CFD, com o relato da criação de um grupo de trabalho da IWA (*International Water Association*) dedicado à investigação de uma gama de temas e desafios relacionados à modelagem dos processos de tratamento de água e esgoto por meio desta ferramenta. O artigo apresenta uma visão geral das boas práticas de modelagem consolidadas até então para tratamento de esgoto (não específico a uma determinada tecnologia), baseadas em procedimentos gerais de CFD. Trata-se de uma excelente referência protocolar para utilização da ferramenta em unidades de tratamento de esgoto, na medida em que também apresenta a descrição das etapas do processo de modelagem e recomendações práticas, desde a elaboração da geometria e da malha, até o processo de calibração e validação e perspectivas para o futuro do uso da ferramenta, passando pelas definições de fatores chaves (dimensões, número de espécies e fases, propriedades do fluido, abordagem do modelo), modelos de turbulência, condições de contorno etc.

São comentados a seguir alguns estudos de lagoas envolvendo esta ferramenta:

Aparentemente, os estudos com CFD em lagoas de estabilização surgiram na década de 90, com publicações em periódicos a partir de 1995, com Wood e colaboradores. Wood *et al.* (1995) e Wood *et al.* (1998) realizaram uma série de estudos e modelos para investigar a hidrodinâmica de lagoas. Uma fase inicial dos estudos foi descrita por Wood *et al.* (1995),

que empregaram FIDAP, um pacote de CFD disponível no mercado, para resolver as equações fundamentais de balanço de massa, quantidade de movimento e energia. Esse trabalho apresenta e explora o potencial da CFD como nova ferramenta de projeto de lagoas (já identificada por Marshall *et al.*, (1993)). Quatro condições de projeto de lagoa foram avaliadas por meio da análise dos padrões de fluxo: lagoa retangular sem defletores; lagoa com um defletor próximo à entrada; lagoa com um defletor perto da saída e lagoa com um aerador superficial. Conforme discutido pelos autores, este estudo foi limitado a duas dimensões. A entrada e saída do fluido foram assumidas como aberturas ao longo de toda a profundidade e não foram considerados quaisquer efeitos em relação a profundidade da lagoa. Além disso, o regime de fluxo foi assumido como sendo completamente laminar. Condições isotérmicas foram assumidas, e nenhum efeito da temperatura e do vento foi considerado. Além disso, não houve validação. Wood *et al.* (1998) melhoraram o modelo de Wood *et al.* (1995), incorporando no modelo o regime de fluxo turbulento. Nesse trabalho, diferentes configurações de entrada e saída do efluente em uma lagoa foram analisadas por meio de modelos bidimensionais. A distribuição de tempos de residência foi comparada entre os resultados dos modelos e os estudos experimentais documentados por Mangelson e Watters (1972). Os autores concluíram sobre a boa aplicabilidade da ferramenta em modelagem de lagoas, mas não recomendando o uso, *a priori*, de modelos bidimensionais para descrição da hidrodinâmica de lagoas de estabilização.

A partir desses trabalhos o tema começou a ganhar força na comunidade acadêmica e as publicações começaram a surgir em maior frequência (em praticamente todos os anos, após o ano 2000). Como parte desta pesquisa, foram encontrados 29 trabalhos técnicos publicados na literatura, entre 1995 e 2015, com a utilização de CFD em lagoas de estabilização. De forma geral, tais trabalhos apontam a CFD, não só como ferramenta promissora em projetos de lagoas, mas também em avaliação de desempenho de unidades existentes, avaliação operacional, estudos de cenários de intervenção (ex.: inclusão de defletores, alteração nos dispositivos de entrada e saída) etc. Outra visão foi apresentada por Laurent *et al.* (2014), que sugerem um protocolo para uso de CFD como ferramenta de suporte para modelagem de sistemas de tratamento de esgoto e melhoria dos modelos tradicionais. Por tal perspectiva, modelos em CFD não seriam substitutos dos modelos mais simplificados, e sim utilizados para apontar possíveis deficiências nesses, com a tentativa de contribuir com o desenvolvimento de novos modelos (chamados pelos autores de “modelos da próxima geração”).

Dois estudos também com modelos bidimensionais foram conduzidos por Persson (2000) e Vega *et al.* (2003), ambos empregando o software MIKE 21 para estudar o desempenho hidráulico de lagoas em diferentes condições. As premissas básicas do MIKE 21 são de que as componentes de velocidade na vertical são pequenas e então a equação de quantidade de movimento na vertical é simplificada como sendo a distribuição da pressão hidrostática. No estudo de Persson (2000), realizado para avaliar diferentes configurações de projeto de lagoas, o modelo em CFD sugeriu que uma maior relação comprimento/largura faz com que o fluxo seja mais semelhante ao pistonado, com reduzidos índices de curtos-circuitos e menores volumes estagnados. Constatou, também, que elementos de projeto como bermas sub-superficiais ou ilhas no meio da lagoa melhoram o desempenho hidráulico, sem a necessidade de aumentar a relação L/B. No entanto, essa recomendação não foi genérica, visto que o modelo bidimensional não poderia captar os efeitos tridimensionais que ocorrem quando uma topografia mais complexa está envolvida. Além disso, ventos ou condições de temperatura não foram considerados, que poderiam interferir no desempenho e alterar as conclusões. Ainda mais importante, as simulações realizadas nesse estudo não foram verificadas com dados de campo.

Já Vega *et al.* (2003) avaliaram várias configurações de lagoa anaeróbia na Colômbia em termos de volume de lodo acumulado, dimensões, entrada/saída e condições de chicaneamento. Trabalhos de campo também foram realizados, incluindo a caracterização de configurações de entrada/saída, medições de velocidades com flutuadores, aferição nível do fluido próximo à entrada e saída, levantamento do perfil do lodo acumulado e registro das vazões de entrada. Essas informações foram utilizadas nas etapas de calibração e validação dos modelos. Os autores afirmaram que o pacote de CFD utilizado (bidimensional) foi capaz de prever razoavelmente bem os fenômenos de dispersão hidrodinâmica e advecção em lagoas. No entanto, isto demandou grau significativo de esforço durante os processos de calibração e verificação. Os parâmetros de calibração nesse estudo incluíam a vazão afluente média; a máxima diferença de nível na lagoa; o coeficiente de rugosidade de fundo; a velocidade do vento, direção e atrito com a superfície e o número de dispersão. O estudo foi realizado para condições de estreita faixa de variação de temperatura (23 – 26°C), portanto, alerta-se que, no caso da presença de estratificação térmica, um modelo bidimensional não seria capaz de representar com precisão o comportamento hidrodinâmico de lagoas.

Estudo semelhante ao de Persson foi realizado por Abbas *et al.* (2006), que modelaram, via CFD (modelo também bidimensional), diferentes configurações geométricas e de chicaneamento de uma lagoa de estabilização a fim de verificar a configuração ótima em termos de eficiência e qualidade do efluente. Não houve discussão sobre a validação do modelo.

Salter *et al.* (2000) investigaram o mau desempenho de uma lagoa facultativa na Tailândia utilizando modelo em CFD tridimensional. A lagoa existente e uma lagoa adaptada com defletores foram modeladas. Ao examinar o campo de fluxo e o TDH, os autores identificaram as razões para o mau desempenho lagoa como sendo graves curtos-circuitos e grande percentagem de zonas de estagnação. Os autores não relataram o processo de validação do modelo tridimensional. Efeitos do vento e temperatura, que podem ter grande influência nos curtos-circuitos, não foram incluídos no modelo.

Baléo *et al.* (2001) utilizaram CFD para obtenção do TDH real de uma lagoa em escala piloto. O modelo foi validado por meio de ensaios com traçadores, obtendo bons resultados.

Shilton e Mara (2005) modelaram, em CFD, o chicaneamento de um sistema composto de lagoa facultativa e de maturação, concluindo sobre a melhoria de desempenho do sistema com a provisão das chicanas.

Banda *et al.* (2006a) utilizaram um modelo tridimensional em CFD para avaliar a eficácia do tratamento (em termos de remoção de *E. coli*) de uma lagoa de estabilização facultativa, principalmente no que diz respeito à influência da velocidade e direção do vento. O trabalho concluiu que a melhor locação da lagoa, em termos de remoção de *E. coli*, é quando a direção do fluxo é contrária à dos ventos predominantes, já que diminuía as chances de curtos-circuitos. Os mesmos autores (2006b), também através de um modelo tridimensional de uma lagoa facultativa com chicanas, compararam resultados da simulação com uma lagoa experimental em escala piloto. Concluíram que o modelo em CFD é satisfatório na predição da remoção de *E. coli* em lagoas facultativas com chicanas

Olukanni e Ducoste (2011) realizaram estudo em CFD para seleção da melhor configuração de lagoas. O modelo era acoplado com um programa de otimização de custos para escolha da melhor configuração com menor custo, sem comprometer a eficiência do tratamento. Os resultados do monitoramento da concentração de coliformes termotolerantes na saída do

reator mostraram que o projeto convencional de lagoas com defletor a 70% da largura não é necessariamente a melhor configuração de lagoas, como relatado anteriormente na literatura.

Alvarado *et al.* (2012b) utilizaram um modelo concebido de forma “compartimentada”, com a divisão do volume da lagoa em células menores de mistura completa, para descrever o sistema hidráulico de uma lagoa de maturação em escala plena (7 ha) de uma ETE no Equador. O modelo compartimentado foi derivado do modelo 3D em CFD, não compartimentado, que estava já validado por meio de ensaios com traçadores. Nessa mesma ETE, Alvarado *et al.* (2012a) realizaram modelagem em CFD para estudar a relação entre perfis de velocidade e deposição de lodo em uma lagoa facultativa após 10 anos de operação da unidade e Alvarado *et al.* (2013) estudaram uma lagoa aerada via modelagem em CFD, no intuito de determinar a melhor configuração para os aeradores quanto ao desempenho hidráulico.

Aqui no Brasil, Souza *et al.* (2012) utilizaram CFD para avaliar o desempenho hidráulico de lagoas hipotéticas com diferentes configurações de chicaneamento. Já Passos *et al.* (2014a) utilizaram CFD em avaliação de desempenho de lagoa facultativa em escala real. Neste último, os resultados do modelo foram comparados com medições de campo com corante e com ensaio realizado com um *drogue*, obtendo boa aproximação entre eles (as linhas de fluxo obtidas com o modelo em CFD acompanharam a trajetória real do fluxo evidenciada pelo *drogue* e corante). O modelo gerado permitiu a observação de regiões de curto-circuito, zonas mortas e padrões circulares de movimentação em algumas regiões da lagoa.

Sah *et al.* (2012) realizaram compilação e análise de diversos estudos envolvendo modelagem numérica de lagoas (um total de 41 trabalhos), incluindo 13 estudos com uso da ferramenta CFD em lagoas. Foram tabulados nessa pesquisa os principais recursos de cada modelo; detalhes sobre a modelagem da qualidade da água, ou seja, se a remoção aeróbia/anóxica de matéria orgânica, remoção anaeróbia, de nitrogênio, fósforo ou remoção de *E. coli* foram incluídas; se um balanço térmico foi incluído; a dimensão característica de cada modelo (se em zero, uma, duas ou em três dimensões); a natureza do modelo (se em estado estacionário ou dinâmico); o software de modelagem utilizado; a inclusão de uma análise de sensibilidade paramétrica; e sobre o estado de validação de cada modelo. A avaliação desses autores resultou em uma categorização da modelagem de lagoas em três grupos: (1) a modelagem hidrodinâmica com foco em padrões de fluxo; (2) modelos de qualidade da água focando apenas na qualidade da água, e (3) modelos incorporando tanto hidrodinâmica quanto a

qualidade da água. Os autores também concluíram que, até a data do trabalho, apenas um modelo semi-dinâmico, desenvolvido em três dimensões, abrangia processos hidrodinâmicos e bioquímicos (aeróbios e anaeróbios, incluindo remoção de *E. coli*), mas mesmo assim esse modelo não foi validado. Por conseguinte, os autores manifestaram a necessidade de desenvolvimento de um modelo tridimensional dinâmico que seja consistente, inclua detalhes hidrodinâmicos e de interações bioquímicas, e que possa ser universalmente aplicado. Segundo os autores, é também essencial que o modelo seja totalmente validado e calibrado com dados de campo, sendo este o principal gargalo atual na área de modelagem de lagoas.

Partindo-se da tabela apresentada por Sah *et al.* (2012), com adaptações, acréscimos e atualizações, a TAB. 3.3 apresenta uma nova compilação de trabalhos publicados com uso de CFD em lagoas de estabilização (anaeróbias, facultativas, de maturação e polimento), com destaque para as principais características dos modelos e métodos utilizados. Nesta tabela, são apresentados os pontos chaves do trabalho; se o modelo é bi ou tridimensional e se foi rodado em regime permanente, transiente, permanente-transiente ou dinâmico (nomeados nos três últimos casos como “MD”), na coluna “M”; se o modelo contemplou análises de qualidade da água; se houve consideração de fenômenos de transferência de calor ou balanço térmico (coluna “BT”); se a geometria do lodo acumulado (coluna “Lod”) e os efeitos do vento e da radiação solar (colunas “Ven” e “RS”, respectivamente) foram contemplados no modelo; se foram realizadas análises de sensibilidade (exemplo: variações de parâmetros ou características do modelo com vistas a verificar o respectivo efeito nos resultados da simulação) e se houve validação do modelo com dados experimentais ou teóricos. Já a TAB. 3.4 apresenta exposição sumária dos principais resultados obtidos e conclusões desses mesmos trabalhos.

**TABELA 3.3** - Compilação de trabalhos com uso de CFD em lagoas não mecanizadas com exposição sumária das principais características dos modelos e dos métodos utilizados.

Ref.	Pontos chaves do trabalho	M	Qualidade da água	BT	Lod	Ven	RS	Software de CFD	Análise de Sensibilidade	Calibração / Validação
Wood <i>et al.</i> (1995)	Apresenta e explora o potencial da CFD como nova ferramenta de projeto de lagoas. Apresenta o padrão de fluxo e velocidades em condições laminares e isotérmicas de LF retangular nos seguintes cenários: sem defletores; com um defletor próximo à entrada; com um defletor próximo à saída; com aerador	2D SS	N	N	N	N	N	FIDAP	N	N
Wood <i>et al.</i> (1998)	Diferentes configurações de entrada e saída do efluente em uma lagoa foram analisadas. Apresenta também a variação espacial da velocidade do fluido ao longo do comprimento da lagoa	2D MD	N	N	N	N	N	FIDAP	Balanco de massa; independência da malha; difusividade do traçador; condições de contorno de turbulência	Validação com dados experimentais (ensaios com traçador) de Mangelson e Watters (1972), em uma pequena lagoa em escala laboratorial
Persson (2000)	Avalia parâmetros hidráulicos e o efeito de 13 diferentes configurações geométricas e do posicionamento de defletores e entrada/saída no desempenho hidrodinâmico de lagoas hipotéticas	2D SS	N	N	N	N	N	MIKE 21	N	N
Salter <i>et al.</i> (2000)	Avalia o regime hidráulico e o efeito de chicanas em uma LF. Avalia o efeito da estratificação térmica, definida a partir de medições de campo	3D SS MD	Remoção de DBO (cinética de primeira ordem)	Sim	N	N	N	NE	Independência da malha	Menciona que validação do modelo SS foi realizada em outro trabalho, por meio de rastreamento de flutuadores em um reservatório com MED. Mistura sugerida pelo modelo comprovada em observações de campo
Shilton (2000)	Destaca o potencial da CFD como ferramenta de projeto de lagoas, complementando e estendendo o	3D SS MD	Remoção de DBO e decaimento de	N	N	N	N	PHOENICS	N	Apresenta validação preliminar com medições de velocidades nas lagoas realizada em outro

	trabalho de Wood <i>et al.</i> (1995, 1998). Avalia o efeito de chicanas no desempenho com curvas de traçador simuladas		coliformes (cinética de primeira ordem)								trabalho
Baléo <i>et al.</i> (2001)	Apresenta previsões de TDH obtidos em lagoa hipotética compartimentada, com defletores e vertedouros, utilizando dois métodos em CFD (avaliação da distribuição espacial e temporal dos tempos de residência)	3D SS MD	N	N	N	N	N	FLUENT	N		Validação com dados experimentais (ensaios com traçador em um canal em escala modelo)
Shilton e Harrison (2003c)	Incorpora o decaimento de <i>E. coli</i> . Avalia o efeito de chicanas no desempenho	2D SS	Decaimento de <i>E. coli</i> (cinética de primeira ordem)	N	N	N	N	PHOENICS	N		Validação via correlação entre dados de campo e simulação, em termos de concentração efluente de <i>E. coli</i>
Sweeney <i>et al.</i> (2003)	Discute as limitações da curva DTR na predição do desempenho de lagoas. Destaca o efeito do vento nas curvas de DTR	3D SS	N	N	N	Sim	N	FLUENT	N		N
Vega <i>et al.</i> (2003)	Prediz os efeitos do lodo acumulado, defletores, locação da entrada-saída e geometria sobre o desempenho hidrodinâmico de uma LA	2D SS	Remoção de DBO (cinética de primeira ordem)	N	Sim	Sim	N	MIKE 21	Independência da malha; significância do vento, rugosidade, número de dispersão e da vazão de entrada		Dados de campo obtidos em outros estudos já realizados na mesma lagoa. Calibração com vazão de entrada, rugosidade, nível da água, velocidade e direção do vento e temperatura do fluido. Validação com curvas de DTR obtidas em campo e dados de eficiência de remoção de DBO
Shilton e Mara (2005)	Descreve o impacto de chicanas na eficiência de remoção de patógenos em LF e LM	3D SS	Decaimento de <i>E. coli</i> (cinética de primeira ordem)	N	N	N	N	PHOENICS		N	Comparação dos resultados do modelo (concentração efluente de <i>E. coli</i> ) com predição de modelos teóricos
Aldana <i>et al.</i> (2005)	Analisa a influência da configuração geométrica (chicanas e locação da entrada e saída), parâmetros de projeto e do vento no desempenho de duas LM (escala real)	3D SS	N	N	N	Sim	N	HYDRO-3D		N	Validação com dados experimentais em campo (ensaio com traçador) e em modelos físicos (em escala reduzida)
Sweeney	Apresenta estudo do perfil térmico e	3D	N	Sim	N	N	Sim	FLUENT		N	Validação com medições de

<i>et al.</i> (2005)	modelagem em uma grande lagoa	MD									temperatura em campo
Karteris <i>et al.</i> (2005)	Apresenta modelagem do padrão térmico de uma LA coberta	3D MD	N	Sim	N	N	N	FLUENT	N		Validação com medições de temperatura em campo
Abbas <i>et al.</i> (2006)	Estudo de cenários de geometrias e chicaneamento de lagoas hipotéticas (lagoas quadradas e retangulares sem chicanas e também com dois quatro defletores longitudinais)	2D SS	OD (modelo advectivo-difusivo) e remoção de DBO (cinética de primeira ordem)	N	N	N	N	Surface-Water Modelling System (SMS)	N		N
Banda <i>et al.</i> (2006a)	Avalia o desempenho de LF's chicaneadas, modeladas em condições isotérmicas e sob estratificação térmica	3D SS	Decaimento de <i>E. coli</i> (cinética de primeira ordem)	Sim	N	N	N	FLUENT	Independência da malha		Validação via comparação entre dados de campo (LF chicaneada em escala piloto) e simulação, em termos de concentração efluente de <i>E. coli</i>
Banda <i>et al.</i> (2006b)	Destaca a significância dos efeitos do vento (velocidade e direção) na hidráulica e na remoção de <i>E. coli</i> de LF hipotética	3D SS	Decaimento de <i>E. coli</i> (cinética de primeira ordem)	N	N	Sim	N	FLUENT	Independência da malha		N
Sweeney <i>et al.</i> (2007)	Utiliza os resultados do modelo hidrodinâmico apresentado em Sweeney <i>et al.</i> (2005) para comparação com dados experimentais de qualidade da água. Avaliação da significância das variações temporais e espaciais da qualidade da água no verão e inverno e implicações na modelagem e projeto de lagoas	3D SS		N	Sim	N	N	Sim	FLUENT	N	N
Shilton <i>et al.</i> (2008)	Compara curvas de DTR obtidas experimentalmente com aquela obtida via CFD: LM em escala real e em escala reduzida (de laboratório)	3D SS MD		N	N	N	N	N	PHOENICS	Independência da malha	Validação com dados experimentais (ensaio com traçador na lagoa em escala real e de laboratório)
Badrot-Nico <i>et al.</i> (2010)	Avalia a influência do vento no padrão de fluxo e na remoção de coliforme de lagoas em diferentes configurações geométricas	3D MD	Decaimento de coliformes (cinética de primeira ordem)	S	N	S	S		COHERENS	N	Validação com dados experimentais (não apresentado no trabalho)
Abbassi <i>et al.</i>	Apresenta valores do coeficiente de	2D		N	N	N	N	N	FLUENT	Independência da	Validação com números de

<i>al.</i> (2010)	dispersão em lagoa (não especificada) obtidos a partir de CFD, via abordagem de injeção e rastreamento de partículas	SS MD								malha	dispersão obtidos com dados experimentais (traçador) e equações empíricas
Herdianto <i>et al.</i> (2010)	Avalia o padrão de fluxo em diversas configurações de lagoas (existente e hipotéticas), com vistas ao efeito na sedimentação de partículas (correspondência às algas)	3D MD	N	N	N	N	N	FLUENT		N	N
Olukanni e Ducoste (2011)	Combinação de CFD com um programa de otimização para seleção da melhor configuração de lagoas (geometria e condições de chicaneamento), baseado no custo e na eficiência de tratamento	2D SS	Decaimento de coliformes (cinética de primeira ordem)	N	N	N	N	COMSOL		Independência da malha	N
Alvarado <i>et al.</i> (2011)	Compara curvas de DTR e parâmetros hidráulicos obtidos experimentalmente com aqueles obtidos via CFD - LM em escala real	3D MD	N	N	N	N	N	FLUENT		Independência da malha	Validação com dados experimentais (ensaio com traçador)
Sah <i>et al.</i> (2011)	Incorpora o efeito dinâmico de condições ambientais no modelo de LF's e avalia os consequentes efeitos desses e da inclusão de defletores na eficiência de tratamento	3D MD	Remoção de DQO e N (modelo de lodos ativados); perfil de OD; crescimento de algas (RWQM 1) e decaimento de <i>E. coli</i> (cinética de primeira ordem)	Sim	N	Sim	Sim	Delft 3D		N	N
Souza <i>et al.</i> (2012)	Simula LF's hipotéticas com diferentes configurações de chicaneamento	3D SS	N	N	N	N	N	CFX		N	N
Alvarado <i>et al.</i> (2012b)	Apresenta um modelo compartimentado para uma LM em escala real, desenvolvido a partir dos resultados de um modelo em CFD previamente validado na mesma lagoa	3D MD	N Apenas no modelo compartimentado	N	N	N	N	FLUENT		Independência da malha	Validação com dados experimentais de outro estudo (ensaio com traçador) e equações teóricas

Alvarado <i>et al.</i> (2012a)	Analisa a acumulação de lodo em LF (escala real) e a sua relação com a hidrodinâmica, em diferentes cenários de acúmulo de lodo	3D MD	N	N	Sim	N	N	FLUENT	N	Validação com dados experimentais (ensaio com traçador)
Passos <i>et al.</i> (2014a)	Apresenta modelo de LF em escala real, destacando o efeito da distribuição desigual do afluente (entre duas entradas) no padrão de fluxo e no lodo acumulado	3D SS MD	N	N	N	Sim	N	CFX	Independência da malha; passo de tempo; condições de contorno; significância do vento	Validação com dados experimentais (corante e <i>drogues</i> ) e com mapa batimétrico de outro estudo

- Siglas:
- M: tipo de modelo; BT: Balanço térmico; Lod: Geometria do lodo; Ven: Efeito do vento; RS: Radiação solar.
  - LF: lagoa facultativa; LM: lagoa de maturação; LA: lagoa anaeróbia; N: Não realizado ou não apresentado; NE: Não especificado; SS: Steady State (regime permanente); MD: Modelo dinâmico ou em regime transiente; DTR: Distribuição dos Tempos de Residência; MED: Medição Eletrônica à Distância.

**TABELA 3.4** - Exposição sumária dos principais resultados obtidos e conclusões de trabalhos com uso de CFD em lagoas não mecanizadas.

REF.	PRINCIPAIS RESULTADOS OBTIDOS / CONCLUSÕES
Wood <i>et al.</i> (1995)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Zonas estagnadas obtidas principalmente nos cantos opostos dos dispositivos de entrada e saída (que foram locados em diagonais opostas) da LF sem defletores;</li> <li>Defletor posicionado próximo à entrada não produziu o efeito desejado, provocando efeito de jato do fluido em direção à saída e aumentando o volume estagnado na lagoa, principalmente devido à zona estagnada formada atrás do defletor. O defletor posicionado próximo à saída reduziu o curto-circuito proporcionado pelo efeito de jato;</li> <li>Os autores destacam a importância da validação de modelos em CFD (não realizada no trabalho), sugerindo para isso o uso de traçadores e medições de velocidade em pontos da lagoa.</li> </ul>
Wood <i>et al.</i> (1998)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Padrão de fluxo ditado pela relativamente alta velocidade do jato de fluido na entrada. Grandes zonas de recirculação com baixas velocidades e zonas de estagnação no centro e nos cantos da lagoa;</li> <li>Modelos de CFD falham em prever os picos do traçador;</li> <li>Pouca sensibilidade do modelo para o balanço de massa (variando entre os regimes de escoamento permanente e transiente), difusividade do traçador e condições de contorno de turbulência;</li> <li>Alta sensibilidade do modelo às condições de entrada na lagoa (diâmetro da tubulação, velocidades de entrada), que influenciaram consideravelmente o padrão de fluxo;</li> <li>Autores mencionam a dificuldade de medir velocidades para validação experimental em lagoas, devido à limitação de determinação dos aparelhos em tão baixas velocidades;</li> <li>Os autores concluíram sobre a boa aplicabilidade da ferramenta em modelagem de lagoas, mas não recomendando o uso de modelos 2D para descrição da hidrodinâmica de lagoas de estabilização.</li> </ul>
Persson (2000)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Relação comprimento/largura, localização da entrada e saída e presença de bermas e ilhas subsuperficiais (obstáculo ao fluxo em frente à entrada) têm grande impacto no desempenho hidrodinâmico. Nesses cenários, além do cenário com a entrada do efluente ao longo de toda a largura, os graus de mistura e</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>curto-circuito foram menores;</li> <li>Lagoa com geometria não usual (em formato de “L” - lagoa curvada) ou com uma ilha locada próximo às laterais não necessariamente conduz a menor eficiência hidráulica que os formatos básicos. O estudo indica que assim é possível obter alguma flexibilidade de projeto em regiões com topografias não favoráveis.</li> </ul>
Salter <i>et al.</i> (2000)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ocorrência de curtos circuitos associada ao desempenho insatisfatório na remoção de DBO</li> <li>Confirmação da estratificação térmica em toda a área da lagoa;</li> <li>Curto-circuito no cenário sem chicanas, com o fluxo se movendo da entrada para o lado oposto, diretamente para a saída, e a parcela que não deixou a lagoa como responsável pela zona de recirculação com baixas velocidades na região central da lagoa;</li> <li>Com a introdução das chicanas, curto-circuito foi reduzido, aumentando o TDH;</li> <li>Estratificação térmica induziu movimentação do fluido apenas pela camada superior da lagoa, reduzindo o TDH.</li> </ul>
Shilton (2000)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Grande e único vórtex observado na massa líquida, ditado pela configuração de entrada;</li> <li>Grande influência da chicana no comportamento hidrodinâmico, facilitando a mistura;</li> <li>Velocidades medidas diretamente na lagoa e resultados da simulação com mesma magnitude. Algumas variações atribuídas ao efeito do vento;</li> <li>CFD pode ser utilizada para prever a eficiência do tratamento diretamente a partir dos resultados da simulação hidrodinâmica;</li> <li>CFD tem grande potencial em projetos de lagoas, oferecendo grandes vantagens em comparação a modificações em campo e modelos existentes;</li> <li>Validação é etapa essencial dos estudos e projetos com CFD.</li> </ul>
Baléo <i>et al.</i> (2001)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Zonas mortas predominantes localizadas nos cantos dos defletores e a montante dos vertedores;</li> <li>Método de observação da distribuição espacial dos tempos de residência em CFD, com visualização na própria geometria da simulação, considerado mais interessante para otimização geométrica de lagoas que o método de avaliação do efeito da configuração geométrica na DTR na saída, visto que o primeiro pode fornecer diretamente os principais locais responsáveis pela sua dispersão;</li> <li>CFD é uma técnica relevante na modelagem de lagoas, corretamente predizendo a distribuição espacial dos tempos de residência médios.</li> </ul>
Shilton e Harrison (2003c)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Lagoa com configuração sem chicanas apresentou severo curto-circuito, e a provisão de chicanas melhorou consideravelmente a eficiência via redução desse curto-circuito;</li> <li>Autores enfatizam os benefícios da integração de reações cinéticas em modelos CFD, como alternativa aos grandes desvios da realidade ao se assumir fluxo ideal nas lagoas ou quando da necessidade de predição do número de dispersão em equações para fluxos não ideais.</li> </ul>
Sweeney <i>et al.</i> (2003)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Características de fluxo em pistão obtidas no modelo em regime permanente da lagoa sem vento;</li> <li>Rápido aumento da dispersão longitudinal em velocidades do vento acima de 4 m/s;</li> <li>Maiores graus de curto-circuito com o vento atuando em direção perpendicular ao fluxo principal;</li> <li>Limitação do número de dispersão para caracterização das lagoas, visto o grande efeito que fatores não considerados podem ter na dispersão longitudinal;</li> <li>Análises em CFD podem fornecer um entendimento mais holístico do regime hidráulico de lagoas.</li> </ul>
Vega <i>et al.</i> (2003)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Pronunciado efeito canal (curto-circuito) causado pelo cenário de maior acúmulo do lodo (50% do volume). A partir deste volume, o lodo acumulado passa a ser prejudicial ao desempenho;</li> <li>Cenário de acúmulo médio de lodo (20% do volume) resultou em melhor distribuição da velocidade;</li> <li>Cenário sem lodo acumulado resultou em melhor distribuição da velocidade, mas com maiores magnitudes, devido às menores rugosidades de fundo atribuídas a este cenário;</li> <li>Efeito de chicanas na quebra do fluxo preferencial estabelecido entre entrada e saída, aumentando a velocidade no primeiro compartimento, mas</li> </ul>

	<p>contribuindo com a redistribuição do campo de velocidades e valores nos compartimentos a jusante;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Adição de dois defletores a uma configuração de lagoa com entrada e saída alinhados no centro produziu efeito benéfico semelhante à configuração de defletor único entre a entrada e a saída localizados em cantos adjacentes;</li> <li>• Lagoas quadradas com problemas de alinhamento entre entrada e saída podem ser melhoradas com a provisão de um defletor entre esses dispositivos, na metade da sua largura;</li> <li>• Modelo de CFD utilizado (2D) foi capaz de prever razoavelmente bem os fenômenos de dispersão hidrodinâmica e advecção em lagoas. No entanto, isto demandou grau significativo de esforço durante os processos de calibração e verificação.</li> </ul>
Shilton e Mara (2005)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Resultados similares entre a concentração efluente de <i>E. coli</i> obtida com CFD e com aplicação do modelo teórico de mistura completa. Comparado com este último, simulações em CFD apresentam a vantagem de permitir avaliação do impacto de modificações hidráulicas, tais como uso de chicanas;</li> <li>• Provisão de dois defletores com 70% da largura nas lagoas aumentou a remoção de <i>E. coli</i>;</li> <li>• Uso de chicanas em uma lagoa reduz requerimentos de área e custos com obras, podendo fornecer a mesma melhoria de desempenho que o conjunto de duas lagoas em série sem chicanas;</li> <li>• Modelos de CFD em lagoas não são elaborados para fornecerem resultados exatos, mas sim como ferramenta para explorar alternativas de projeto.</li> </ul>
Aldana <i>et al.</i> (2005)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Defletores e chicanas melhoraram o desempenho hidrodinâmico das lagoas, quando comparado ao cenário sem tais dispositivos. As configurações com 3 canais longitudinais foram as mais eficientes;</li> <li>• Melhoria progressiva significativa na eficiência hidráulica e redução do número de dispersão foram obtidas com a redução da largura de passagem entre as chicanas, de 50cm, 25cm e 5 cm;</li> <li>• Ação do vento (em direção à entrada) causou curtos-circuitos e baixas eficiências hidráulicas na lagoa em escala real e no modelo físico, também observados no modelo em CFD, podendo reduzir o TDH médio em até 25%;</li> </ul>
Sweeney <i>et al.</i> (2005)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lagoa pesquisada não se mostrou isotérmica nas suas três dimensões, com variabilidade mínima entre locais no plano horizontal de 0,2°C/m;</li> <li>• Gradientes foram obtidos desde o máximo de 11,8°C/m até negativos (- 0,9°C/m);</li> <li>• No total dos registros de estratificação, a lagoa permaneceu 18% da duração do estudo sob estratificação;</li> <li>• Bom ajuste entre os dados de temperatura média na lagoa obtidos com o modelo em CFD e as medições de campo (ao longo de um dia), entretanto, o modelo superestimou o gradiente térmico máximo em aproximadamente 50% e também a temperatura do efluente. Também não foi capaz de capturar oscilações diárias no gradiente térmico durante a tarde e à noite;</li> <li>• A maioria dos curtos-circuitos induzidos pela estratificação térmica ocorrerá nas regiões da lagoa que permanecem mais tempo estratificadas;</li> <li>• Local onde a estratificação térmica foi mais persistente foi no local mais distante da direção predominante dos ventos, e o contrário verdadeiro, sugerindo influência do vento na quebra da estratificação (até mesmo os mais brandos);</li> <li>• CFD pode ser utilizado para prever tanto a temperatura média da lagoa quanto a dinâmica da estratificação com alguma precisão. Entretanto, melhor previsão na previsão pode ser conseguida com a inclusão da ação cisalhante do vento no modelo em CFD.</li> </ul>
Karteris <i>et al.</i> (2005)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Erro relativo médio entre as estimativas de temperatura do modelo ao longo de um ano e as medições em campo foi de 9,34%, com correlação entre os dados de 0,91;</li> <li>• Predição de temperatura da lagoa anaeróbia coberta foi realista, provando precisão e qualidade satisfatórias do modelo;</li> <li>• Dois padrões de recirculação principal encontrados na lagoa;</li> <li>• Fluido se movia preferencialmente nas camadas inferiores;</li> <li>• Zonas de estagnação encontradas principalmente nos cantos e superfície da lagoa;</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Variações de temperatura ao longo de um dia foram insignificantes, justificando o registro dos resultados da simulação apenas a cada 12h;</li> <li>• O modelo validado pode ser utilizado tanto em projetos como operacionalmente, constituindo ferramenta para investigar a influência na temperatura de modificações aplicadas na lagoa (métodos para conter calor e aumentar a temperatura, por exemplo).</li> </ul>
Abbas <i>et al.</i> (2006)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aumento da relação comprimento/largura nos cenários de lagoas chicaneadas proporcionou aumento na eficiência de remoção de DBO e um ligeiro aumento no oxigênio dissolvido do efluente;</li> <li>• No cenário de lagoas sem chicanas, o aumento da relação comprimento/largura causou aumento na eficiência de remoção de DBO, mas redução da concentração de OD no efluente;</li> <li>• Aumento da relação comprimento/largura proporcionou ligeiro aumento na velocidade do fluxo nas lagoas;</li> <li>• Mínimo de dois defletores é recomendado. Melhoria pode ser conseguida utilizando quatro defletores;</li> <li>• Relação comprimento/largura de 4:1 com dois e quatro defletores foram as formas mais efetivas de melhoraria da hidrodinâmica e a remoção de DBO.</li> </ul>
Banda <i>et al.</i> (2006a)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Modelo de CFD na lagoa com duas chicanas (mesma configuração da lagoa em escala piloto) apresentou previsão satisfatória da remoção de <i>E. coli</i> tanto no cenário isotérmico (inverno) quanto com estratificação térmica no verão;</li> <li>• No inverno, o modelo subestimou a eficiência de remoção de <i>E. coli</i> em 19%, enquanto no verão o modelo superestimou a eficiência em 15%;</li> <li>• A provisão de chicanas (cenários com 2 e 4 defletores) reduziu a concentração efluente de <i>E. coli</i> nos modelos, aparentemente também reduzindo o curto-circuito hidráulico associado com a estratificação térmica;</li> <li>• Concentração efluente no modelo da lagoa sem chicanas foi essencialmente o mesmo no verão e inverno;</li> <li>• As similaridades obtidas no desempenho da lagoa durante inverno e verão, bem como a ausência de diferenças significativas entre os padrões de fluxo observados nos dois períodos, indicam que eventuais curtos-circuitos hidráulicos associados à estratificação térmica não são significantes. A mistura vertical ocorreu nos dois períodos.</li> </ul>
Banda <i>et al.</i> (2006b)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Concentração efluente de <i>E. coli</i>, obtida com o vento em direção oposta à direção preferencial do fluxo, menor que concentração efluente obtida no cenário sem vento (15, 44, 63 e 81% de aumento na eficiência com vento de 3, 4, 5 e 6 m/s, respectivamente);</li> <li>• Concentração efluente de <i>E. coli</i>, obtida com o vento na mesma direção do fluxo, superior à concentração efluente obtida no cenário sem vento (12, 31, 18 e 13% de redução da eficiência com vento de 3, 4, 5 e 6 m/s, respectivamente), podendo esta redução na eficiência ter sido causada pela indução de curto-circuito hidráulico;</li> <li>• Lagoas facultativas com reduzidos TDH tendem a sofrer curtos-circuitos causados por padrões de circulação;</li> <li>• O aumento da velocidade do vento alterou o padrão de fluxo na lagoa, de forma que os ventos com mesma direção do fluxo principal provocaram aumento em padrões de circulação que podem ter sido responsáveis por curtos-circuitos e, conseqüentemente, redução na eficiência de remoção de <i>E. coli</i>. Ventos em direção contrária ao fluxo provocaram aumento do número de zonas de recirculação próximos à entrada, reduzindo o curto-circuito;</li> <li>• Ventos na direção perpendicular ao fluxo não alteraram significativamente o desempenho da lagoa, comparado à situação sem ventos;</li> <li>• Os dados sugerem que o desempenho de lagoas pode ser melhorado com a percepção e utilização dos efeitos do vento, a exemplo da locação da lagoa com fluxo principal em direção contrárias à dos ventos predominantes;</li> <li>• Todos os modelos de lagoas em CFD devem levar em consideração a velocidade e direção do vento, a fim de permitir avaliação mais realista do desempenho.</li> </ul>
Sweeney <i>et al.</i> (2007)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vetores de velocidade na superfície da lagoa apontados na mesma direção dos ventos predominantes (6,5 m/s). A 1,20 m da superfície (0,20 m do fundo) já se observava fluxos de retorno, na direção contrária;</li> <li>• Variação espacial considerável (plano horizontal na lagoa) observada nos parâmetros de qualidade monitorados;</li> <li>• Menores concentrações de N-NH<sub>4</sub> e maiores concentrações de N-NO<sub>2</sub> e N-NO<sub>3</sub> observadas em locais próximos à entrada da lagoa, indicando nitrificação.</li> </ul>

	<p>Também maiores concentrações de OD encontradas próximo à entrada. Tais fatos podem estar relacionados ao comportamento hidrodinâmico da lagoa observado no modelo em CFD, que apontou fluxos de recirculação que podem ter contribuído para o aumento do tempo de retenção nessa região (permitindo o lento crescimento de bactérias nitrificantes autotróficas) e ter sido responsáveis pelo fornecimento de oxigênio para esta região – condições que favorecem a nitrificação;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Entender o efeito das variações da qualidade da água, em conjunto com cenários hidrodinâmicos e temporais, favorece o melhor entendimento da operação de lagoas.</li> </ul>
Shilton <i>et al.</i> (2008)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Curto-circuito, com elevado e adiantado pico do traçador ocorrido na lagoa em escala real, foi observado e pode ter sido provocado pelo efeito de jato da tubulação de entrada. Após este pico, a curva decresceu com comportamento semelhante ao de mistura completa;</li> <li>• Formação de uma célula de recirculação em sentido horário na superfície da lagoa, próximo à entrada, como resultado do posicionamento do dispositivo de entrada, no canto superior esquerdo. Esta célula de circulação foi então responsável por estabelecer outro padrão de circulação na outra metade da lagoa, se tamanho semelhante, em sentido anti-horário;</li> <li>• Correlação entre a curva de DTR do modelo de CFD e a curva de DTR média da lagoa em escala real foi de 0,682 (e o pico encontrado em campo não foi devidamente modelado), enquanto que a correlação entre a curva de DTR do modelo e a curva de DTR média da lagoa reduzida em escala laboratorial em mesmas condições foi de 0,862 (com ótimo ajuste entre as curvas). Ademais, movimentação do traçador obtida no laboratório apresentou padrão visual similar aos vetores de fluxo obtidos no modelo em CFD. Tais fatos indicam que não são os métodos de modelagem em CFD (ex.: escolha do modelo de turbulência, condições de contorno) que são responsáveis pelos desvios com o real, mas sim como as condições físicas encontradas em campo estão sendo consideradas nos modelos (acúmulo de lodo, variações climáticas e de fluxo etc.), já que algumas delas são extremamente difíceis de mensurar e incorporar em um modelo de CFD;</li> <li>• Uma extensa pesquisa sobre a camada de lodo e das condições transientes de vazão de entrada, velocidade do vento e temperatura poderiam trazer melhor alinhamento entre CFD e os dados de campo, mas se o objetivo é avaliar maiores modificações como introdução de defletores, que resultam em grandes mudanças na eficiência, então um modelo pragmático, mais simples, parece ser bastante adequado.</li> </ul>
Badrot-Nico <i>et al.</i> (2010)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Desempenho de lagoas é dependente da direção e velocidade do vento que atua na superfície;</li> <li>• Para lagoas sem chicanas, o pior desempenho ocorre com o vento atuando no sentido da entrada para a saída e em maiores velocidades;</li> <li>• Não houve diferença significativa entre o desempenho de lagoas com entrada e saída alinhadas e não alinhadas</li> <li>• A adição de chicanas demonstrou ter impacto positivo tanto na remoção bacteriana quanto na sensibilidade à direção do vento;</li> <li>• Chicanas bem dimensionadas podem reduzir a sensibilidade da lagoa ao vento;</li> <li>• A orientação de lagoas de forma que os ventos dominantes atuem em sentido ortogonal à direção da entrada/saída deve ser preferida em projetos;</li> <li>• O desempenho de lagoas tende a estabilizar para velocidades do vento superiores a 5 m/s.</li> </ul>
Abbassi <i>et al.</i> (2010)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Existência de curto-circuito, com antecipação do pico do traçador em ambas as curvas (simulada e real);</li> <li>• Número de dispersão (<math>d</math>) obtido com CFD foi de 0,5; semelhante ao obtido com a curva real, de 0,6;</li> <li>• Coeficiente de dispersão (<math>D</math>) obtido com CFD foi de 0,67; valor mais próximo ao real (0,8) que aqueles previstos por equações empíricas;</li> <li>• CFD é uma opção conveniente para o cálculo de <math>d</math> e <math>D</math>, sendo que seu uso possibilita a consideração dos efeitos diversos fatores hidrodinâmicos que afetam a dispersão nas lagoas, e que não seriam considerados em equações empíricas.</li> </ul>
Herdianto <i>et al.</i> (2010)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baixas velocidades previstas nos cantos, entre os 7 dispositivos de entrada e entre os 3 dispositivos de saída no modelo da lagoa existente;</li> <li>• Tempo de retenção obtido com traçador simulado para a configuração existente (9,65 dias) similar ao teórico (9,84 dias);</li> <li>• Velocidades nos canais formados no modelo com 3 defletores foram maiores que a velocidade média do modelo da lagoa sem chicanas;</li> <li>• Fluxo aproximado ao de pistão na lagoa com chicanas, com tempo de retenção de 7,08 dias previsto no modelo (muito menor que modelo da lagoa original).</li> </ul>

	<p>A adição de defletores pareceu induzir curtos-circuitos, causado pelas maiores velocidades entre as chicanas, para a mesma vazão;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Modelo que apresentou menor concentração de partículas na saída não foi necessariamente o de maior tempo de retenção;</li> <li>• Para a sedimentação de sólidos (partículas), menor turbulência é preferível, de forma a evitar a ressuspensão para a superfície. Assim, a configuração de dispositivo de saída que impediu a circulação nas suas proximidades resultou em melhor eficiência na remoção de partículas;</li> <li>• O impacto na sedimentação de partículas está mais relacionado aos tipos de dispositivos de saída que de entrada (provavelmente devido à longa distância entre os dois lados da lagoa, que pode reduzir a influência do efeito da <i>quantidade de movimento</i> proporcionada pelas entradas);</li> <li>• Um modelo validado seria uma nova ferramenta para previsão de remoção de algas e sólidos em suspensão na lagoa</li> </ul>
Olukanni e Ducoste (2011)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Projeto convencional de lagoas com defletores transversais a 70% da largura não é necessariamente a melhor configuração de lagoas, como relatado anteriormente na literatura, quando se leva em consideração apenas a redução de coliformes. A maior eficiência obtida foi no cenário com as lagoas operando com 2 chicanas longitudinais a 90% do comprimento;</li> <li>• Lagoas com chicanas transversais sofrem menos o impacto do tamanho do defletor que lagoas com chicanas longitudinais;</li> <li>• Cenários com maior número de chicanas de maior tamanho tendem a ser ineficientes por alterar as características de mistura no final dos canais, que pode influenciar a cinética de remoção;</li> <li>• Lagoas com 4 defletores transversais a 70% da largura pode apresentar melhor remoção de coliformes a um menor custo que uma lagoa com mesma quantidade de chicanas longitudinais;</li> <li>• Quando se inclui no modelo a análise de custo para otimização das lagoas, maiores reduções de coliformes podem ser conseguidas a menores custos combinando diversas configurações de chicaneamento e geometria das lagoas. Uma boa alternativa pode ser conseguida reduzindo a quantidade de material utilizado na construção e tolerando algum grau de mistura dentro da lagoa (o que geralmente buscou-se reduzir ao máximo pelos pesquisadores)</li> </ul>
Alvarado <i>et al.</i> (2011)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• O movimento do traçador na lagoa foi visível apenas por 30 minutos após a injeção, mas foi suficiente para visualizar que a massa de traçador percorreu uma das laterais da lagoa (em frente à entrada) em direção ao lado oposto e então para a saída, ao invés de espalhar por todo o volume da lagoa, causando curto-circuito e um padrão de movimento circular do traçador na lagoa; características típicas de unidades sem chicanas;</li> <li>• Uma menor, mas visível, quantidade de traçador permaneceu no canto mais próximo à entrada, indicando uma zona de estagnação. Zonas de estagnação também encontradas nos demais cantos, a partir do modelo;</li> <li>• Um primeiro pico do traçador real foi observado após 2 horas do pulso (aproximadamente 4% do TDH teórico), e um segundo pico após 4 horas do pulso;</li> <li>• Maiores velocidades, com comportamento claramente turbulento, encontradas apenas próximo à entrada (plano horizontal do modelo, no meio da lagoa). As demais áreas se comportaram como regiões permanentes, com baixas velocidades;</li> <li>• Variação de velocidades e turbulência ao longo da profundidade é mínima;</li> <li>• Razoável ajuste entre as curvas de traçador (real e simulada);</li> <li>• Modelo em CFD foi apto a capturar a magnitude e o tempo do primeiro pico razoavelmente bem, mas não os picos subsequentes. Tal desajuste pode ter sido ocasionado por simplificações do modelo, como a não consideração de condições meteorológicas. Os TDH médios obtidos com o experimento de traçador e com CFD foram de 2,25 e 1,66 dias, respectivamente (TDH teórico = 12 dias);</li> <li>• Qualquer esforço de refinamento do modelo deve primeiramente considerar as limitações e precisão dos dados experimentais;</li> <li>• CFD simula apropriadamente a hidráulica de lagoas, sendo uma das mais apropriadas ferramentas para descrição mais detalhadas da hidráulica desses sistemas, mas às custas de um alto consumo computacional (ainda maior se outras variáveis, como condições meteorológicas, forem contempladas);</li> <li>• É altamente recomendável validar o modelo em CFD com dados experimentais;</li> <li>• Curvas de DTR obtidas a partir de traçadores possui limitações quanto à capacidade de análise de fatores que certamente serão encontrados em lagoas (retromisturas, zonas estagnadas, turbulência). CFD pode suprir esta demanda.</li> </ul>

Sah <i>et al.</i> (2011)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dois padrões circulares do fluxo obtidos na camada superficial no cenário base (lagoa sem vento e sem chicanas). Velocidade na lagoa variou na faixa de <math>5 \times 10^{-4}</math> a <math>4 \times 10^{-3}</math>. Nos cenários com vento, o fluxo na superfície teve a tendência de seguir a direção definida do vento, e no cenário com chicanas o fluxo foi mais canalizado, com ligeiro aumento de velocidade nas curvas;</li> <li>• Padrões de fluxo e velocidades em diferentes profundidades variam também em diferentes horas do dia, devido às variações de temperatura e densidade do fluido;</li> <li>• Estratificação térmica observada no cenário base (com variação de temperatura de cerca de <math>4^\circ\text{C}</math> entre superfície e fundo), mas não observada nos cenários com ação do vento, mesmo na lagoa com chicanas.</li> <li>• Concentração de algas aumentando da entrada em direção à saída da lagoa. Gradiente ao longo do perfil vertical no cenário base e pouca diferença no perfil vertical nos cenários com vento;</li> <li>• Nos cenários sem vento, o OD atinge níveis elevados na superfície (<math>13 \text{ g/m}^3</math>), mas chega a ser quase nulo nas camadas inferiores, enquanto permanece quase nulo em todo o perfil vertical nos cenários com vento. Isso pode ter ocorrido devido as elevadas cargas adotadas no estudo (<math>807 \text{ kg/ha.d}</math>);</li> <li>• Não houve melhoria significativa da remoção de DQO (baseado no modelo de lodos ativados) com a adição de chicanas ou sob mistura intermitente induzida pelo vento, além de ter ocorrido piora na remoção de DQO quando em ventos contínuos. Já para remoção de <i>E. coli</i> (baseado no modelo de decaimento de primeira ordem) houve melhoria com a adição de chicanas e/ou ação de ventos, o que pode indicar que o conceito de decaimento de primeira ordem pode não ser apropriado para descrever complexas interações entre processos bioquímicos nas lagoas;</li> <li>• Interpretações do trabalho são teóricas, visto que o modelo carece de validação com dados de campo;</li> <li>• Limitações computacionais não são mais relevantes em modelagem de lagoas com CFD. O principal gargalo é a falta de adequado conjunto de dados de campo para calibração e validação de modelos mais complexos.</li> </ul>
Souza <i>et al.</i> (2012)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A configuração da lagoa sem chicanas foi caracterizada por altos índices de curto-circuito e grandes regiões de recirculação. A provisão de chicanas reduziu esses fatores;</li> <li>• Estreitamento gerado na configuração da lagoa com dois defletores longitudinais gerou o cenário com maior número de vórtices, dentre os simulados, ocasionando a desaceleração do fluxo e causando o maior percentual de áreas de baixas velocidades e zonas mortas (<math>&lt;10^{-2} \text{ m/s}</math>) encontrado no estudo; maior até mesmo que as configurações sem chicanas ou com apenas um defletor;</li> <li>• Lagoas com um defletor longitudinal são mais efetivas do ponto de vista hidrodinâmico, visto a criação de zonas mais pistonadas e redução de regiões com velocidade extremamente baixas;</li> <li>• Curtos-circuitos e zonas mortas são intrínsecos à maioria das lagoas;</li> <li>• As análises foram essencialmente qualitativas, sendo necessária avaliação mais quantitativa, levando em consideração as outras variáveis envolvidas.</li> </ul>
Alvarado <i>et al.</i> (2012b)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Maiores velocidades observadas na região da entrada;</li> <li>• Um perfil de velocidade de entrada adotado como variável no modelo (transiente) não impacta a velocidade e o perfil de turbulência gerais na lagoa, visto que resultados do perfil de velocidade no plano horizontal nas horas de maior e menor velocidade de entrada foram praticamente idênticos. A não necessidade de contemplar o comportamento dinâmico do fluxo de entrada pode ser generalizado para outros grandes sistemas, no qual o padrão de fluxo como um todo não é alterado por pequenas alterações na entrada. Cuidado deve ser tomado em casos de grandes alterações na entrada (ex.: picos extremos) ou em sistemas menores, que tendem a sofrer maior influência da entrada;</li> <li>• Um modelo compartimentado deve ser elaborado a partir da definição das diferentes zonas na lagoa (via inspeção visual das direções dominantes do fluxo); do volume de cada zona (via inspeção visual do fluxo e análise da curva de DTR); do número de compartimentos em cada zona (via inspeção visual e associação com o Número de Peclet) e do fluxo entre elas (via inspeção visual dos vetores de velocidade e características da turbulência); com tais informações de fluxo obtidas a partir de um modelo em CFD. A ideia é manter a maior aproximação possível do comportamento de mistura geral da lagoa,</li> </ul>

	<p>com o menor número de compartimentos (tendo em vista que um modelo biocinético será acoplado);</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Nenhuma configuração do modelo de Tanques em Série foi capaz de descrever o comportamento observado da lagoa (curva de DTR experimental), enquanto que houve bom ajuste com as curvas obtidas com o modelo compartimentado e com CFD. Estes foram capazes de capturar os picos do traçador;</li> <li>• Processos biocinéticos acoplados ao modelo compartimentado gerou resultados mais coerentes que quando acoplados a um modelo de Tanques em Série;</li> <li>• Validação do modelo e CFD com dados experimentais é altamente recomendada</li> </ul>
Alvarado <i>et al.</i> (2012a)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• O comportamento das curvas de DTR obtidas com CFD é tipicamente observado em sistemas que exibem forte padrão de recirculação;</li> <li>• Resultados dos modelos em CFD são consideravelmente afetados pela consideração aproximada da acumulação de lodo (que conseqüentemente afeta a geometria da lagoa);</li> <li>• Simplificações feitas em modelos em CFD tais como consideração do fluido com propriedades físicas iguais às da água; ignorar os efeitos das condições ambientais; condições de entrada constantes; aproximações na real geometria, são as principais razões para as diferenças entre resultados experimentais e de CFD;</li> <li>• O ajuste entre as curvas de DTR modeladas e a experimental não foi perfeito. Picos observados nas curvas obtidas via CFD não são visíveis nos resultados experimentais. Um ajuste fino do modelo e uma modelagem mais exata da topologia do lodo pode melhorar essa concordância. Entretanto, qualquer esforço de refinamento do modelo deve primeiramente considerar as limitações e precisão dos dados experimentais;</li> <li>• TDH médio decresceu ao longo do tempo de operação da lagoa, e essa redução é comparável aos cenários de acúmulo de lodo;</li> <li>• São dignos de nota nos resultados do modelo a presença de curto-circuito; forte padrão de recirculação; grande influência da entrada ao longo de toda a profundidade; pequenas zonas mortas próximo à entrada e grande zona morta no centro da lagoa;</li> <li>• Topologia do acúmulo do lodo afeta o padrão de fluxo na lagoa, bem como também o padrão de fluxo dita o padrão de acumulação (ex: regiões de vórtex com baixas velocidades e zonas mortas favorecem picos de lodo acumulado);</li> <li>• Forte influência da uma entrada única no padrão de deposição do lodo. A entrada única com baixas velocidades contribuiu para o maior acúmulo próximo à região de entrada;</li> <li>• CFD se mostrou útil na avaliação do desempenho hidrodinâmico de um sistema afetado por grande quantidade de lodo acumulado e na análise de padrões de acúmulo em relação ao padrão hidrodinâmico da lagoa;</li> <li>• CFD tem potencial de ser utilizada em no estágio de planejamento de um sistema por meio de análise de cenários futuros de acumulação de lodo.</li> </ul>
Passos <i>et al.</i> (2014a)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Grande influência do vento na superfície da lagoa (primeiros 5 cm de profundidade);</li> <li>• Curto-circuito e zonas de recirculação causados por uma das tubulações de entrada (a que recebeu 80% da vazão). De fato, tal dispositivo de entrada foi o principal condicionador do padrão de fluxo observado na lagoa, provocando uma trajetória principal predominantemente circular e um alto grau de mistura;</li> <li>• Zonas de estagnação nas laterais e cantos da lagoa</li> <li>• <i>Drogue</i> com GPS embutido, desenvolvido e construído como parte da pesquisa, apresentou resultados satisfatórios. As trajetórias do <i>drogue</i> foram similares ao padrão de fluxo obtido via CFD, ditadas pela entrada;</li> <li>• Zonas mortas e de recirculação, com baixas velocidades, coincidiram com áreas de maior acumulação de lodo;</li> <li>• Traçador virtual apontou THD médio (87 dias) próximo ao teórico correspondente ao cenário simulado (80 dias), com 2 picos do traçador, sendo o primeiro devido ao curto-circuito e o segundo atribuído à chegada do fluxo proveniente da entrada que recebeu menor vazão.</li> <li>• Dispersão elevada na lagoa (<math>d=0,25</math>);</li> <li>• CFD se provou útil na avaliação das condições hidrodinâmicas de lagoas, reforçando uma tendência que está sendo consolidada em pesquisas recentes. O modelo gerou resultados similares aos observados em campo, podendo ser utilizado como ferramenta de avaliação em futuras melhorias na lagoa, como a equalização do fluxo. Entretanto, para uma análise mais refinada, uma validação quantitativa é ainda necessária.</li> </ul>

A partir do exposto, observações gerais foram feitas a respeito dos métodos utilizados, dos principais resultados e conclusões fornecidas pelos trabalhos listados, bem como a identificação de lacunas, impasses, tendências, boas práticas de modelagem e potencialidades referentes ao uso de CFD em lagoas. Tais observações também incorporam uma análise crítica desses trabalhos, e não apenas o que relatado pelos autores ou o que foi compilado nesta revisão.

### Aspectos da modelagem de lagoas com CFD

Aparentemente, os estudos com CFD em lagoas surgiram na década de 90, com publicações em periódicos a partir de 1995. Entretanto, nota-se que foi a partir do ano 2000 que a técnica ganhou força na aplicação em lagoas, com publicações observadas em praticamente todos os anos após isso. Este número tende a aumentar com os avanços computacionais (maior velocidade de processamento); com a disponibilidade cada vez maior de *softwares* com interfaces gráficas amigáveis e intuitivas; e com a compatibilidade entre diferentes *softwares* utilizados durante as etapas da modelagem, de forma a permitir, por exemplo, que o usuário venha a conceber a geometria da lagoa no software que lhe for mais conveniente, depois migrar para outro onde seja mais fácil trabalhar com a malha, um outro para processamento das simulações e assim sucessivamente. Ainda assim, o número de publicações pode ser considerado reduzido, se comparado com outros temas e métodos pesquisados em lagoas, o que por si só já constitui uma lacuna de pesquisa a ser preenchida.

Os itens que seguem contêm breves comentários e discussões a respeito dos trabalhos pesquisados, e foram agrupados por “aspectos chaves” da prática de modelagem em lagoas utilizando CFD, com o intuito de identificar os principais métodos utilizados, resultados, lacunas, impasses e tendências.

### Principais aplicações da modelagem por CFD em lagoas de estabilização

A maioria dos trabalhos foram realizados com ênfase na observação geral do fluxo na lagoa em estudo ou na influência da configuração geométrica da lagoa no seu desempenho, tais como a relação comprimento/largura; posicionamento, dimensões e quantidades de chicanas e defletores e locação dos dispositivos de entrada e saída (Wood *et al.*, 1995; Wood *et al.*, 1998; Persson, 2000; Salter *et al.*, 2000; Shilton, 2000; Baléo *et al.*, 2001; Shilton e Harrison, 2003c; Vega *et al.*, 2003; Shilton e Mara, 2005; Aldana *et al.*, 2005; Abbas *et al.*, 2006;

Banda *et al.*, 2006a; Shilton *et al.*, 2008; Abbassi *et al.*, 2010; Herdianto *et al.*, 2010; Olukanni e Ducoste, 2011; Alvarado *et al.*, 2011; Sah *et al.*, 2011; Souza *et al.*, 2012; Passos *et al.*, 2014a). Em bem menor número estão as investigações relacionadas à radiação solar ou perfil térmico (Salter *et al.*, 2000; Sweeney *et al.*, 2005; Karteris *et al.*, 2005; Banda *et al.*, 2006a; Sah *et al.*, 2011), ao efeito do vento (Sweeney *et al.*, 2003; Vega *et al.*, 2003; Aldana *et al.*, 2005; Banda *et al.*, 2006b; Sah *et al.*, 2011; Passos *et al.*, 2014a); ao lodo acumulado (Vega *et al.*, 2003; Alvarado *et al.*, 2012a; Murphy, 2012; Ouedraogo *et al.*, 2016; Coggins *et al.*, 2017); à relação entre a hidrodinâmica e a qualidade da água (Sweeney *et al.*, 2007) ou análises desses fatores combinados.

Aplicações distintas podem ser vistas nos trabalhos de Alvarado *et al.* (2012a) e de Olukanni e Ducoste (2011). Os primeiros utilizaram os resultados de um modelo em CFD para fornecer informações de entrada de um outro modelo (compartimentado), de forma que as zonas e compartimentos, bem como suas características de dimensão e trocas de fluxo, foram determinados com base no perfil hidrodinâmico fornecido pelo modelo em CFD. O trabalho desses autores enquadra-se bem no protocolo de Laurent *et al.* (2014), já mencionado, que sugerem a utilização de CFD como ferramenta de suporte para modelagem de sistemas de tratamento de esgoto e melhoria dos modelos tradicionais. Já Olukanni e Ducoste (2011) utilizaram um modelo de CFD com um programa de otimização para seleção da melhor configuração de lagoas (geometria e condições de chicaneamento), baseado no custo e na eficiência de tratamento.

### Definições gerais utilizadas na modelagem

Quase todos os trabalhos pesquisados mencionam a quantidade de elementos de malha utilizados na simulação, bem como a necessidade de refinamento nas regiões próximas a entradas, saídas, paredes e locais de grandes mudanças de direção do fluxo (ex.: curvas de chicanas). Por outro lado, poucas referências mencionam questões de estabilidade numérica, condições de contorno, critérios de convergência, passos de tempo utilizados nas simulações, duração total etc. Exceções podem ser vistas em Karteris *et al.* (2005), Abbassi *et al.*, (2010) e Passos *et al.* (2014a).

Estas informações podem ser importantes para comparação entre modelos, principalmente no que diz respeito à estabilidade numérica. O número de Courant, por exemplo, que constitui relação entre escalas de comprimento obtidas com a simulação e a escala de comprimento da

malha, é um bom indicativo da estabilidade das simulações em regime transiente, de forma que menção aos valores obtidos nas simulações - bem como a estabilidade observada do modelo correspondente - podem servir de guia a outros pesquisadores. Neste sentido, Vega *et al.* (2003) relataram que o número de Courant no valor de 20 demonstrou boa estabilidade computacional para as simulações e Passos *et al.* (2014a) trabalharam com este índice nas proximidades da unidade (não relatado no trabalho). Definido um número de Courant, a relação entre o passo de tempo adotado na simulação (*time step*) e o TDH teórico da lagoa que está sendo modelada, ou a relação entre dimensões características da malha e da lagoa, poderiam servir de índice de comparação entre modelos no quesito refinamento e estabilidade, mesmo que de modo preliminar e grosseiro.

Quanto aos critérios de convergência, trabalhos que os mencionam relatam a verificação do RMSE (*Root Mean Square Error*) para todas as variáveis de processamento. Valores de referência para tolerância de erros residuais se situam entre  $10^{-6}$  a  $10^{-3}$  (Wood *et al.*, 1998; Karteris *et al.*, 2005; Abassi *et al.*, 2010; Olukanni e Ducoste, 2011; Passos *et al.*, 2014).

#### O fluido no domínio das simulações

Exceto no trabalho de Karteris *et al.* (2005), em todos os outros trabalhos em lagoas de estabilização os autores utilizaram as propriedades da água para o fluido no domínio de simulação ou não fizeram menção a respeito. Karteris *et al.* (2005) utilizaram propriedades definidas para águas residuárias (densidade e capacidade calorífica) atribuídas por Stafford *et al.* (1981) e propriedades da água em lagoas de aquacultura (condutividade térmica e viscosidade dinâmica) atribuídas por Peterson *et al.* (2000). No entanto, Alvarado *et al.* (2012) citam a simplificação de considerar o fluido como tendo as mesmas propriedades físicas da água como um dos fatores responsáveis pela ausência de ajuste entre modelos em CFD e dados experimentais.

A aproximação das propriedades do esgoto às da água é geralmente assumida devido à ausência de dados experimentais e registros na literatura, e também à similaridade entre os dois fluidos quanto às propriedades de escoamento, já que o esgoto é composto por aproximadamente 99,9% de água (VON SPERLING e CHERNICHARO, 2005). Entretanto, deve-se considerar também que o fluido já na lagoa é completamente diferente do esgoto bruto, principalmente por causa dos sólidos em suspensão (algas, por exemplo). Em seus trabalhos, Wood *et al.* (1998) e Alvarado *et al.* (2011) relataram que as concentrações de

sólidos suspensos encontradas em lagoas ( $\leq 100$  mg/l, citado por Wood *et al.*;  $\leq 30$  mg/l citado por Alvarado *et al.*) não afetam significativamente as propriedades do fluido definidas para simulação.

É importante notar que propriedades importantes do fluido, como densidade e viscosidade, são fundamentalmente dependentes de fatores como concentração de sólidos e temperatura. Para concentração de sólidos acima de 2%, o fluido se torna não-newtoniano, onde a física se torna mais complexa e deve ser considerada (WICKLEIN *et al.*, 2016). Entretanto, dificilmente esses valores de concentração de sólidos são atingidos na parte do fluido que escoar em lagoas não mecanizadas (pode-se encontrar no lodo acumulado no fundo, por exemplo).

É claro que um maior refinamento conseguido com uma maior aproximação das propriedades reais do fluido trará ganhos nas simulações, principalmente nas etapas de calibração do modelo e de verificação de erros de ajuste (que neste caso podem ser atribuídos com maior grau de acerto a outros aspectos, que não os de propriedades do fluido), mas este não parece ser um fator chave para o sucesso das simulações, visto se tratar de pequenos desvios do real, de menor impacto que variáveis como a vazão de entrada e condições ambientais.

### Representação da turbulência

Quase em todas as aplicações de CFD em águas residuárias irá tipicamente requerer uma adequada abordagem para a turbulência. Uma grande gama de modelos estão disponíveis e são rotineiramente utilizados (WICKLEIN *et al.*, 2016).

Em lagoas de estabilização, dos trabalhos identificados, apenas os de Wood *et al.* (1995), Karteris *et al.* (2005), Baléo *et al.* (2001), Banda *et al.* (2006a) e Olukkani e Ducoste (2011) foram realizados sob condições laminares do fluxo. Wood *et al.* (1995) justificaram isto pela baixa vazão de entrada, que foi definida no modelo para permitir esta consideração (mas os autores registram que se tratou de uma simplificação grosseira), Karteris *et al.* (2005) justificaram pelas baixas velocidades encontradas em campo e Baléo *et al.* (2001) e Olukkani e Ducoste pelos baixos números de Reynolds estimados na unidade em escala modelo utilizada nos experimentos.

De fato, devido às grandes dimensões das lagoas reais, o regime tende a ser predominantemente turbulento nesses sistemas. Mesmo em lagoas com baixas velocidades encontradas ou estimadas, espera-se que algum grau de turbulência seja encontrado, principalmente próximo aos dispositivos de entrada ou curvas de chicanas. Assim, pode-se supor que modelos que contemplem a turbulência se aproximem mais da situação real.

Todos os trabalhos compilados que consideraram a turbulência fizeram menção ao modelo k- $\epsilon$  ou não especificaram. Segundo Alvarado (2013), o modelo k- $\epsilon$  tem sido amplamente utilizado na modelagem de lagoas em CFD, com grande sucesso. Exceções da lista foram Persson (2000), que utilizaram o modelo de Smagorinsky, e Passos *et al.* (2014a), que utilizaram o modelo híbrido SST (*Shear Stress Transport*), derivado do k- $\epsilon$  e k- $\omega$ . O parágrafo seguinte traz uma descrição sucinta destes modelos.

O modelo k- $\epsilon$  (LAUNDER E SPALDING, 1974), que contempla a produção e dissipação de energia cinética turbulenta, é um dos modelos de duas equações mais utilizados em simulações de CFD em geral, e não apenas em lagoas, proporcionando uma boa relação entre esforço computacional e precisão. O modelo k- $\epsilon$  é um modelo robusto no estudo de escoamentos complexos, mas pouco elucidativo nos fenômenos que ocorrem na camada limite da superfície de escoamento. Nesse ponto, há disponível o modelo k- $\omega$  (WILCOX 1988; 1993; 1994; 2006), outro modelo de duas equações (com  $\omega$  representando a frequência da turbulência), sendo o mais eficiente na camada limite. Porém, a equação de  $\omega$  é muito sensível para a descrição de escoamentos livres, o que torna inviável a substituição do modelo k- $\epsilon$  pelo k- $\omega$ . A fim de resolver esse problema, uma combinação do modelo k- $\omega$  próximo à superfície e do modelo k- $\epsilon$  na região afastada foi proposto por Menter (1992), levando ao desenvolvimento do modelo SST (*Shear Stress Transport – Transporte de tensão cisalhante*). O modelo SST consiste em uma transformação do modelo k- $\epsilon$  para uma formulação k- $\omega$  e uma subsequente adição das equações correspondentes. De acordo com essa formulação, o modelo k- $\omega$  é multiplicado por uma função acopladora  $F1$  e o modelo transformado k- $\epsilon$  por uma função  $1 - F1$ , de forma que  $F1$  se torna igual à unidade na região logarítmica (perto das superfícies) e nula fora da mesma. Assim, na camada limite, o modelo k- $\omega$  é usado, e, na borda e fora da camada limite, o modelo k- $\epsilon$  padrão é usado (Passos *et al.*, 2014a). A partir deste ponto de vista, é razoável supor que as características de dualidade do modelo SST também podem ser apropriadas para modelagem em lagoas, já que proporcionam melhor captura dos fenômenos de parede (que podem ser importantes na análise do fluido próximo

aos taludes, zonas estagnadas, influência do vento etc.), sem comprometer a descrição dos campos livres de escoamento (predominantes em lagoas).

Há também modelos que podem ser mais precisos e de aplicações mais gerais, com melhor representação das propriedades do fluxo turbulento em determinadas situações, como nos casos de fluxos com muitos turbilhões ou curvas. Naturalmente, melhor precisão comumente virá acompanhada de maior custo computacional. Wicklein *et al.* (2016) trazem detalhes de outros modelos comumente disponíveis (como DES – *Direct numerical simulation*, LES – *Large eddy simulation*), mencionando vantagens e desvantagens da utilização de cada um.

### Definição da geometria, malha e condições de contorno

A precisa caracterização geométrica é necessária nos problemas com CFD, visto que a geometria tem efeito significativo no comportamento de escoamento. Além disso, como já mencionado, muitos dos trabalhos em lagoas têm por objetivo justamente avaliar o impacto da geometria do desempenho da unidade, o que por si só já demanda maior atenção para esta etapa.

A maior parte dos modelos em lagoas tem sido desenvolvida a partir de geometrias tridimensionais (Salter *et al.*, 2000; Shilton, 2000; Baléo *et al.*, 2001; Sweeney *et al.*, 2003; Shilton e Mara, 2005; Aldana *et al.*, 2005; Sweeney *et al.*, 2005; Karteris *et al.*, 2005; Banda *et al.*, 2006a; Banda *et al.*, 2006b; Sweeney *et al.*, 2007; Shilton *et al.*, 2008; Herdianto *et al.*, 2010; Alvarado *et al.*, 2011; Sah *et al.*, 2011; Souza *et al.*, 2012; Alvarado *et al.*, 2012b; Alvarado *et al.*, 2012a; Passos *et al.*, 2014a). Modelos bidimensionais (Wood *et al.*, 1995; Wood *et al.*, 1998; Persson, 2000; Shilton e Harrison, 2003c; Vega *et al.*, 2003; Abbas *et al.*, 2006; Abbassi, 2010; Olukanni e Ducoste, 2011) são comumente justificados assumindo pouca variação do fluxo no perfil vertical.

Wood *et al.* (1998) concluíram sobre a boa aplicabilidade da ferramenta CFD em modelagem de lagoas, mas não recomendaram o uso de modelos 2D para descrição da hidrodinâmica de lagoas de estabilização. Vega *et al.* (2003) afirmam que o modelo bidimensional utilizado no trabalho foi capaz de prever razoavelmente bem os fenômenos de dispersão hidrodinâmica e advecção em lagoas, no entanto, demandando grau significativo de esforço durante os processos de calibração e verificação, a fim de simular as condições semelhantes a um modelo tridimensional. Os autores que utilizaram modelos bidimensionais em seus trabalhos afirmam

que esses são confiáveis e precisos, desde que o fluxo não esteja sujeito a efeitos tridimensionais mais relevantes, tais como os associados à estratificação vertical ou a uma geometria complexa. No entanto, estas situações raramente deixam de existir na prática (inclusive, como foi constatado neste trabalho), tornando os modelos bidimensionais insuficientes em representar o comportamento de lagoas. Badrot-Nico *et al.* (2010) afirmam que os modelos bidimensionais mostraram ser pouco adequados para a modelagem de lagoas que, mesmo sendo rasas, estão sujeitas a mecanismos tridimensionais influentes. Portanto, modelos em 3D são essenciais para a avaliação completa e precisa do desempenho de lagoas.

De forma geral, Wicklein *et al.* (2016) aconselham a reserva de tempo considerável na coleta dos dados de geometria com a precisão requerida, a partir de fontes como o projeto inicial, desenhos *as-built*, fotografias, medições e verificações de campo. Se forem utilizados desenhos mais antigos, um esforço deve ser feito para validação em campo. Outra recomendação dos mesmos autores é que uma quantidade suficiente da geometria deve ser incluída a montante da unidade de interesse (que está sendo analisada), tradicionalmente de cinco a 10 vezes o comprimento característico, podendo ser maior em caso de ocorrência de singularidades como curvas, obstruções etc. Tal distância seria necessária para obter um campo de escoamento totalmente desenvolvido (TU *et al.*, 2012). No caso de lagoas, tal recomendação se aplicaria, por exemplo, na manutenção da geometria da tubulação de entrada a montante do lançamento por cinco a dez vezes o seu diâmetro.

Com relação à malha, conforme já mencionado, raros trabalhos publicados apresentam detalhes do processo de geração, ficando esta descrição na maioria das vezes restrita a dissertações ou teses. Quando há menção, geralmente é sobre a necessidade de refinamento nas regiões de interesse nas lagoas, tais como próximo a entradas e saídas, o que por si só já faz parte dos critérios mínimos que devem ser obedecidos para uma boa qualidade da malha e convergência. Além dessas regiões, maior refinamento comumente é necessário em regiões com maior possibilidade de as variáveis apresentarem gradientes acentuados, a fim de reduzir a propagação de erros numéricos (WICKLEIN *et al.*, 2016). Outros fatores também devem ser observados para uma boa qualidade da malha e foram descritos por Wicklein *et al.* (2016), sendo um deles a razão de comprimento (relação comprimento e largura) e assimetria (desvio do equilátero) dos seus elementos. Recomenda-se que a razão de comprimento de cada elemento de malha esteja o mais próximo possível da unidade e a assimetria o mais próximo

possível de zero, devendo esta última ser menor que 0,9 para a maioria das soluções, particularmente nas áreas de interesse (WICKLEIN *et al.*, 2016).

Apesar da falta de mais detalhes sobre métodos e critérios de geração de malha, referências e menções sobre dimensões ou quantitativos podem ser encontradas em trabalhos publicados: Em Shilton (2000), cerca de 13.500 células individuais foram utilizadas no modelo tridimensional de uma lagoa de cerca de 60 m de largura e 120 m de comprimento. A malha computacional utilizada por Salter *et al.* (2000) foi do tipo estruturada de 8 x 48 x 18, para simulações em uma lagoa com 2,5 m de profundidade e cerca de 430m de comprimento e 180m de largura (nas suas dimensões maiores, já que a lagoa apresentava geometria irregular). Shilton e Harrison (2003) e Shilton *et al.* (2008) modelaram uma lagoa secundária de 73 m de comprimento, 24,5 m de largura e 1,5 m de profundidade por uma malha 3D compreendendo aproximadamente 50.000 células. Vega *et al.* (2003) utilizaram uma malha 2D uniforme retangular de elementos finitos com 2.912 nós de cálculo para representar uma lagoa anaeróbia com 56 x 26 m (superfície) e 4 m de profundidade. Karteris *et al.* (2005) modelaram uma lagoa anaeróbia de 570 m<sup>3</sup> (dimensões de superfície de 21 x 21m, base 3 x 3 m, inclinação dos taludes 2:1) com uma malha 3D com 4827 elementos tetraédricos e 1 piramidal. Em Abbassi *et al.* (2010), uma malha 2D foi desenvolvida dividindo a superfície da lagoa (500 x 100 m) em 711819 quadriláteros homogêneos de 0,3 x 0,3 m. Em Badrot-Nico *et al.* (2010), simulações de lagoas com geometria retangular (sendo a área de 30 x 60 m e a profundidade de 1,6 m) foram realizadas usando células de 1,5 x 1,5 x 0,2 m. Alvarado *et al.* (2012) utilizaram uma malha 3D de volumes finitos, dividindo o domínio computacional (lagoa de maturação com 70.000 m<sup>2</sup> e profundidade de 1,7 m) em 75000 elementos. Passos *et al.* (2014) utilizaram uma malha 3D de volumes finitos compreendendo 73084 elementos tetraédricos em um modelo de lagoa facultativa (área de superfície de aproximadamente 19.800 m<sup>2</sup> e profundidade do líquido de 2,90 m). Grosso modo, pode ser visto nas publicações com modelos em 3D que a utilização de malha variou de cerca de 1 a 18 elementos por metros cúbicos de fluido na lagoa.

Espera-se melhoria significativa da estabilidade das simulações com o aumento do grau de refinamento da malha e evitando-se deformações e transições bruscas entre suas regiões, mas, naturalmente, será exigido também maior esforço computacional e também menores passos de tempo em simulações transientes, que refletirão, por exemplo, no número de Courant. Tais questões reforçam ainda mais a necessidade de testes de independência da malha, a fim de

definir o melhor cenário entre qualidade da malha, convergência, tempo e esforço computacional.

As condições de contorno a serem utilizadas em modelagem de lagoas são as típicas de simulações em CFD em todas as áreas, consistindo fundamentalmente em condições de entradas, saídas e aberturas (podendo apresentar definições de velocidade, pressão, fluxo de massa, turbulência); condições de parede com deslizamento ou sem deslizamento (podendo este último apresentar componentes de rugosidade) e condições de simetria (quando a geometria e o campo de escoamento são simétricos e espelhados, permitindo assim a simplificação do problema por meio da resolução apenas em uma faixa do domínio).

Geralmente em lagoas, as condições de contorno de entrada são utilizadas para modelar a estrutura de chegada do efluente, definindo-se uma velocidade ou um fluxo mássico representativos da vazão. As condições de contorno tipo saída ou abertura são utilizadas para modelar a estrutura de tomada de efluente da lagoa, de forma que o tipo saída é mais recomendado quando se conhece com exatidão o sentido do fluxo na saída. As condições de contorno do tipo parede são definidas para o fundo, chicanas, estruturas internas e taludes, quando será possível caracterizar o seu material por meio da definição da rugosidade, ou até mesmo para a superfície, caso seja necessário definir tensões de cisalhamento, tal como a influência do vento. A partir das paredes também são definidos os modelos para análise de outros fatores ambientais externos ou até mesmo de interação com o fluido.

#### Análise de sensibilidade

São poucos os registros de análises de sensibilidade do modelo (avaliação da resposta do modelo a variações de parâmetros), sendo que a grande maioria desses menciona apenas testes de independência da malha (refinamento da malha até o ponto em que o ganho de qualidade não produz alterações significativas nos resultados obtidos) ou sensibilidade a um ou outro parâmetro. Sah *et al.* (2011) também destacam esta ausência nos modelos pesquisados por eles, alertando que se trata de um importante passo da modelagem que está sendo negligenciado. Exceções foram os trabalhos de Wood *et al.* (1998), que conduziram testes de sensibilidade do modelo em relação a outros parâmetros, além do grau de refinamento da malha, tais como balanço de massa em regimes de escoamento permanente e transiente, difusividade do traçador e condições de contorno de turbulência; e de Vega *et al.* (2003), que também conduziram testes de sensibilidade do modelo em relação a outros

parâmetros além da malha, tais como a significância do vento, da rugosidade do fundo da lagoa, do número de dispersão e da vazão de entrada.

Wood *et al.* (1998) declararam pouca sensibilidade do modelo para o balanço de massa (variando entre os regimes de escoamento permanente e transiente), difusividade do traçador e condições de contorno de turbulência. Este resultado é particularmente importante para modelagem de lagoas em CFD, visto que valores precisos desses parâmetros são difíceis de serem estabelecidos em sistemas reais. No trabalho desses autores, maior sensibilidade do modelo foi encontrada com relação às condições de entrada na lagoa (diâmetro da tubulação, velocidades de entrada), que influenciaram consideravelmente o padrão de fluxo. Vega *et al.* (2003) encontraram alta sensibilidade do modelo à vazão de entrada e ao coeficiente de rugosidade, sensibilidade moderada à velocidade e fricção do vento e nenhuma sensibilidade a pequenas variações do nível da água (da ordem de 1 mm). Considerando também os diversos pesquisadores que relataram a grande influência do dispositivo de entrada na determinação do padrão principal do fluxo (ex: Wood *et al.*, 1998; Shilton, 2000; Shilton *et al.*, 2008; Alvarado *et al.*, 2012a; Passos *et al.*, 2014a), pode-se afirmar que há um consenso na literatura quanto a esse respeito. Autores como Herdianto *et al.* (2010) enfatizaram também o grande efeito da configuração do dispositivo de saída para o desempenho de lagoas, e Passos *et al.* (2014a) chegaram a fazer análise de sensibilidade das condições de contorno de saída, observando a grande influência desta nos resultados da simulação.

Assim, é reforçada a tese de que os dispositivos de entrada e saída devem ser fielmente representados nos modelos, evitando simplificações na sua geometria, direção, posição ou dimensões, e cuidando para atribuir a condição de contorno mais adequada ao caso em questão. Como nos exemplos dos trabalhos supramencionados, sugere-se também conduzir testes de sensibilidade como auxiliar das definições de simulação.

#### Incorporação da modelagem da qualidade da água

São poucos os modelos que integram a modelagem hidrodinâmica com qualidade da água, consistindo em uma grande lacuna já identificada por Sah *et al.* (2012) e discutida pelos autores. Modelos de qualidade da água predominantemente utilizados nos trabalhos consideraram cinética de primeira ordem para remoção de poluentes - DBO, por exemplo - ou decaimento bacteriano (Salter *et al.*, 2000; Shilton, 2000; Shilton e Harrison, 2003c; Vega *et al.*, 2003; Shilton e Mara, 2005; Abbas *et al.*, 2006; Banda *et al.*, 2006a; Banda *et al.*, 2006b;

Olukanni e Ducoste, 2011). Sah *et al.* (2011) também consideraram cinética de primeira ordem para decaimento bacteriano, mas utilizaram o conceito do modelo de lodos ativados da *International Water Association* (ASM) para simular a remoção de DQO e nitrogênio. Os resultados para as duas diferentes abordagens no trabalho de Sah *et al.* sugerem que o conceito de decaimento de primeira ordem pode não ser apropriado para descrever processos bioquímicos mais complexos em uma lagoa. Assim, o conceito da modelagem mais avançada do sistema de lodos ativados poderia servir melhor a esse propósito, fornecendo um cenário mais realista do desempenho do sistema em análise. Entretanto, como mesmo mencionam os autores, tais conclusões são ainda somente teóricas, visto que o modelo não fora previamente calibrado e validado. Le Moullec *et al.* (2010) e Sobremisana *et al.* (2011) apresentam trabalhos de modelagem com combinação de CFD e ASM, dos quais analogias podem ser feitas para modelagem das reações biocinéticas de lagoas em CFD.

Demais exemplos podem ser vistos em Abbas *et al.* (2006), que utilizaram um modelo advectivo-difusivo para oxigênio dissolvido e em Sah *et al.* (2011), que utilizaram o modelo RWQM 1 (*River Water Quality Model* n°. 1; Reichert *et al.*, 2001), para representar o crescimento de algas.

Importantes considerações foram também tecidas por Wicklein *et al.* (2016). Os autores mencionam que cuidado deve ser tomado quando da incorporação de modelos biocinéticos, visto que os mesmos foram derivados assumindo-se determinadas condições de mistura, o que pode conduzir a perdas de qualidade caso o usuário venha a realizar alguma tentativa de calibração (aproximação entre modelos teóricos e de CFD) com ajuste arbitrário de parâmetros.

Dada a complexidade das reações biocinéticas que ocorrem nas lagoas, e a dependência dessas reações das condições ambientais (também variáveis), dificilmente um modelo de qualidade conseguirá captar com precisão todos os fatores intervenientes. Entretanto, espera-se cada vez maior aproximação à realidade com a inclusão desses fatores. A integração de modelos de qualidade mais avançados com a hidrodinâmica consiste em uma área ainda muito pouco explorada na literatura.

## Representação do lodo de fundo nas lagoas

Apenas dois trabalhos consideraram a conformação do lodo acumulado na geometria do modelo (Vega *et al.*, 2003 e Alvarado *et al.*, 2012a). Em tese, para considerar a real geometria do lodo em modelos de CFD, deve-se subtrair o volume sólido (formado pela conformação batimétrica) do volume total da lagoa, restando assim apenas o domínio da simulação (o fluido), com interface com o fundo da lagoa (representada pela camada superficial do lodo e, portanto, com suas características). No trabalho de Alvarado *et al.* (2012a), o volume relativo à camada de lodo não foi obtido diretamente dos dados batimétricos. No processo de construção da geometria da lagoa para simulação, elementos geométricos foram utilizados para representar a real conformação batimétrica e posterior subtração do domínio, mas em determinados pontos esses elementos ficaram muito grandes e a representação menos precisa (informações não detalhadas na publicação). Em Vega *et al.* (2003), a real conformação tridimensional da batimetria do lodo não foi levada em consideração, visto se tratar de modelo bidimensional.

O reduzido número de trabalhos publicados que consideraram a geometria do lodo acumulado já revela uma das grandes lacunas na modelagem de lagoas com CFD. Reforça ainda mais esta última assertiva o fato de que lagoas comumente apresentam lodo acumulado, em algum grau. A não consideração do lodo em modelos é razoável quando se trata de análises de projeto, lagoas de operação recente ou lagoas que não sejam primárias, com pouco tempo de operação; se contrário, espera-se presença considerável do lodo, que não pode ser negligenciada, visto a sua grande influência no comportamento hidrodinâmico das lagoas.

Nos cenários de acúmulo de lodo estudados por Vega *et al.* (2003), pronunciado efeito canal (curto-circuito) foi encontrado no cenário que assumiu a maior quantidade de lodo (50% do volume), sendo que, a partir deste volume, o lodo acumulado passa a ser prejudicial ao desempenho. No mesmo trabalho, o cenário de acúmulo médio de lodo (20% do volume) resultou em melhor distribuição da velocidade, e o cenário sem lodo acumulado resultou em melhor distribuição da velocidade, mas com maiores magnitudes, devido às menores rugosidades de fundo atribuídas a este cenário. Nota-se que Vega *et al.* (2003) atribuem notável importância, não só ao volume de lodo acumulado, que naturalmente reduz o volume útil e altera o padrão de fluxo, mas também à rugosidade de fundo proporcionada pela superfície do lodo acumulado, alterando velocidades de escoamento.

Alvarado *et al.* (2012a) observaram que os resultados dos modelos em CFD são consideravelmente afetados pela inclusão do lodo, mesmo que de forma aproximada, concluindo que a topologia de acumulação do lodo afeta o padrão de fluxo na lagoa. Fatores limitantes para o desenvolvimento de modelos com lodo certamente estão relacionados à dificuldade de determinação em campo (batimetria), principalmente em lagoas maiores e mais profundas, e à própria técnica computacional para representar a real geometria tridimensional do lodo.

Quanto ao primeiro ponto, equipamentos eletrônicos (ex.: ecobatímetros, pHmetros e medidores de teores de sólidos em suspensão) podem ser uma boa alternativa para a detecção da camada de lodo quando há disponibilidade desses equipamentos, constituindo técnicas de mais rápida execução. Em locais onde equipamentos eletrônicos de medição de campo não se encontram facilmente disponíveis, dispositivos de medição direta, como hastes graduadas, podem constituir alternativas de baixo custo, de fácil montagem e utilização e de resultados satisfatórios em lagoas, independentemente do porte, tal como registrado nos trabalhos de Passos *et al.* (2014b), realizados em lagoa facultativa e de maturação em escala real ( $\approx 20000 \text{ m}^2$  e  $4700 \text{ m}^2$ , respectivamente) e de Possmoser-Nascimento *et al.* (2014) em lagoas de polimento em escala de demonstração ( $\approx 132 \text{ m}^2$ ).

Quanto ao segundo possível fator limitante, de fato, até então não há descrito na literatura resultados de modelos que consideraram a real geometria do lodo fornecida pela batimetria, ou discussões sobre se realmente é ou não necessário tal refinamento (ou se a adoção de geometrias simples e aproximadas para o lodo já é suficiente). Trata-se de uma clara lacuna na literatura a ser preenchida, buscada também neste trabalho.

Em uma abordagem mais avançada, imagina-se também ser possível que o volume e a conformação do lodo sejam considerados em modelos de CFD por meio de simulações com domínio multifásico, ou seja, lodo e fluido coexistindo em fases diferentes no volume total da lagoa, com suas respectivas propriedades físicas e modelos de integração. Estudos com esta abordagem abririam inúmeras possibilidades de análises e contribuições à literatura, não apenas sobre a relação de influência entre lodo e hidrodinâmica, mas também sobre reações e fenômenos que acontecem no próprio lodo (que neste caso poderiam ser modelados) e sua interação com o fluido.

### Consideração de fatores ambientais externos

Trabalhos que consideraram fatores ambientais interferentes nas lagoas, tais como vento (velocidade e direção), temperatura do ar ou radiação solar, mencionam valores adotados como constantes em cada simulação, ou, como em Sweeney *et al.* (2005) e Karteris *et al.* (2005), valores adotados de acordo com as tendências diurnas observadas em campo.

Em Sweeney *et al.* (2005) foram consideradas as tendências de variação da radiação solar, temperatura do ar e temperatura do afluente. O método de implementação dessas variações não foi detalhado no trabalho. Os dados de vento foram considerados como constantes para as condições de contorno que dependiam desses valores, mas não foram incluídos diretamente no modelo como fator dinâmico gerador de tensão cisalhante na superfície. Em Karteris *et al.* (2005), as tendências de variação de temperatura do ar e do afluente foram implementadas por meio de algoritmo externo para leitura dos dados de campo para um determinado cenário de simulação.

Os ventos são comumente modelados como um fator externo, atribuído como condição de contorno, capaz de gerar na superfície da lagoa uma determinada tensão de cisalhamento cuja magnitude depende da velocidade do vento medida a determinado nível (Equação 3.54).

Não há registros na literatura de modelos dinâmicos que consideraram as suas variações ao longo do tempo, nem em velocidades, nem em direções. Apenas são assumidas velocidade constante e direção predominante (Vega *et al.*, 2003; Aldana *et al.*, 2005; Passos *et al.*, 2014a) ou são simulados cenários diferentes, sendo cada um com uma determinada condição de velocidade e direção para o vento (Sweeney *et al.*, 2003; Banda *et al.*, 2006b; Sah *et al.*, 2011). Há claramente aí outra lacuna a ser preenchida por pesquisadores que utilizam CFD em lagoas, a fim de colher informações mais precisas a respeito da influência do vento no comportamento hidrodinâmico das lagoas ou até mesmo para gerar discussões a respeito da necessidade ou não de elaborar modelos mais refinados com efeito dinâmico desses fatores ambientais externos; fator também abordado neste trabalho.

### Inclusão de modelo térmico e de empuxo

No que se refere às publicações que incluíam modelos térmicos, o trabalho de Salter *et al.* (2000) consistiu em uma abordagem mais simplificada, no qual um determinado perfil

térmico foi atribuído à lagoa no modelo em CFD e seu impacto na hidrodinâmica simulado. Abordagem similar foi adotada por Banda *et al.* (2006a). Já os trabalhos de Sweeney *et al.* (2005), Karteris *et al.* (2005) e Sah *et al.* (2011) foram elaborados a partir de uma outra abordagem, tendo como objetivo prever a estratificação térmica em uma lagoa a partir de balanço térmico em CFD (transferências de calor na lagoa e com o ambiente externo), de forma que os perfis de temperatura foram resultado direto das simulações.

Além de mais completa, a segunda abordagem permite maior flexibilidade do modelo a diferentes condições de contorno, dotando-o de caráter mais universal e de maior capacidade de fornecer resultados mais próximos da realidade em uma gama maior de possíveis dados de entrada, enquanto que a primeira abordagem parece restringir o modelo a um caso específico (determinado perfil de temperatura já observado na lagoa). Para simulações onde os perfis térmicos são resultados (output), as equações de conservação de energia devem ser contempladas no modelo, de forma a definir o balanço de transferência de calor pelos mecanismos a serem considerados na simulação (condução, convecção, radiação). A partir daí devem ser definidos os coeficientes dos modelos de transferência e demais condições de contorno. Considerações e parâmetros teóricos para o balanço térmico podem ser vistos em diversos livros texto, como em Incoprera *et al.* (2012). Referências de parâmetros nas simulações em CFD podem ser consultadas nos trabalhos acima mencionados.

Nenhuma das publicações menciona ou apresenta informações a respeito da inclusão de modelos de empuxo nas lagoas (de grande importância para os fenômenos de mistura vertical ocorridos com a desestratificação térmica, impulsionados pelas diferenças de densidade entre as camadas do fluido). No trabalho de Banda *et al.* (2006a), houve acréscimo de uma equação polinomial de regressão que relacionava a densidade do fluido com as temperaturas definidas para o perfil térmico simulado. Karteris *et al.* (2005) justificam a não inclusão do modelo de empuxo por não ser crucial em lagoas anaeróbicas (objeto do trabalho), ao contrário de lagoas aeróbicas, onde a influência de tal fenômeno na operação e desempenho seria importante. Modelos dinâmicos de transferência térmica e de empuxo foram contemplados neste trabalho.

#### Métodos de representação hidráulica, calibração e validação dos modelos

Vega *et al.* (2003) apresentam descrição de etapa de calibração do modelo via ajuste de dados de vazão de entrada, rugosidade, nível da água, velocidade e direção do vento e temperatura

do fluido, de forma que ajustes foram feitos nesses parâmetros até obtenção de diferenças mínimas entre dados de saída do modelo e dados obtidos em campo.

A maior parte dos trabalhos que contemplaram validação dos dados simulados relata que foi por meio de dados de traçadores obtidos com ensaios de campo ou de laboratório (Wood *et al.*, 1998; Baléo *et al.*, 2001; Vega *et al.*, 2003; Aldana *et al.*; 2005; Shilton *et al.*, 2008; Abbassi *et al.*; 2010; Alvarado *et al.*; 2011; Alvarado *et al.*, 2012b; Alvarado *et al.*, 2012a). Nestes casos, para comparação com os dados reais, traçadores virtuais eram simulados buscando maior semelhança possível com as condições reais de realização dos testes. Uma exceção pode ser vista em Abbassi *et al.* (2010), que simularam um teste virtual considerando uma abordagem lagrangeana (assim como Baléo *et al.*, 2001) de rastreamento de partículas (injeção de 5000 partículas esféricas de mesmo tamanho como drogas e contagem de partículas na saída a cada passo de tempo), e compararam com curvas obtidas em teste de traçador real. Em menor número estão aqueles pesquisadores que validaram seus modelos utilizando dados de ensaios de campo com drogas (Salter *et al.*, 2000; Passos *et al.*, 2014a), corantes (Passos *et al.*, 2014a), medições de velocidade (Shilton, 2000), dados de qualidade da água (Shilton e Harrison, 2003c; Vega *et al.*, 2003; Banda *et al.*, 2006a), dados batimétricos (Alvarado *et al.*, 2012a; Passos *et al.*, 2014a) ou medições de temperatura (Sweeney *et al.*, 2005; Karteris *et al.*, 2005). Há também trabalhos que compararam os resultados dos modelos em CFD com modelos teóricos ou equações empíricas (Shilton e Mara, 2005; Abbassi *et al.*, 2010; Alvarado *et al.*, 2012b).

Em lagoas maiores, os testes com traçador podem ser pouco convidativos, visto o tempo necessário para concluir apenas um teste (mais de 3 vezes o TDH teórico, de acordo com recomendações de literatura, ou até mais que isso, tendo em vista o comportamento comum de longa cauda das curvas de traçador que tem sido observado nesses sistemas), o que pode limitar o número de repetições. No caso do uso de traçadores em campo, a validação do modelo em CFD se dará via execução de um teste de traçador virtual nas mesmas condições em que foi realizado em campo, incluindo concentrações do traçador, volumes adicionados e tempos de aplicação. Quanto a este último ponto, é comum ser observado na literatura a simulação de um teste tipo pulso por meio da injeção do traçador durante o primeiro passo de tempo da simulação (Shilton *et al.*, 2008; Alvarado *et al.*, 2011; Alvarado *et al.*, 2012b; Passos *et al.*, 2014a), que naturalmente vai depender de cada modelo. Deve-se tomar cuidado

com esta simplificação em casos de validação com dados de traçadores reais, para não afastar o teste de traçador virtual muito da realidade do que foi executado em campo.

O uso de corantes, drogas ou medições de velocidade na lagoa são métodos diretos de visualização do fluxo em lagoas e podem ser bastantes atrativos quando se leva em conta a praticidade, repetibilidade e rápida execução; e seus resultados também podem ser facilmente comparados com os resultados do modelo em CFD.

Equipamentos para medição de velocidade são bastante consolidados na engenharia hidráulica, podendo fornecer em tempo real, e até mesmo registrar automaticamente, valores em diversos pontos do sistema a ser analisado. Entretanto, Wood *et al.* (1998) mencionam a dificuldade de medir velocidades para validação experimental em lagoas, devido à limitação de determinação dos aparelhos em tão baixas faixas encontradas. De fato, notam-se velocidades máximas na massa líquida de lagoas reais situadas na faixa de  $10^{-5}$  a  $10^{-2}$  m/s, o que dificulta a mensuração por métodos mecânicos mais tradicionais, como os molinetes, mas não seriam impossíveis de se obter com métodos baseados no efeito Doppler, por exemplo, tais como o *Acoustic Doppler Velocimetry* (ADV) ou *Laser Doppler Velocimetry* (LDV). Quanto a este último (LDV), Wicklein *et al.* (2016) relatam que somente poderia ser aplicável se o reator for relativamente pequeno e tanto o fluido quanto o reator forem transparentes, condições que somente podem ser encontradas em lagoas em escala laboratorial.

Os corantes podem fornecer rápida informação visual a respeito do comportamento das linhas de fluxo para comparação com modelos em CFD, mas apresentam como desvantagem a dificuldade de visualização de uma forma panorâmica, principalmente em lagoas maiores.

Os *drogues* são objetos flutuantes dispostos nas lagoas para medição e determinação da velocidade e do padrão do fluxo, e podem ser constituídos de simples objetos na superfície, como laranjas ou tubos preenchidos (Fredrick e Lloyd, 1996; Vega *et al.*, 2003; Casarotti *et al.*, 2012; Passos *et al.*, 2014a) ou até equipamentos mais elaborados com uso de atuadores (Shilton e Kerr, 1999; Fyfe *et al.*, 2007) ou adaptações com inclusão de GPS de navegação, programado para registro automático do trajeto percorrido pelo equipamento (Passos *et al.*, 2014a). Apesar de pouco utilizada, a técnica de rastreamento com *drogues* pode ser mais adequada para análises hidráulicas em lagoas que o uso de traçadores (PEÑA *et al.*, 2000; TORRES *et al.*, 1997; TORRES *et al.*, 2000). As limitações do método incluem a natureza bidimensional do movimento do *drogue*, a interferência potencial do vento e a incapacidade

de extrapolar os resultados do rastreamento para determinar o TDH real (FYFE *et al.*, 2007). Contudo, o rastreamento com *drogues* pode fornecer informações úteis a respeito do padrão de mistura predominante de uma lagoa, bem como da incidência e extensão de curtos-circuitos e zonas mortas, e servir de excelente base de validação de modelos em CFD. Por outro lado, autores alertam para a necessidade de cuidado quando da inspeção visual de gráficos 2D-3D de dados experimentais e previsões de modelos, visto que tal abordagem é subjetiva (WICKLEIN *et al.*, 2016).

É consenso entre os pesquisadores que comentaram a etapa de validação sobre a importância deste passo no processo de modelagem, a fim de dotar o modelo de confiabilidade quando da interpretação dos resultados. No processo de calibração, é necessária cautela quando do ajuste de parâmetros visando preenchimento de falhas para aproximação dos resultados do modelo com resultados de campo, visto que o modelo pode perder em qualidade, universalidade e capacidade de previsão. Buscou-se na presente pesquisa a utilização dos principais métodos de campo para validação e calibração do modelo hidrodinâmico.

#### Principais resultados e conclusões a respeito do comportamento hidrodinâmico de lagoas de estabilização

A partir dos estudos compilados nesta revisão, alguns resultados principais e conclusões a respeito do comportamento hidrodinâmico de lagoas podem ser destacados, evidenciando a grande aplicabilidade da ferramenta CFD no estudo de lagoas e sua importância no avanço do conhecimento desses sistemas:

- A presença de curtos-circuitos, zonas mortas, de recirculação e de estagnação parece ser inerente a qualquer sistema de lagoas, até mesmo nas lagoas com chicanas e de elevada relação comprimento/largura. Praticamente todos os trabalhos relatam esses fenômenos nas lagoas, com tendências mais aproximadas ao modelo de mistura completa que ao modelo de fluxo em pistão. Nos ensaios com traçadores (reais ou virtuais), tem se observado nas curvas de distribuição do tempo de residência um rápido e acentuado pico com longas caudas da curva, o que sugere reatores com características semelhantes ao de mistura completa, com curto-circuito acentuado e grandes zonas de estagnação. Anomalias no escoamento e desvios da idealidade já eram esperados, mas por meio do uso de CFD os pesquisadores conseguiram, além de

constatá-los, também visualizá-los espacialmente e propor medidas mais efetivas e eventualmente pontuais para a redução desses desvios e anomalias, traduzindo-se em economias de tempo e recursos. Ademais, zonas de recirculação, regiões de estagnação com baixas velocidades e regiões da lagoa que recebem a maior parte do fluxo de entrada foram vistas a partir de CFD como áreas prioritárias para acúmulo do lodo e confirmadas nos trabalhos em que mapas batimétricos estavam disponíveis para comparação (Alvarado *et al.*, 2012a; Passos *et al.*, 2014a). Esta previsão via CFD pode ser particularmente importante para programação de áreas prioritárias nas atividades de remoção de lodo.

- O uso de chicanas foi, de uma forma geral, recomendado para redução de curtos-circuitos e melhoria da eficiência hidráulica (SAH *et al.*, 2012), mas não necessariamente em uma relação direta (por exemplo, quanto mais numerosas e maiores as chicanas, melhor) ou em uma determinada configuração (longitudinal ou transversal), mas sim sendo dependente de cada caso. Um dos resultados do trabalho de Herdianto *et al.* (2010), por exemplo, destaca que a adição de defletores pareceu induzir curtos-circuitos, causados pelas maiores velocidades entre as chicanas, e no trabalho de Olukanni e Ducoste (2011), pode ser visto que o projeto convencional de lagoas com defletores transversais a 70% da largura não é necessariamente a melhor configuração de chicaneamento para lagoas, como relatado anteriormente na literatura. Neste último trabalho também foi constatado que cenários com maior número de chicanas de maior tamanho tendem a ser ineficientes por alterar as características de mistura no final dos canais (que pode influenciar a cinética de remoção). Impasses como esses também são vistos com relação à configuração geométrica, sendo que não se chegou com esses trabalhos a uma melhor solução geral.
- Dada uma determinada configuração geométrica da lagoa, os dispositivos de entrada e o vento foram os fatores mais populares entre os pesquisadores como capazes de ditar o padrão de fluxo (características observadas via CFD), mas sem um consenso sobre qual deles possui maior influência. Naturalmente, espera-se que lagoas maiores possam dar maior margem à influência do vento. Shilton (2001) e Shilton e Harrison (2003a, 2003b) apresentam uma discussão teórica interessante sobre o tema. Entretanto, antes de definir prioridades na construção de um modelo (o que será simplificado, considerado ou não), sugere-se avaliar se se trata de um dos casos em

que outros fatores possam também ter papel substancial na determinação do fluxo, como em casos de lagoas com grande e/ou heterogêneo acúmulo de lodo e de lagoas onde se verificam ciclos pronunciados de estratificação térmica e mistura vertical.

- Fenômenos de estratificação térmica em lagoas foram observados via CFD, provocando curto-circuito via passagem preferencial do fluido por uma das camadas do perfil térmico (KARTERIS *et al.*, 2005). Houve também a sugestão de que o vento pode quebrar a estratificação, já que melhor precisão na previsão foi conseguida com a inclusão da ação cisalhante do vento no modelo em CFD de Sweeney *et al.* (2005).

Este trabalho, tal como já destacado em alguns tópicos, tem por intenção também contribuir no preenchimento das lacunas identificadas a partir desta revisão.

## 3 OBJETIVOS

### 3.1 *Objetivo geral*

O objetivo geral deste trabalho é avaliar o comportamento hidrodinâmico de lagoas de polimento, com base em modelos matemáticos, modelos tridimensionais em CFD e ensaios de campo com uso de traçadores, corantes, medidores de fluxo, *drogues* e sondas para monitoramento do perfil vertical, em diferentes configurações operacionais das lagoas (profundidade, TDH, disposição em série ou em paralelo, presença ou ausência de chicanas), na ausência e presença de lodo de fundo e em períodos distintos do ano.

### 3.2 *Objetivos específicos*

- i. Analisar o fluxo horizontal bidimensional e tridimensional das lagoas;
- ii. Avaliar características hidráulicas das lagoas por meio da técnica de estímulo-resposta com uso de diferentes traçadores;
- iii. Avaliar a ocorrência do fenômeno de estratificação térmica e desestratificação das lagoas e sua relação com o comportamento hidrodinâmico;
- iv. Avaliar a influência do lodo acumulado no comportamento hidrodinâmico das lagoas;
- v. Avaliar a dinâmica do vento, sua ação na superfície e sua influência no comportamento hidrodinâmico das lagoas;
- vi. Avaliar o efeito da introdução de chicanas longitudinais e do posicionamento dos dispositivos de entrada e saída do efluente (características de projeto) no comportamento hidrodinâmico das lagoas;
- vii. Propor um modelo hidrodinâmico unificado de lagoas via CFD, considerando o lodo acumulado, radiação solar, oscilações térmicas e influência do vento.

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

Este capítulo é composto de cinco grandes itens que têm por intenção descrever os principais aspectos metodológicos adotados na presente pesquisa, começando pela descrição do local de estudo e suas unidades, passando pelos métodos de obtenção de dados e monitoramento de campo e finalmente destacando os principais métodos relacionados à modelagem matemática e computacional.

O primeiro item (4.1) consiste da descrição da área de estudo e suas unidades, incluindo detalhes construtivos das lagoas e respectivas configurações nas respectivas fases de operação. O segundo item (4.2) apresenta descrição dos métodos de obtenção de dados de monitoramento de parâmetros físicos, químicos e biológico (de “entrada e saída”), de dados de monitoramento no perfil vertical das lagoas e do monitoramento meteorológico. Já o item 4.3 contempla a descrição dos ensaios de campo relacionados à avaliação hidrodinâmica (testes com flutuadores, molinetes hidráulicos, sensores acústicos, corantes e traçadores). Por fim, os itens 4.4 e 4.5 apresentam métodos e modelos matemáticos empregados e desenvolvidos nesta pesquisa, sendo o último item dedicado à etapa de modelagem em CFD e, como tal, contendo descrições dos métodos de geração de geometrias, malhas, definições de condições de contorno, equações governantes, modelos de temperatura, radiação solar, atuação do vento, injeção de traçador virtual e critérios de cálculo e processamento.

### 4.1 *Área de estudo e unidade experimental*

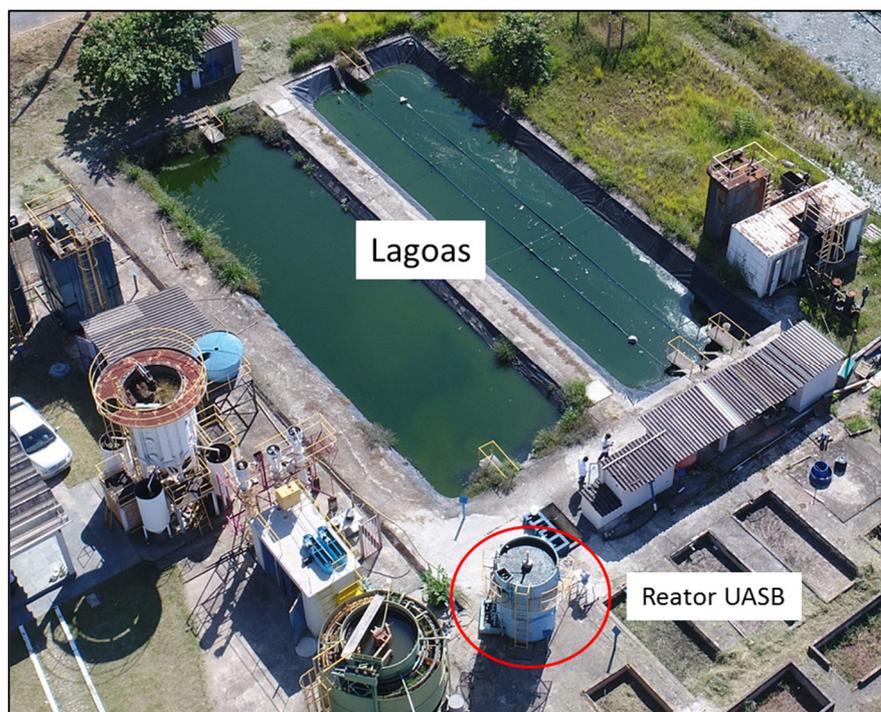
A pesquisa foi desenvolvida no Centro de Pesquisa e Treinamento em Saneamento UFMG/COPASA (CePTS), em Belo Horizonte – MG, na divisa com a cidade de Sabará-MG (latitude 617.600S e longitude 7.799.400 W). O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo CWa, subtropical/tropical de altitude, com inverno seco e verão quente. A temperatura média anual é 22,1 °C e precipitação de 1540 mm/ano, sendo caracterizado por um período seco que se estende de abril a setembro e um chuvoso que vai de outubro a março. No período seco a temperatura média é de 20,9 °C e a precipitação média de 33 mm/mês, já durante o período chuvoso as temperaturas médias são de 23,4 °C e a precipitação média de 254 mm/mês. O CePTS foi construído no ano de 2001 e começou a operar no ano de 2002.

O centro experimental está inserido na ETE Arrudas, operada pela Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA), que recebe e trata a maior parcela do esgoto gerado na cidade. Após passar pelo tratamento preliminar da ETE Arrudas (unidade de gradeamento composta por grade grossa manual e fina mecanizada, para remoção de sólidos com dimensões acima de 15 mm, seguida de desarenador), um pequeno percentual do esgoto é encaminhado ao CePTS, alimentando várias unidades de pesquisa.

Entre essas unidades, há no CePTS um sistema composto por reator UASB seguido de lagoas de polimento, implementado em 2002. O reator UASB foi construído em ferro-cimento e tem volume de 14,2 m<sup>3</sup>, diâmetro de 2,0 m e altura de 4,5 m. Para pós-tratamento do efluente do reator UASB, inicialmente foram projetadas quatro lagoas com comprimento de 25,0 m por 5,25 m de largura e taludes com inclinação de 45°. Posteriormente uma delas foi transformada em wetlands construídos e, mais recentemente, outra transformada em filtro grosseiro de pedras, restando duas lagoas.

As unidades foram projetadas para atender uma população de 250 habitantes e uma vazão aproximada de 40 m<sup>3</sup>/d. Ao longo desse tempo, as lagoas passaram por diferentes arranjos e condições operacionais (funcionamento em série ou paralelo; com ou sem chicanas; com ou sem meio filtrante; diferentes tempos de detenção hidráulica, vazão afluente e profundidades). Resultados de pesquisas a respeito do sistema em diferentes configurações podem ser encontrados nos estudos de Andrada (2005), Assunção (2009) e Possmoser-Nascimento (2014), bem como em publicações diversas, tais como Von Sperling e Mascarenhas (2005), Von Sperling *et al.* (2005), Von Sperling e Andrada (2006), Von Sperling *et al.* (2008), Araujo *et al.* (2010), Oliveira e Von Sperling (2010), Chernicharo *et al.* (2010), Godinho *et al.* (2011a, 2011b), Assunção e Von Sperling (2012), Chiatti e Von Sperling (2012), Assunção e Von Sperling (2013), Dias *et al.* (2014), Possmoser-Nascimento *et al.* (2014), Rodrigues *et al.* (2015), Von Sperling (2015), Dias *et al.*, (2017).

A FIG. 4.1 apresenta vista geral da estação experimental e suas unidades, com destaque para o reator UASB e as lagoas de polimento.

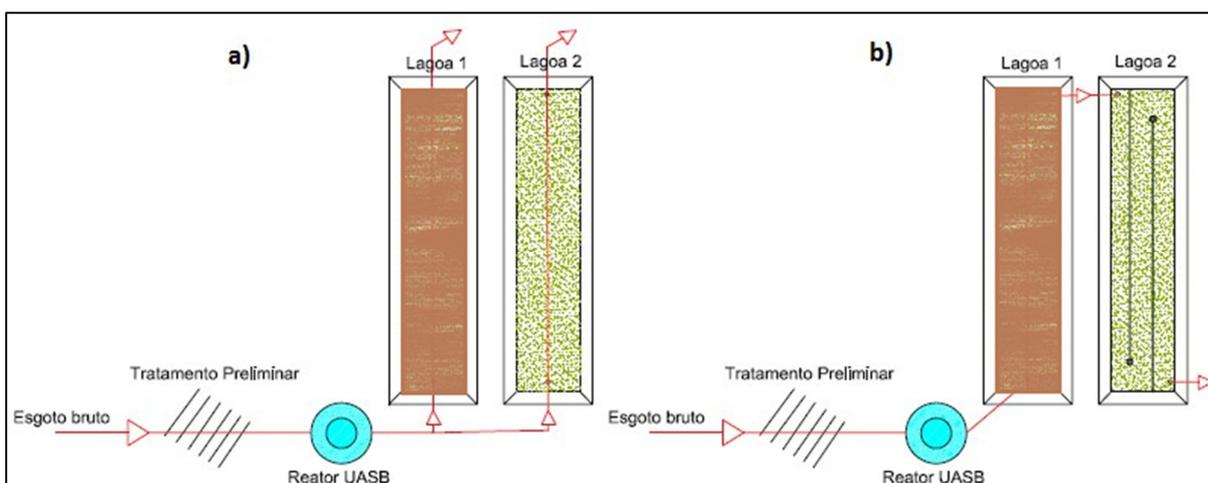


**FIGURA 4.1:** Vista do CePTS UFMG/COPASA, com indicação das lagoas de polimento em estudo, pós reator UASB. (Imagem de drone, fornecida pelo colega Daniel Salim, 2017)

Este trabalho compreende duas dessas fases, que passarão a ser denominadas Fases 1 e 2:

- Fase 1 (maio de 2013 a dezembro de 2013), na qual as duas lagoas operavam em paralelo, sendo uma com lodo acumulado ao longo de 11 anos de operação e outra com lodo recentemente removido.
- Fase 2, atual configuração (a partir de janeiro de 2014), na qual as duas lagoas operam em série, sendo a primeira ainda com o lodo e a segunda sem lodo e com duas chicanas longitudinais.

A FIG. 4.2 ilustra os arranjos operacionais para as duas fases.



**FIGURA 4.2:** Desenho esquemático ilustrativo do arranjo operacional da ETE experimental CePTS UFMG/COPASA nas duas fases: **(a)** Fase 1: lagoas em paralelo e **(b)** Fase 2: lagoas em série, com chicanas na segunda.

Para melhor leitura e entendimento, as lagoas foram denominadas lagoa 1 (ou L1) e lagoa 2 (ou L2), respectivamente a primeira e segunda lagoa da série.

As lagoas apresentam como principais dimensões/características em cada fase operacional os valores apresentados na TAB. 4.1.

**TABELA 4.1** - Principais dimensões/características das lagoas de polimento do CePTS UFMG/COPASA durante as duas fases operacionais.

	Fase 1		Fase 2	
	Lagoa 1	Lagoa 2	Lagoa 1	Lagoa 2
Operação	Em paralelo	Em paralelo	Em série	Em série
Config.geom. (fundo)	25,00 x 5,25m	25,00 x 5,25m	25,00 x 5,25m	25,00 x 1,75m <sup>(1)</sup>
Lodo (altura média)	Sim (0,34m <sup>(2)</sup> )	Não	Sim (~0,34m <sup>(2)</sup> )	Não
Comprimento/largura <sup>(3)</sup>	~ 4	~ 4	~ 4	~ 40
Profundidade de operação	0,74 m	0,82 m	0,80 m	0,44 m
Área do espelho d'água	178 m <sup>2</sup>	184 m <sup>2</sup>	182 m <sup>2</sup>	159 m <sup>2</sup>
Área de fundo	131 m <sup>2</sup>	131 m <sup>2</sup>	131 m <sup>2</sup>	131 m <sup>2</sup>
Taludes internos	1 : 1	1 : 1	1 : 1	1 : 1
Vazão teórica afluyente	20 m <sup>3</sup> /d	20 m <sup>3</sup> /d	40 m <sup>3</sup> /d	40 m <sup>3</sup> /d
TDH teórico <sup>(3)</sup>	3,6 d	6,4 d	2,1 d	1,6 d

(1) Conforme pode ser visto na FIG. 4.2b, a lagoa 2 possui duas chicanas longitudinais igualmente espaçadas.

(2) Batimetria realizada por Possmoser-Nascimento *et al.* (2014).

(3) No plano horizontal que passa no meio da lagoa (a meia profundidade)

(4) Excluindo-se o volume ocupado pelo lodo, obtido na batimetria de Possmoser-Nascimento *et al.* (2014).

#### 4.1.1 Distribuição do afluente

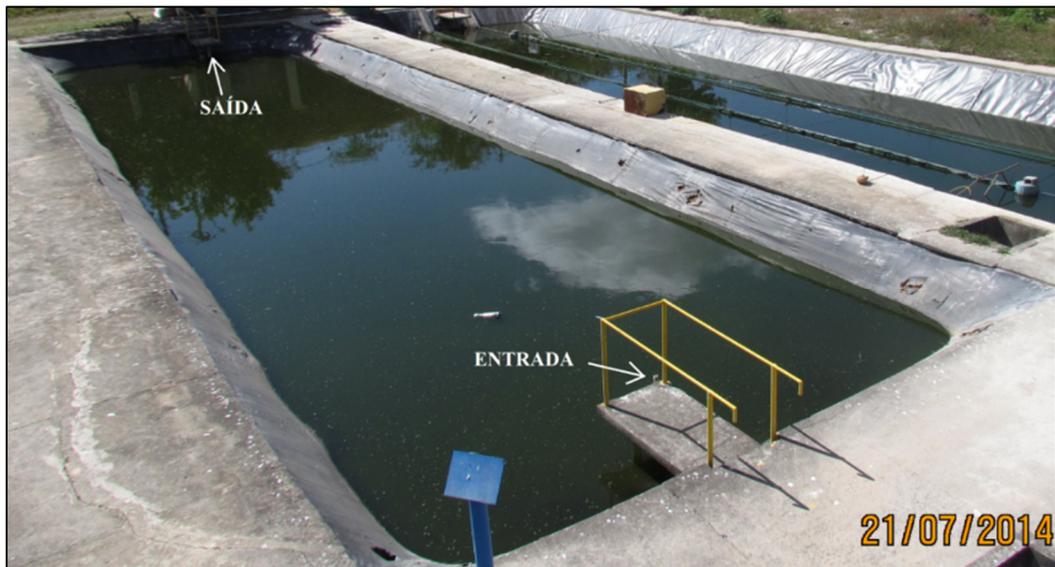
A FIG. 4.3 apresenta o sistema de distribuição do afluente, após saída do reator UASB. Durante a primeira fase, a vazão efluente do reator UASB era igualmente distribuída para as duas lagoas após passagem pela caixa de distribuição (FIG. 4.3a); nessa caixa foi instalada uma placa de fibra de vidro com vertedores triangulares, de forma a permitir a divisão igualitária do fluido. Esses vertedores distribuía para quatro tubos que vertiam em quatro caixas distintas (FIG. 4.3b); duas dessas caixas encaminhavam o afluente para a lagoa 1 e as outras duas para a lagoa 2. Durante a segunda fase, todo o efluente era encaminhado para a primeira lagoa da série.



**FIGURA 4.3:** Sistema de distribuição do afluente, após saída do reator UASB no CePTS-UFMG/COPASA: **(a)** caixa de equalização de vazão após o UASB, com destaque para os vertedores e **(b)** caixas de distribuição.

#### 4.1.2 Lagoa 1 (lagoa com lodo, sem chicanas)

A FIG. 4.4 apresenta vista da lagoa 1, com indicações dos locais de entrada e saída do efluente. O fundo da lagoa e seus taludes foram executados com argila compactada e revestidos com manta de PEAD (Polietileno de Alta Densidade). A profundidade de operação na unidade passou de 0,74 m durante a fase 1 para 0,80 m durante a fase 2.

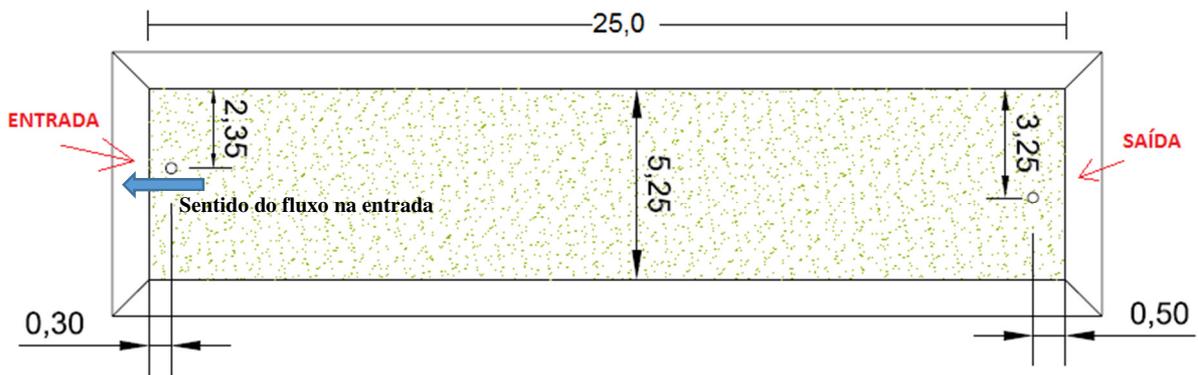


**FIGURA 4.4:** Vista da Lagoa 1, com indicações dos locais de entrada e saída de efluente – CePTS UFMG/COPASA.

O dispositivo de entrada na lagoa 1 era único, via tubulação de PVC com 50 mm de diâmetro e dois têns com saídas **no sentido inverso ao fluxo esperado** (um deles afogado), podendo a chegada do efluente na lagoa ser afogada ou superficial (neste último caso, colocando-se um cap na saída do tê afogado) (FIG. 4.5a). O dispositivo de saída da lagoa também era único, constituído de tubulação de PVC vertical, por onde o efluente vertia (FIG. 4.5b). Os dispositivos de entrada e saída não se encontravam exatamente alinhados e centralizados em relação às bordas laterais. As distâncias em relação às bordas, no plano de fundo da lagoa, estão apresentadas no croqui da FIG. 4.6.

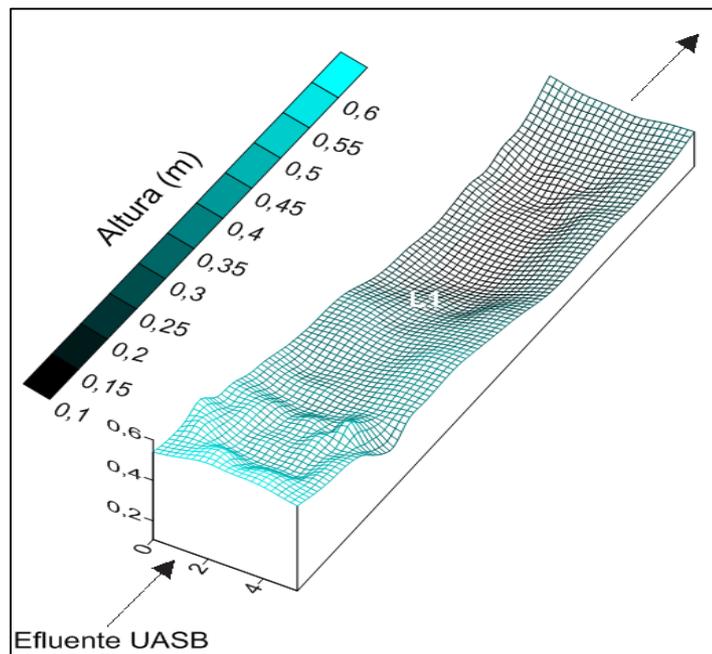


**FIGURA 4.5:** Vista dos dispositivos de entrada e saída na lagoa 1 – CePTS UFMG/COPASA: (a) entrada e (b) saída.



**FIGURA 4.6:** Croqui em planta, sem escala, da lagoa 1 com indicação das distâncias (em metros) dos dispositivos de entrada e saída em relação às bordas (fundo da lagoa) - CePTS-UFMG/COPASA.

O volume e a forma geométrica do lodo acumulado na lagoa 1 foram estimados durante os experimentos de Possmoser-Nascimento (2014). O volume obtido foi de 42,6 m<sup>3</sup>, distribuído conforme ilustração da FIG. 4.7 (POSSMOSER-NASCIMENTO *et al.*, 2013; POSSMOSER-NASCIMENTO *et al.*, 2014). Nota-se distribuição irregular do lodo, com maior acúmulo nas proximidades da entrada e saída da lagoa.



**FIGURA 4.7:** Distribuição espacial do lodo na lagoa 1 – CePTS UFMG/COPASA (POSSMOSER-NASCIMENTO *et al.*, 2013; POSSMOSER-NASCIMENTO *et al.*, 2014).

### 4.1.3 Lagoa 2 (sem lodo no início; sem e com chicanas)

Conforme já mencionado, a lagoa 2 passou por alterações durante as duas fases desta pesquisa. As características da unidade nas duas fases serão comentadas separadamente a seguir.

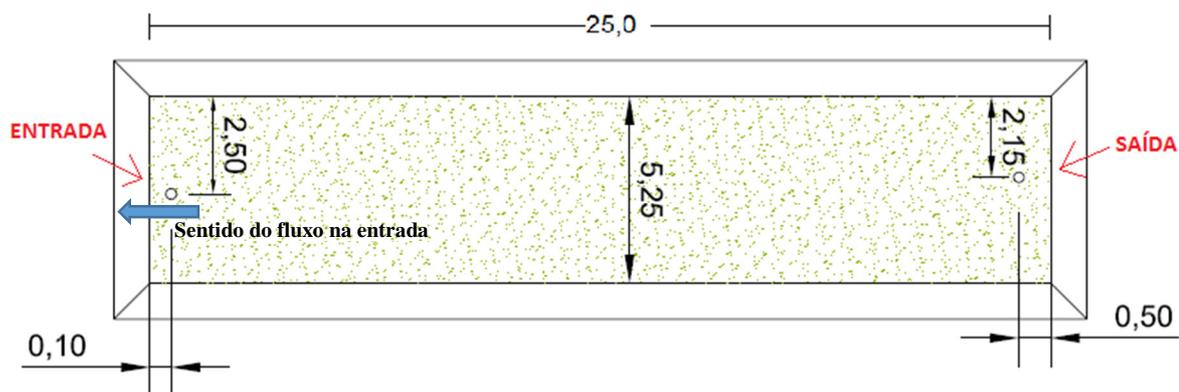
#### Fase 1

Assim como na lagoa 1, o fundo da lagoa 2 e seus taludes foram executados com argila compactada e revestidos com manta de PEAD. Na fase 1 a lagoa começou a operar com 0,82 m de profundidade, logo após remoção completa do lodo de fundo. A FIG. 4.8 apresenta vista da lagoa 2 durante esta fase, com indicações dos locais de entrada e saída do efluente.



**FIGURA 4.8:** Vista da lagoa 2 durante a fase 1, com indicações dos locais de entrada e saída de efluente – CePTS UFMG/COPASA.

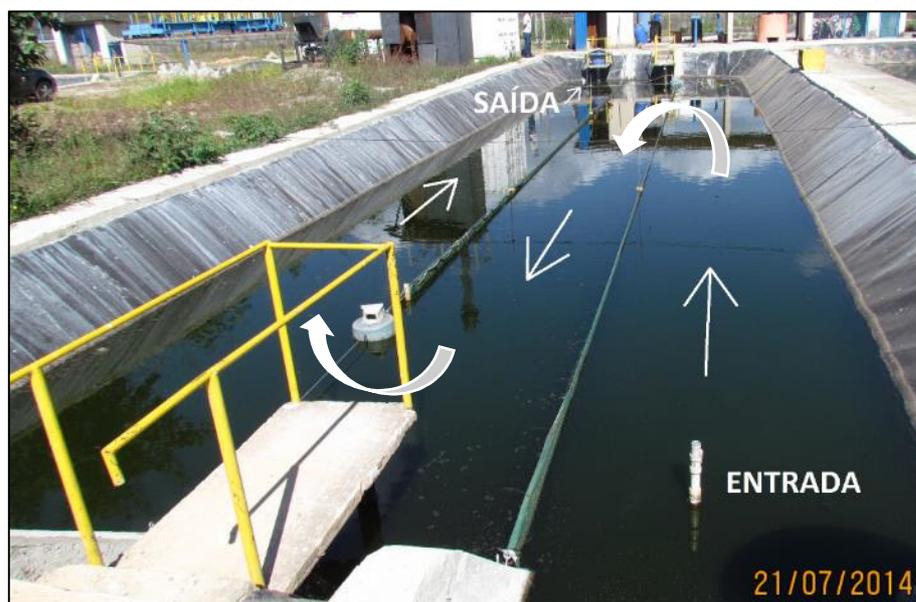
Os dispositivos de entrada e saída na lagoa 2 eram idênticos aos da lagoa 1 quanto às características, materiais e dimensões. O fluxo na entrada também era em **sentido contrário à saída**. Entretanto, pequena diferença havia quanto às distâncias em relação às bordas. O croqui da FIG. 4.9 apresenta tais dimensões no plano de fundo da lagoa.



**FIGURA 4.9:** Croqui em planta, sem escala, da lagoa 2 durante a fase 1, com indicação das distâncias (em metros) dos dispositivos de entrada e saída em relação às bordas (fundo da lagoa) – CePTS UFMG/COPASA.

### Fase 2

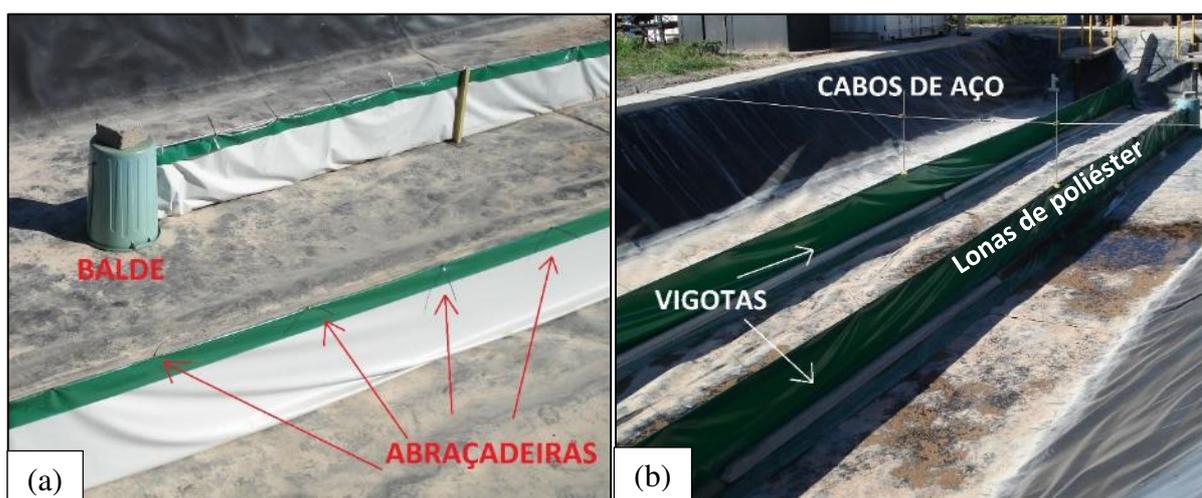
Na segunda fase a unidade sofreu redução da profundidade de operação (0,44 m) e foi transformada em uma lagoa chicaneada (com duas chicanas longitudinais, formando três canais paralelos). A FIG. 4.10 apresenta vista da lagoa 2 durante esta fase, com indicações dos locais de entrada e saída do efluente, bem como das direções teóricas do fluxo nos canais.



**FIGURA 4.10:** Vista da lagoa 2 durante a fase 2, com indicações dos locais de entrada e saída de efluente, e visualização das chicanas longitudinais – CePTS UFMG/COPASA.

As chicanas foram confeccionadas com lonas de poliéster, sustentadas por cabos de aço e ancoradas na base com ajuda do peso de vigotas de concreto. As lonas foram presas aos cabos de aço por meio de abraçadeiras de nylon em orifícios igualmente espaçados, de forma que

funcionavam como cortinas; permitindo assim flexibilidade quanto ao ajuste do comprimento de operação. No final das lonas utilizou-se um balde invertido, cortado diametralmente até 80% da sua altura, para contenção das sobras de material e suavização das curvas nas chicanas. A intenção foi de possibilitar melhor representação geométrica da unidade durante a etapa de modelagem computacional. As FIG. 4.11a e 4.11b ilustram alguns dos detalhes mencionados. Durante a pesquisa, a lagoa operou com chicanas a 90% do comprimento.



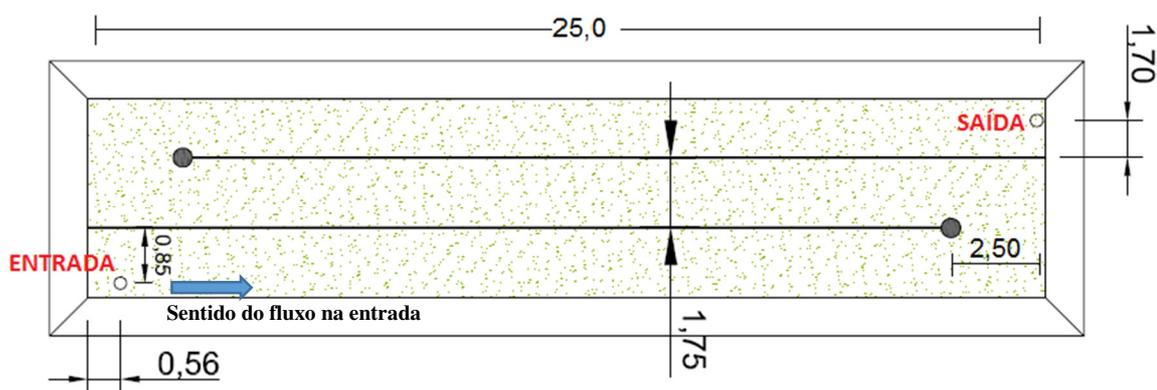
**FIGURA 4.11:** Detalhes construtivos da lagoa 2 durante a fase 2 – CePTS UFMG/COPASA: (a) ilustração do balde utilizado para contenção de sobras da lona e locais de fixação e (b) detalhe das vigotas para ancoramento e dos cabos de aço para sustentação.

Diferentemente de como ocorria na lagoa 1 e na lagoa 2 fase 1, o sentido do fluxo na entrada da lagoa 2 (jato de entrada) nesta fase foi definido **no mesmo sentido teórico do fluxo principal**. A tubulação de entrada também era única, em PVC, com três tês ao longo da altura, e possuía o mesmo diâmetro (50 mm) (FIG. 4.12a). A saída do fluido não era totalmente afogada, e sim em meia seção do tê intermediário (FIG. 4.12b). Entretanto, havia flexibilidade operacional com possibilidade de a saída ser totalmente afogada ou totalmente superficial, com uso do tê inferior ou superior, respectivamente.

A saída da lagoa era única, diâmetro 75 mm, constituída de tubulação de PVC horizontal com um tê, por onde o efluente escoava ocupando metade da seção (FIG. 4.12b). As distâncias dos dispositivos de entrada e saída em relação às bordas e paredes no fundo da lagoa, bem como os espaçamentos entre as chicanas, estão apresentadas no croqui da FIG. 4.13.



**FIGURA 4.12:** Vista dos dispositivos de entrada e saída na lagoa 2, fase 2 – CePTS UFMG/COPASA: (a) entrada e (b) saída.



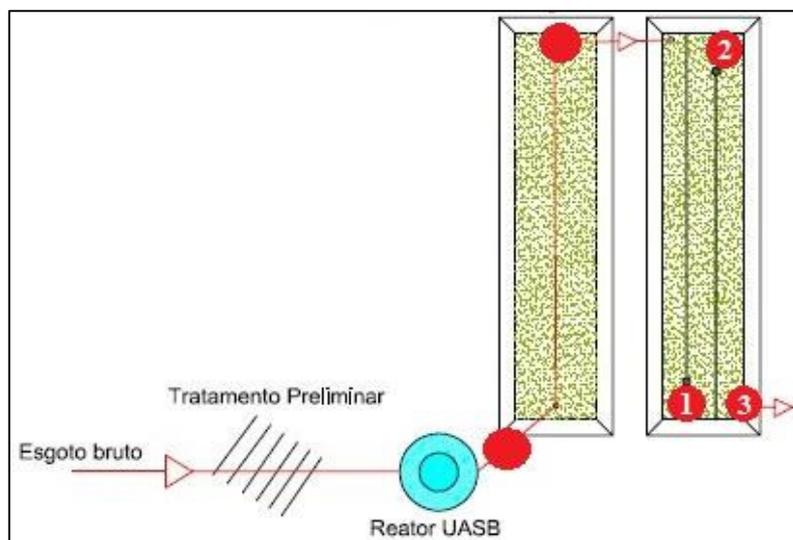
**FIGURA 4.13:** Croqui em planta, sem escala, da lagoa 2 durante a fase 2, com indicação das distâncias (em metros) dos dispositivos de entrada e saída em relação às paredes e espaçamentos entre as chicanas (plano do fundo da lagoa) – CePTS UFMG/COPASA.

## 4.2 Dados de monitoramento em campo

### 4.2.1 Análises físicas, químicas e biológicas de entrada e saída e medições de vazão

Com o intuito apresentar um breve resumo a respeito do desempenho do sistema em estudo e das suas unidades (em termos de eficiências de remoção de constituintes de qualidade), no contexto desta pesquisa, foram analisadas variáveis físicas, químicas e microbiológicas (bacteriológicas) durante a segunda fase de operação do sistema, de em janeiro de 2014 a abril de 2015. Os pontos de monitoramento foram: efluente do UASB (afluente ao sistema de

lagoas), saída da lagoa 1; saída da lagoa 2 e pontos intermediários na lagoa 2 (no final de cada canal). Tais pontos estão indicados em vermelho na FIG. 4.14.



**FIGURA 4.14:** Desenho esquemático ilustrativo com os pontos de monitoramento de rotina (pontos em vermelho) na ETE experimental CePTS UFMG/COPASA durante a fase 2.

A programação do monitoramento rotineiro foi quase permanente, salvo algumas exceções devido a feriados e férias letivas, compreendendo coletas predominantemente semanais. Os parâmetros monitorados foram oxigênio dissolvido (OD), pH, temperatura (T), condutividade elétrica (CE), potencial de oxirredução (POR), turbidez, alcalinidade, DBO, DQO, SST, SSV, NTK, amônia, coliformes totais e *E. coli*. Os relatórios de monitoramento contêm ainda registros de problemas operacionais ocorridos durante o período de análise.

As leituras dos parâmetros OD, pH, temperatura, CE, POR e turbidez foram efetuadas *in loco*, através de sonda multiparâmetro HQ 40d da empresa HACH e turbidímetro Modelo P2100 da mesma empresa. Para determinação dos demais parâmetros, as amostras coletadas no CePTS foram preservadas e encaminhadas para os laboratórios de Físico-Química e de Microbiologia do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais.

Os procedimentos para coleta e análise dos parâmetros do banco de dados e os coletados foram normatizados conforme *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA-AWWA-WEF, 1998, 2005). A coleta das amostras dos efluentes ocorreu na parte da manhã, entre as 08:00 e 09:30 horas, e o número de amostras para cada parâmetro

variou de 18 a 75. Para as análises microbiológicas de Coliformes Totais e *e. coli* foi utilizado o método de substrato definido (*Quantitray Colilert*) (APHA-AWWA-WEF, 1998, 2005).

As medições de vazão foram realizadas na entrada do sistema de lagoas (antes da distribuição do efluente), pelo método volumétrico: após interceptação simultânea da vazão afluyente nas quatro caixas de distribuição, media-se o tempo necessário para enchimento de um volume conhecido de um recipiente (geralmente 10 L).

#### 4.2.2 Condições climáticas/meteorológicas

Os dados meteorológicos foram obtidos por meio de estação instalada no local e programada para registro das condições do tempo em intervalos regulares especificados (5 ou 10 minutos para esta pesquisa).

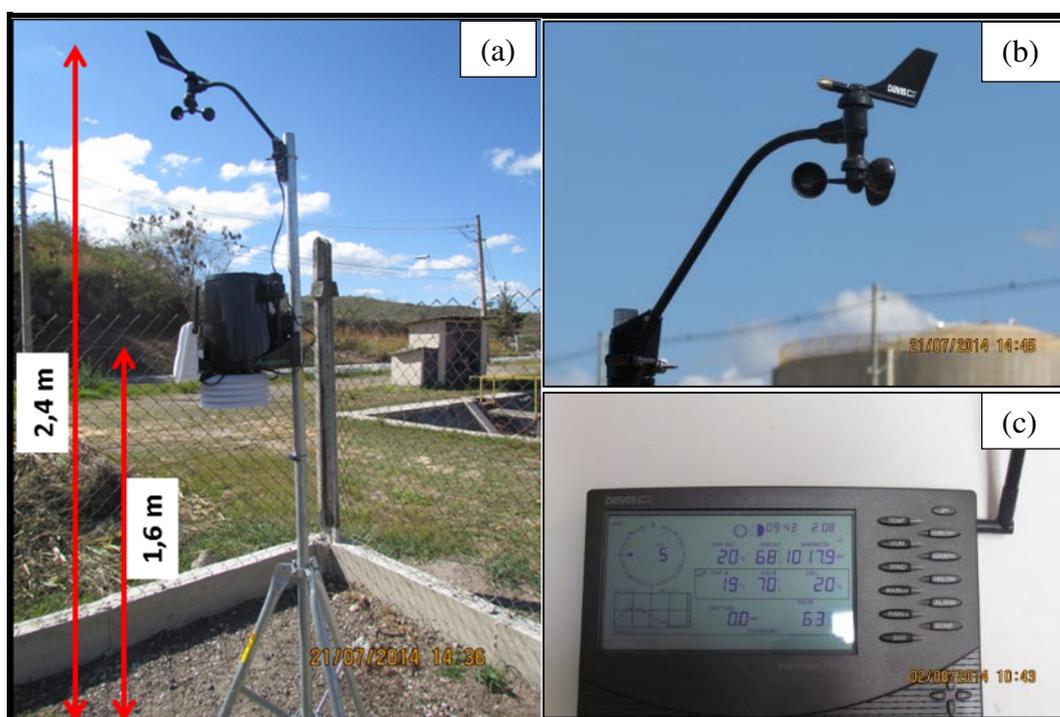
A estação utilizada foi a *Davis Vantage Pro2®*, equipada com um conjunto de sensores integrados, incluindo coletor de chuva, sensor de temperatura e umidade, anemômetro (direção e velocidade), sensor barométrico e painel solar. Os componentes eletrônicos ficaram alojados em um abrigo resistente às intempéries. A TAB. 4.2 apresenta relação das variáveis medidas pela estação e suas unidades, bem como precisão do equipamento com faixa de medição.

**TABELA 4.2** – Variáveis medidas pela estação meteorológica instalada no CePTS UFMG/COPASA.

Variável	Unidade/notação	Faixa de medição / precisão
Data e hora	dia/mês/ano; hora:min	24 h ( $\pm 8s$ /mês)
Temperatura (T)	$^{\circ}C$	$-40^{\circ}$ a $65,56^{\circ}C$ ( $\pm 0,5^{\circ}C$ )
Sensação térmica (St)	$^{\circ}C$	$-84^{\circ}C$ a $54^{\circ}C$ ( $\pm 1^{\circ}C$ )
Umidade relativa do ar (Ur)	%	0% a 100%, $\pm 3\%$
Evapotranspiração (ET)	mm	Dia até 999,9 mm, mês e ano até 1999,9 mm
Ponto de orvalho (Po)	$^{\circ}C$	$-76^{\circ}C$ a $54^{\circ}C$ ( $\pm 1,5^{\circ}C$ )
Velocidade do vento ( $u_{vento}$ )	m/s	1,5 a 79 m/s, $\pm 5\%$
Direção do vento ( $DIR_{vento}$ )	Graus ou marcação da rosa dos ventos	0 a $360^{\circ}$ ( $\pm 7^{\circ}$ ) ou 16 pontos do compasso ( $\pm 0,3$ pontos)
Radiação solar (S)	$W/m^2$	0 a $1800 W/m^2$ ( $\pm 5\%$ da escala total)
Índice de UV ( $I_{UV}$ )	-	0 a 16 ( $\pm$ da escala total)
Pressão barométrica (p)	hPa	880 a 1080 hPa ( $\pm 1$ hPa)
Precipitação (Pt)	mm	Diária de 0 a 9999 mm ( $\pm 4\%$ ), mensal ou anual de 0 a 19.999 mm ( $\pm 4\%$ )
Índice pluviométrico	mm/h	0 a 19.999 mm/h ( $\pm 5\%$ )

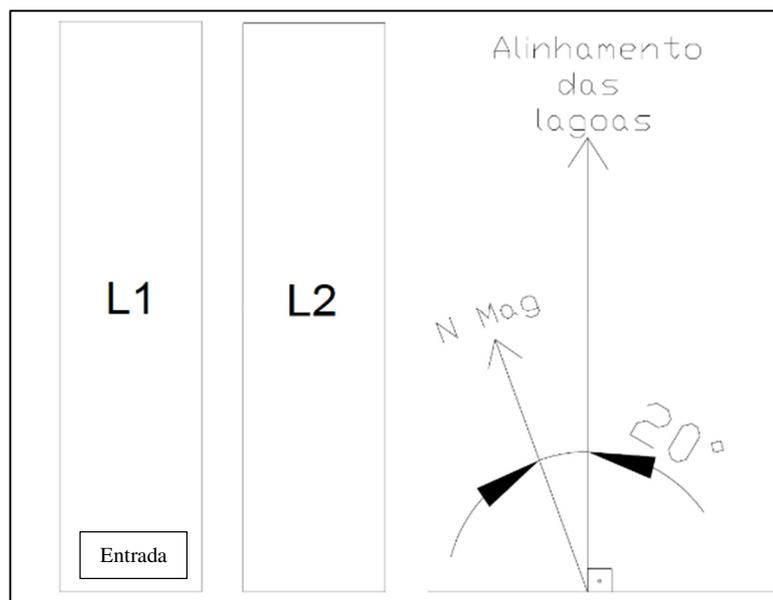
A estação contava com tecnologia de radiofrequência que permitia a transmissão sem fio dos dados meteorológicos para um receptor remoto situado na sala de apoio do CePTS, de onde eram coletados. Também no receptor remoto era possível obter prognósticos do tempo para as próximas 12 horas, com base nas condições do céu, precipitação, mudanças de temperaturas e mudanças na direção e velocidade do vento (apenas tendências, com pouco grau de confiabilidade).

A estação foi montada em local próximo às lagoas (a 8 m da lateral da lagoa 2), com o conjunto de sensores a uma altura de 1,6 m do solo. O anemômetro registrou as velocidades e direções do vento a 2,4 m do solo. A FIG. 4.15a apresenta vista da estação meteorológica, com detalhe do anemômetro (FIG. 4.15b). A FIG. 4.15c apresenta imagem do receptor dos dados.



**FIGURA 4.15:** (a) Vista da estação meteorológica instalada no CePTS UFMG/COPASA, (b) detalhe do anemômetro (c) detalhe do receptor remoto de dados.

A direção de referência para o anemômetro foi o norte magnético, visto que pôde ser mais precisamente obtido com o auxílio de uma bússola de mão profissional Quest Náutica®. As lagoas estavam em uma direção de aproximadamente 20° à direita do norte magnético. A FIG. 4.16 ilustra a locação das unidades de tratamento em relação ao norte magnético.



**FIGURA 4.16:** Localização das unidades de tratamento em relação ao norte magnético (referência da estação meteorológica).

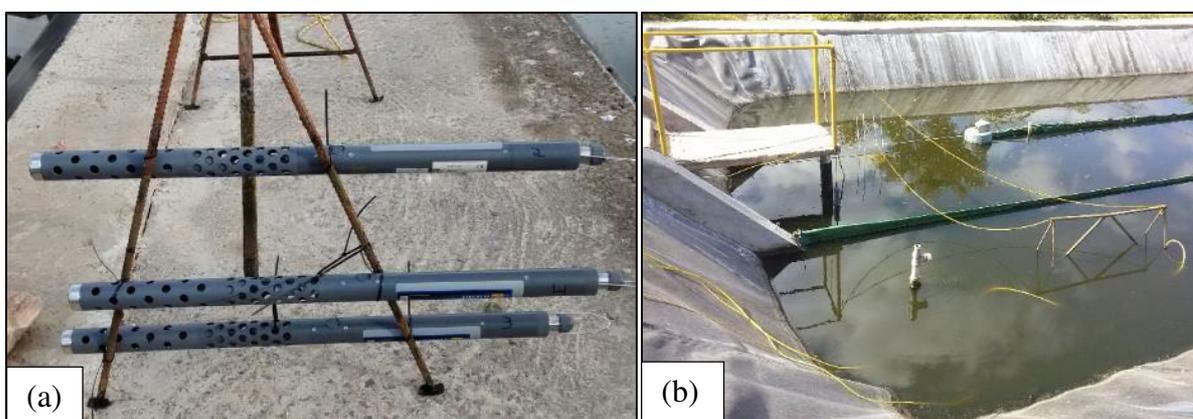
#### 4.2.3 Análises temporais do perfil vertical de parâmetros de qualidade

Monitoramentos temporais do perfil vertical das lagoas foram realizados para as variáveis temperatura (T), oxigênio dissolvido (OD), pH, condutividade elétrica (CE) e potencial de oxirredução (POR).

A temperatura foi medida continuamente ao longo do tempo em diversos pontos e em diferentes períodos do ano na tentativa de avaliar se havia condições de estratificação térmica ou mistura vertical nas lagoas. De acordo com UKPONG *et al.* (2006a), as isotermas nas lagoas são horizontais e não há diferenças significativas de temperatura ao longo do comprimento ou largura das lagoas. Tomando-se por base tal premissa, eliminaram-se das análises destes dados as incertezas relativas a gradientes de temperatura ao longo do comprimento ou largura, de forma que este fator foi avaliado mais profundamente por meio de CFD. Os parâmetros OD, pH, CE e POR foram monitorados em alguns testes para auxiliar a análise dessas condições e observação de eventuais gradientes químicos no perfil das lagoas.

Em cada ponto, a temperatura foi registrada em duas ou três profundidades diferentes (superfície e fundo ou superfície, meio e fundo), por meio de sensores Global Water WQ101® com *datalogger* GL500-7-2 Global Water® e sondas YSI 600XLM V2®, com *datalogger* interno. Ambos os sensores foram calibrados de acordo com as recomendações

dos fabricantes. Os sensores foram afixados em um cavalete nas profundidades requeridas e os dados armazenados nos *dataloggers*. As profundidades foram definidas de forma que a sonda de superfície não ficasse fora d'água por motivo de eventuais oscilações de nível nas lagoas. No caso da lagoa 1, testes foram feitos com a sonda de fundo na interface do fluido com o lodo (mas fora dele) e também com a sonda totalmente imersa no lodo. Assim, para definição das profundidades de monitoramento na lagoa 1 consultou-se o mapa batimétrico existente do sedimento (POSSMOSER-NASCIMENTO *et al.*, 2014) e testes preliminares em campo. A frequência de medição variou de acordo com a programação de coleta de dados e capacidade de armazenamento dos aparelhos, compreendendo intervalos de 1 a 30 minutos. A FIG. 4.17a apresenta registro da montagem de três sondas YSI 600XLM V2® fixas em cavalete para monitoramento nas lagoas e a FIG. 4.17b registro das sondas Global Water WQ101® já instaladas na entrada da lagoa 2.



**FIGURA 4.17:** Registro fotográfico (a) da montagem das sondas YSI 600XLM V2® fixas em cavalete e (b) das sondas Global Water WQ101® na entrada da lagoa 2 – CePTS UFMG/COPASA.

O monitoramento ocorreu de outubro de 2013 a julho de 2015 e resultou em mais de 40000 perfis térmicos. A TAB. 4.3 sumariza algumas das condições de realização dos principais ensaios de medição de perfil vertical. Dados meteorológicos estiveram disponíveis a partir do ensaio 8. As notas abaixo da tabela registram características dos ensaios e os asteriscos destacam aqueles que apresentaram períodos coincidentes com ensaios com traçador salino na mesma lagoa (um possível interferente). A FIG. 4.18 apresenta a localização aproximada dos pontos de monitoramento nas duas lagoas, com indicação dos ensaios correspondentes a cada ponto. A lagoa 1 não foi monitorada durante a fase 1, entretanto, ressalta-se que a unidade não sofreu modificações estruturais na fase 2, nem remoção do lodo acumulado.

**TABELA 4.3** - Resumo das condições de realização dos monitoramentos em perfil vertical nas lagoas do CePTS UFMG/COPASA.

Ensaio n°	Período	Estação do ano	Fase de operação	Lagoa	Local do monitoramento#	Alturas acima do fundo
1*	18/10/13 a 04/11/13	Primavera	Fase 1	2	Ponto central	5cm e 60cm
2*	02/12/13 a 30/12/13	Prim/Ver	Fase 1	2	Ponto central	5cm e 60cm
3*	28/04/14 a 05/05/14	Outono	Fase 2	1	Ponto central	35cm e 68cm
4	23/06/14 a 25/06/14	Inverno	Fase 2	1	Ponto central	35cm e 70cm
5	25/06/14 a 01/07/14	Inverno	Fase 2	1	0,2m a montante da saída	25cm e 75cm
6	01/07/14 a 07/07/14	Inverno	Fase 2	1	0,7m a montante da saída	10cm e 67cm
7	07/07/14 a 12/07/14	Inverno	Fase 2	1	3,5m a montante da saída e afastado 1,5m da lateral direita	10cm e 67cm
8	12/07/14 a 15/07/14	Inverno	Fase 2	2	Início do 1° canal - 2,7m a jusante da entrada	7cm e 41cm
9*	15/07/14 a 21/07/14	Inverno	Fase 2	2	Meio do 1° canal - 10,3m a jusante da entrada	7cm e 41cm
10	21/07/14 a 24/07/14	Inverno	Fase 2	2	Final do 1° canal - 22m a jusante da entrada	7cm e 41cm
11	28/07/14 a 01/08/14	Inverno	Fase 2	2	Final do 1° canal - 24m a jusante da entrada	10cm, 22cm e 40cm
12	01/08/14 a 05/08/14	Inverno	Fase 2	2	Meio do 2° canal	10cm, 22cm e 40cm
13	05/08/14 a 09/08/14	Inverno	Fase 2	2	Início do 3° canal - 1,5m do talude	10cm, 22cm e 43cm
14*	09/08/14 a 13/08/14	Inverno	Fase 2	2	Final do 3° canal - 1,3m a montante da saída	10cm, 22cm e 43cm
15	03/10/14 a 09/10/14	Inverno	Fase 2	1	Ponto central	10cm e 70cm
16	21/02/15 a 28/02/15	Verão	Fase 2	2	Início do 1° canal - 0,5m a jusante da entrada	7cm e 33cm
17	28/02/15 a 09/03/15	Verão	Fase 2	2	Início do 1° canal - 0,5m a jusante da entrada	6cm e 38cm
18	06/03/15 a 27/03/15	Ver/Out	Fase 2	1	Ponto central	30cm e 80cm
19	09/03/15 a 23/03/15	Ver/Out	Fase 2	2	Início do 1° canal - 4,3m a jusante da entrada	6cm e 38cm
20	23/03/15 a 30/03/15	Outono	Fase 2	2	Meio do 1° canal - 12,3m a jusante da entrada	6cm e 38cm
21	30/03/15 a 04/04/15	Outono	Fase 2	2	Final 1° canal - 1,0m do talude	6cm e 38cm
22	04/04/15 a 11/04/15	Outono	Fase 2	2	Início 2° canal - 2,0m do talude	6cm e 38cm
23	10/04/15 a 17/04/15	Outono	Fase 2	1	Meio da lagoa - 14m a jusante da entrada	30cm e 80cm
24	11/04/15 a 27/04/15	Outono	Fase 2	2	Ponto central do 2° canal	6cm e 38cm
25	27/04/15 a 07/05/15	Outono	Fase 2	2	Final do 2° canal	6cm e 38cm
26	02/07/15 a 16/07/15	Inverno	Fase 2	2	Ponto central da curva no final do 2° canal	3cm e 40cm
27	16/07/15 a 31/07/15	Inverno	Fase 2	1	0,7m a montante da saída	3cm e 72cm

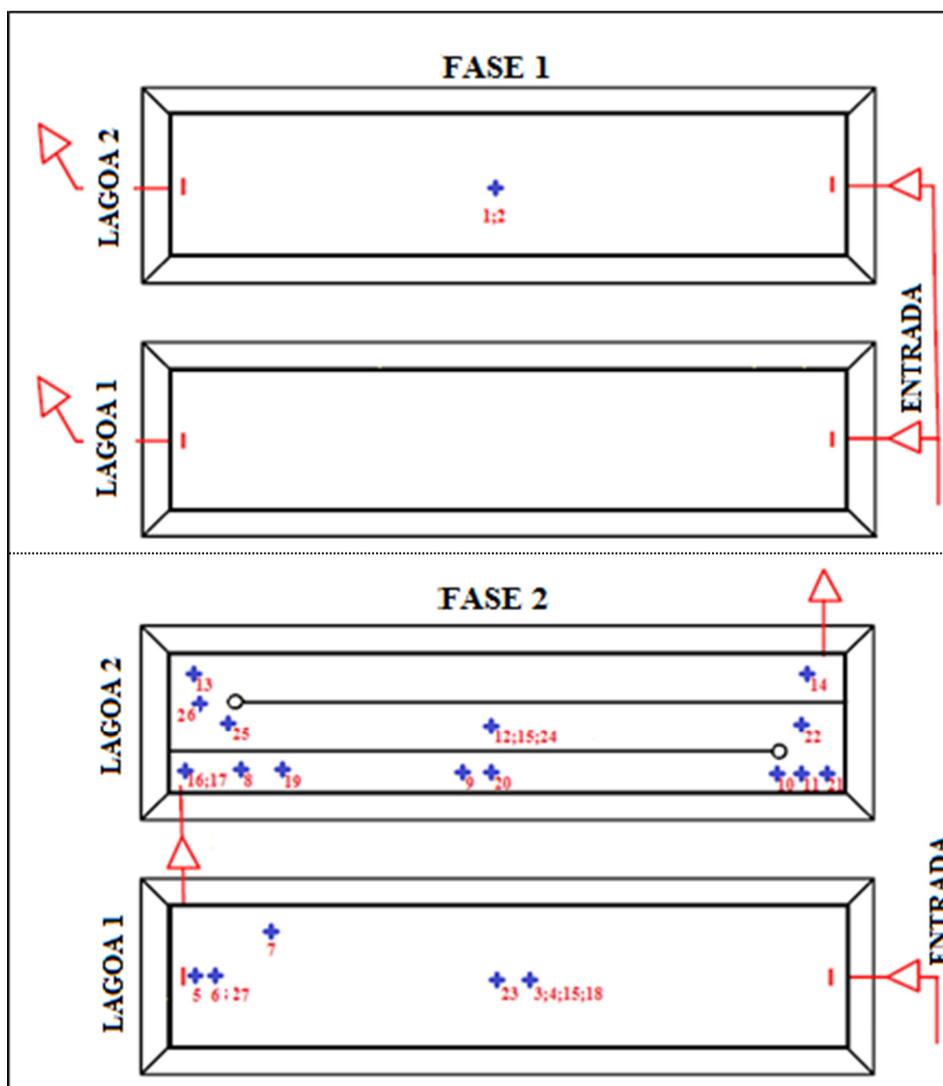
Nota 1: Nos ensaios 1, 2, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 17, 19, 20, 21, 22, 24, 25, 26 e 27 foram utilizadas as sondas Global Water WQ101®. Nos demais, as sondas YSI 600XLM V2®.

Nota 2: Intervalo de medição de 1 minuto após 10 dias do início do ensaio 1; 5 minutos para os ensaios n° 17, 19, 20, 21, 22, 24 e 25; 30 minutos para os ensaios 3 e 4; 15 minutos para o ensaio n° 15 e de 10 minutos para os demais.

Nota 3: Dados meteorológicos disponíveis a partir do ensaio 8.

\* Períodos coincidentes com ensaios com traçador salino na mesma lagoa

# Localização dos pontos ilustrada na FIG. 4.18



**FIGURA 4.18:** Desenho esquemático ilustrativo da localização dos pontos de monitoramento nas lagoas nas duas fases de operação (pontos indicados pela cruz, com indicação dos ensaios correspondentes).

A análise e interpretação dos dados tiveram por suporte a estatística descritiva e os testes estatísticos de hipóteses. Dados brutos foram tratados por meio da estatística descritiva e também testados estatisticamente quanto à normalidade (teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov e Lilliefors), antes da definição dos testes de hipóteses a serem aplicados. Tais testes foram então utilizados para comparação entre grupos amostrais de diferentes períodos (exemplo: período seco/frio X período úmido/quente). Em dados com distribuição normal foi aplicado o teste t de Student para amostras independentes, para avaliar se havia diferenças significativas entre os valores médios nos dois períodos analisados (dois grupos independentes). Da mesma maneira, para a comparação entre as medianas utilizou-se o teste

U de Mann-Whitney, nos pares de dados com distribuição assimétrica. Quando aplicáveis, testes de correlação de Spearman (para os dados não paramétricos) e correlação de Pearson e análise de regressão linear simples (para dados paramétricos) foram também realizados, na busca de informações que pudessem auxiliar na interpretação dos resultados. Foram utilizados os *softwares* Statistica 8.0<sup>®</sup> e Microsoft Excel 2010<sup>®</sup> para realização das análises estatísticas.

Kellner e Pires (2002) sugerem o gradiente térmico de 0.6°C/m ao longo da profundidade de uma lagoa como valor limite para identificação de estratificação térmica. Este mesmo valor foi considerado no trabalho de Sweeney *et al.* (2005). Os eventos de estratificação térmica e mistura vertical (desestratificação) foram identificados em cada ensaio tomando por base tal referência.

### **4.3 Ensaio hidrodinâmico de campo**

#### **4.3.1 Análises uni e bidimensionais de fluxo**

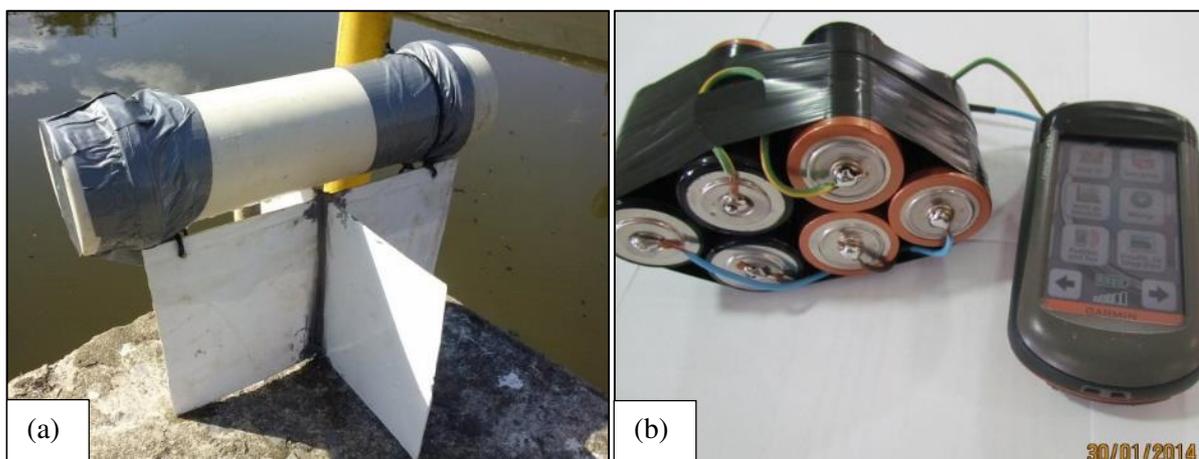
Análises uni e bidimensionais de fluxo nas lagoas foram realizadas a partir de testes com corantes; medições de velocidade e rastreamento do fluxo com *drogues*; e medições de velocidade com molinetes hidráulicos e sensores acústicos.

##### **4.3.1.1 Drogues**

Foram utilizados como *drogues* variações do dispositivo de Shilton e Kerr (1999), incluindo a versão apresentada por Passos *et al.* (2014), que contava com um GPS para registro automático dos trajetos do *drogue* em uma lagoa facultativa em escala real. Outra variação, apresentada por Casarotti *et al.* (2012), também foi utilizada. Nesta, a disposição do flutuador era vertical.

A FIG. 4.19a ilustra o *drogue* montado com GPS embutido em um flutuador de tubo de PVC com 75 mm de diâmetro (baseado em Passos *et al.*, 2014). O atuador, ou “vela”, foi feito com placas de acrílico de 20cm X 40cm encaixadas em forma de cruz, presos à base do tubo por abraçadeiras ajustáveis, de forma que o centro do atuador poderia ficar a diferentes profundidades e, portanto, ser guiado pelo fluxo de diferentes estratos na lagoa. O GPS foi programado para registro automático do trajeto percorrido pelo equipamento durante todo o período que permaneceu na lagoa. Uma bateria externa, com 6 pilhas de 9V, foi adaptada e

conectada ao aparelho para evitar interrupção dos registros (FIG. 4.19b). Foram realizados testes com os modelos GARMIN 60CS® e GARMIN OREGON 450®.



**FIGURA 4.19:** Registro fotográfico do (a) *Drogue* montado na presente pesquisa para análise de fluxo bidimensional nas lagoas do CePTS UFMG/COPASA, com GPS embutido e (b) GPS GARMIN OREGON 450® com bateria externa adaptada.

Apesar da precisão dos equipamentos ser incompatível com as dimensões das lagoas (podendo chegar até 15m, no caso do modelo menos preciso; o 60CS), os mesmos foram utilizados em períodos do dia que se observava maior intensidade do sinal e precisão, indicados pelos próprios aparelhos, bem como se observou a qualidade das trajetórias resultantes por meio da definição de um ponto de referência (ponto de lançamento na lagoa).

Já a FIG. 4.20 ilustra os dispositivos que foram montados com o flutuador na posição vertical (baseado em Casarotti *et al.*, 2012). Cada flutuador, também de PVC de diâmetro 75 mm, foi parcialmente preenchido com brita #1 para servir de lastro. Os *drogues* verticais foram concebidos com o mesmo tipo de atuador (placas retangulares de acrílico cruzadas) e com diferentes dimensões para o flutuador, permitindo também a inferência a respeito do fluxo em diferentes estratos. O *drogue* n° 1 possuía atuador de 0,15 m de largura por 0,10 m de altura e flutuador de 0,21 m; o *drogue* n° 2 possuía atuador de 0,15 m de largura por 0,13 m de altura e flutuador de 0,29 m e o *drogue* n° 3 possuía atuador de 0,26 m de largura por 0,15 m de altura e flutuador de 0,31 m. Portanto, o centro do atuador ficava aproximadamente no plano situado à uma profundidade correspondente ao tamanho do flutuador menos a metade da altura do atuador. A TAB. 4.4 resume tais características.

**TABELA 4.4** – Dimensões dos *drogues* verticais utilizados nas lagoas do CePTS UFMG/COPASA.

Drogue n°	Atuador (largura x altura)	Tamanho do flutuador	Profundidade do centro do atuador
1	0,15 m X 0,10 m	0,21 m	0,16 m
2	0,15 m X 0,13 m	0,29 m	0,23 m
3	0,26 m X 0,15 m	0,31 m	0,24 m

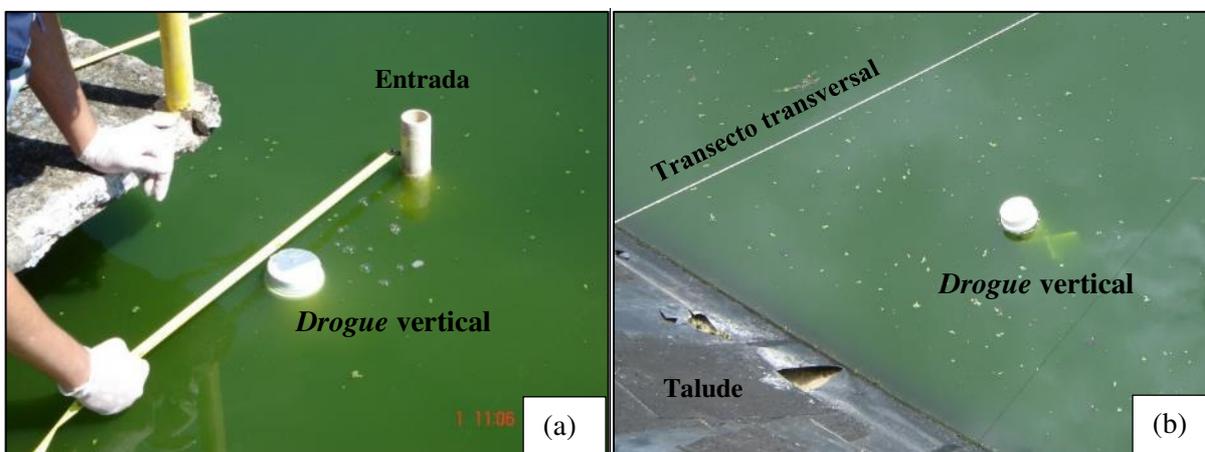


**FIGURA 4.20:** Registro fotográfico dos *drogues* verticais montados para análise de fluxo bidimensional nas lagoas do CePTS UFMG/COPASA.

Para as análises com os *drogues* verticais (sem o GPS), os experimentos foram conduzidos de forma análoga aos experimentos de Casarotti *et al.* (2012), que utilizaram piquetes a cada 4 - 10 m para demarcação das bordas de uma lagoa facultativa (escala real) durante experimentos com flutuadores. Neste trabalho, as lagoas foram demarcadas por meio de transectos paralelos sobre a superfície, com linhas ao longo do comprimento e da largura, formando uma malha de referência a partir de dois eixos. Como um “GPS manual”, as coordenadas dos drogues foram registradas ao longo do tempo tomando por base a malha de referência. A partir desses testes foi possível calcular velocidades em diferentes estratos, direções e em diferentes regiões nas lagoas, bem como comparar com os dados meteorológicos registrados para o mesmo momento (para efeitos de avaliação da influência do vento no comportamento hidrodinâmico da lagoa) e obter as trajetórias de fluxo para comparação com os modelos em CFD (validação do modelo).

Os *drogues* verticais também foram utilizados para calcular velocidades em pontos específicos via medição direta da distância percorrida em determinado tempo, a exemplo da

aferição da velocidade do fluxo de entrada nas lagoas, como ilustrado na FIG. 4.21a. A FIG. 4.21b apresenta registro fotográfico do *drogue* vertical n° 1 em trajetória junto ao talude da lagoa 1, próximo a um dos transectos transversais.



**FIGURA 4.21:** Registro fotográfico (a) da medição de velocidade com *drogue* vertical (n° 3) na entrada da lagoa 1 - CePTS UFMG/COPASA e (b) do *drogue* vertical (n° 1) em trajetória junto ao talude da lagoa 1.

#### 4.3.1.2 Molinetes e sensores acústicos (ADV)

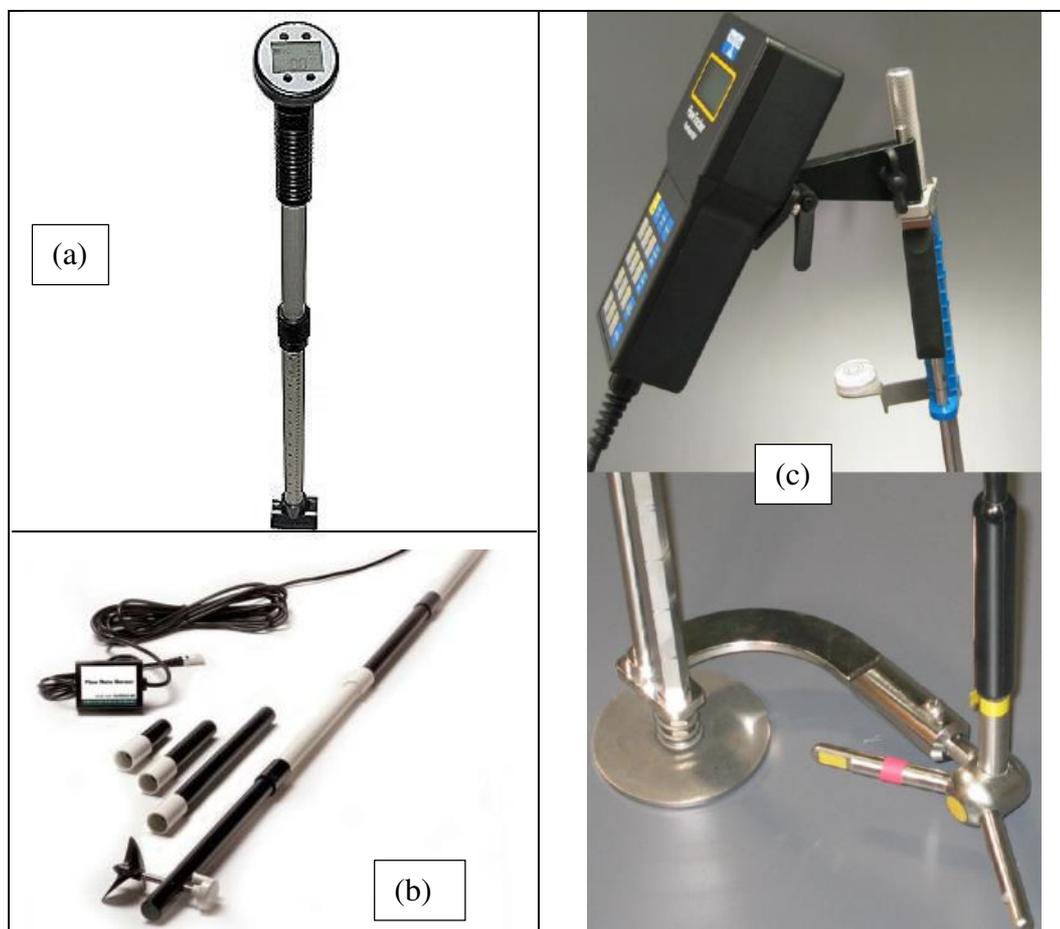
Medições diretamente na massa líquida foram realizadas com molinetes hidráulicos e com um equipamento acústico (baseado no efeito Doppler) de medição de velocidade e direção do fluxo, em diferentes pontos e profundidades das lagoas e principalmente próximo aos dispositivos de entrada. Foram testados os seguintes equipamentos:

- *Flow Probe 3.7'-6' Swivel Head*®, da *Global Water* (molinete), com faixa de medição da velocidade de 0,1 a 6,1 m/s ( $\pm 0,03$ m/s), de leitura direta no equipamento (FIG. 4.22a) – equipamento emprestado pelo Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos da Escola de Engenharia da UFMG – EHR;

- *Flow Rate Sensor Go!®Link*, do fabricante *Vernier* (molinete), com faixa de medição de 0 a 4,0 m/s (precisão de 0,0012 m/s), conectado a um computador para registro dos dados (FIG. 4.22b) - equipamento emprestado pelo Departamento de Engenharia Ambiental (DEAM) da Universidade Federal do Triângulo Mineiro – UFTM;

- Medidor ADV (*Acoustic Doppler Velocimeter*) *Sontek/YSI FlowTracker*®, com faixa de medição de  $\pm 0,001$  a 4,0 m/s (precisão de 0,0001 m/s), contendo *datalogger* para registro automáticos dos dados (FIG. 4.22c), calibrado conforme orientações do fabricante e ajustado

para efetuar medições contínuas por 40 segundos em cada ponto. De acordo com seu manual, a medição da velocidade pelo ADV ocorre por meio da transmissão de um pulso curto de som em uma frequência conhecida, de forma que, após a passagem do pulso pelo volume de fluido amostrado, o som é refletido em todas as direções da matéria particulada (sedimento, organismos pequenos, bolhas, entre outros), os receptores captam o sinal refletido e assim, o equipamento mede a frequência para cada receptor. Além da velocidade, foi obtida com o *Flowtracker* a direção do fluxo. Esta etapa de medições com o ADV *Sontek/YSI FlowTracker*® contou com a participação do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear – CDTN / Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN (Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação – MCTI), na pessoa do Pesquisador Dr. Vinícius Verna Magalhães Ferreira.



**FIGURA 4.22:** Equipamentos utilizados para medição de velocidade nas lagoas do CePTS UFMG/COPASA: **(a)** Molinete Flow Probe 3.7'-6' Swivel Head®, da Global Water; **(b)** Molinete Flow Rate Sensor Go!@Link, Vernier; **(c)** controlador de mão e sensores do medidor ADV Sontek/YSI FlowTracker®. Fonte: Imagens fornecidas pelos fabricantes

Os pontos de medição com os molinetes e com o medidor acústico nas duas lagoas foram planejados conforme indicações das TAB. 4.5 (para a lagoa 1) e 4.6 (lagoa 2 com chicanas) e dos croquis nas FIG. 4.23 (lagoa 1) e 4.24 (lagoa 2). Pequenas variações deste planejamento podem ser encontradas nos resultados e ocorreram por questões práticas ou impossibilidade de aferição na ocasião.

A FIG. 4.25 apresenta registro fotográfico da lagoa 1 com os transectos marcados com barbante para identificação das seções de medição.

**TABELA 4.5** - Descrição das seções e pontos das medições com os molinetes *Global Water* e *Vernier* e com o medidor *ADV FlowTracker* – Lagoa 1 - CePTS UFMG/COPASA

Ponto de medição	Altura de medição*	Ponto de medição	Altura de medição*
<u>Entrada</u>	0,65 m		
<u>Seção L1S1</u>		<u>Seção L1S3</u>	
P1	0,41 m	P1	0,39 m
P2	0,46 m	P2	0,46 m
P3	0,46 m	P3	0,46 m
P4	0,46 m	P4	0,46 m
P5	0,46 m	P5	0,46 m
P6	0,27 m	P6	0,22 m
<u>Seção L1S2</u>		<u>Seção L1S4</u>	
P1	0,43 m	P1	0,41 m
P2	0,46 m	P2	0,46 m
P3	0,46 m	P3	0,46 m
P4	0,46 m	P4	0,46 m
P5	0,46 m	P5	0,46 m
P6	0,28 m	P6	0,23 m

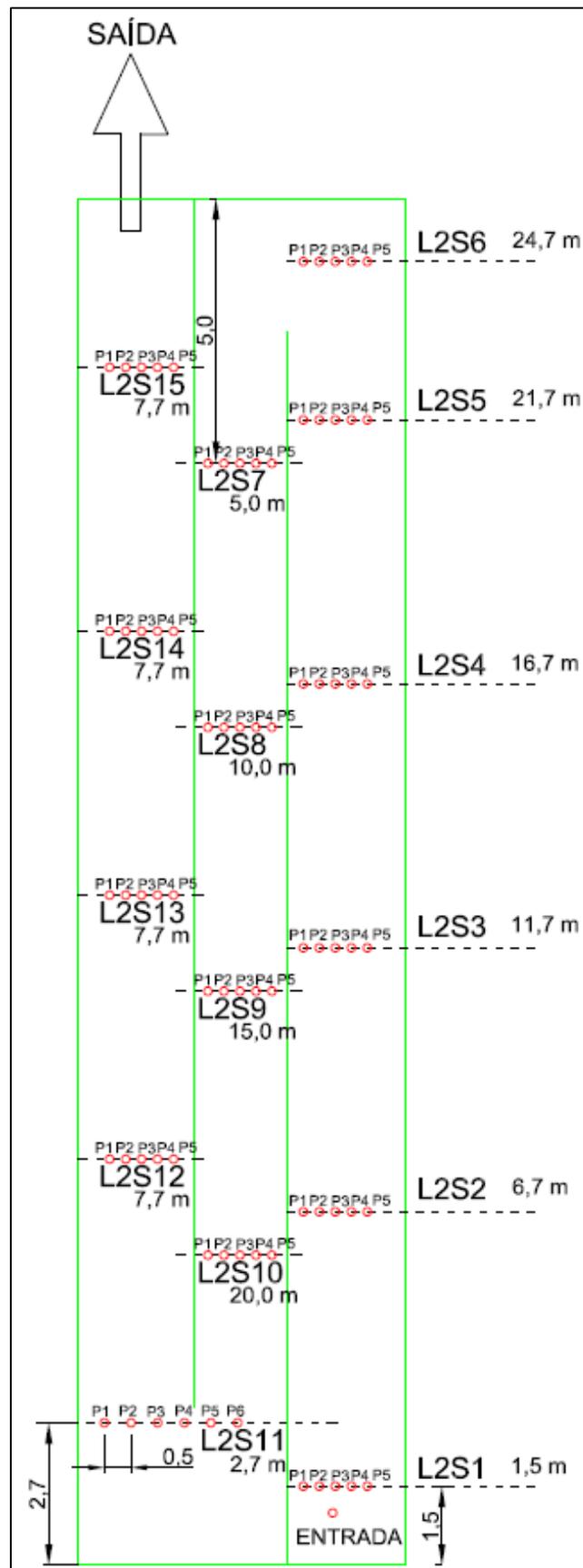
\*Média, a partir do fundo

**TABELA 4.6** - Descrição das seções (entre parênteses, a distância a partir do talude do início do canal) e pontos das medições com os molinetes *Global Water* e *Vernier* e com o medidor *ADV FlowTracker* – Lagoa 2 - CePTS UFMG/COPASA

Ponto de medição	Altura de medição*	Ponto de medição	Altura de medição*
<u>Entrada</u>	0,44 m		
<u>Seção L2S1 (1,5m no 1° canal)</u>		<u>Seção L2S9 (15,0m no 2° canal)</u>	
P1	0,25 m	P1	0,29 m
P2	0,25 m	P2	0,29 m
P3	0,25 m	P3	0,29 m
P4	0,25 m	P4	0,29 m
P5	0,25 m	P5	0,29 m
<u>Seção L2S2 (6,7m no 1° canal)</u>		<u>Seção L2S10 (20,0m no 2° canal)</u>	
P1	0,29 m	P1	0,30 m
P2	0,29 m	P2	0,30 m
P3	0,29 m	P3	0,30 m
P4	0,29 m	P4	0,30 m
P5	0,29 m	P5	0,30 m
<u>Seção L2S3 (11,7m no 1° canal)</u>		<u>Seção L2S11 (2,7m no 3° canal)**</u>	
P1	0,29 m	P1	0,26 m
P2	0,29 m	P2	0,26 m
P3	0,29 m	P3	0,26 m
P4	0,29 m	P4	0,26 m
P5	0,29 m	P5	0,26 m
<u>Seção L2S4 (16,7m no 1° canal)</u>		P6	0,26 m
P1	0,29 m	<u>Seção L2S12 (7,7m no 3° canal)</u>	
P2	0,29 m	P1	0,29 m
P3	0,29 m	P2	0,29 m
P4	0,29 m	P3	0,29 m
P5	0,29 m	P4	0,29 m
<u>Seção L2S5 (21,7m no 1° canal)</u>		P5	0,29 m
P1	0,25 m	<u>Seção L2S13 (12,7m no 3° canal)</u>	
P2	0,25 m	P1	0,28 m
P3	0,25 m	P2	0,28 m
P4	0,25 m	P3	0,28 m
P5	0,25 m	P4	0,28 m
<u>Seção L2S6 (24,7m no 1° canal)</u>		P5	0,28 m
P1	0,26 m	<u>Seção L2S14 (17,7m no 3° canal)</u>	
P2	0,26 m	P1	0,28 m
P3	0,26 m	P2	0,28 m
P4	0,26 m	P3	0,28 m
P5	0,26 m	P4	0,28 m
<u>Seção L2S7 (5,0m no 2° canal)</u>		P5	0,28 m
P1	0,26 m	<u>Seção L2S15 (22,7m no 3° canal)</u>	
P2	0,26 m	P1	0,26 m
P3	0,26 m	P2	0,26 m
P4	0,26 m	P3	0,26 m
P5	0,26 m	P4	0,26 m
<u>Seção L2S8 (10,0m no 2° canal)</u>		P5	0,26 m
P1	0,28 m		
P2	0,28 m		
P3	0,28 m		
P4	0,28 m		
P5	0,28 m		

\*Média, a partir do fundo; \*\*A distância entre os pontos em uma mesma seção é de 0,3m para todas as seções, exceto a L2S11, que é de 0,5m



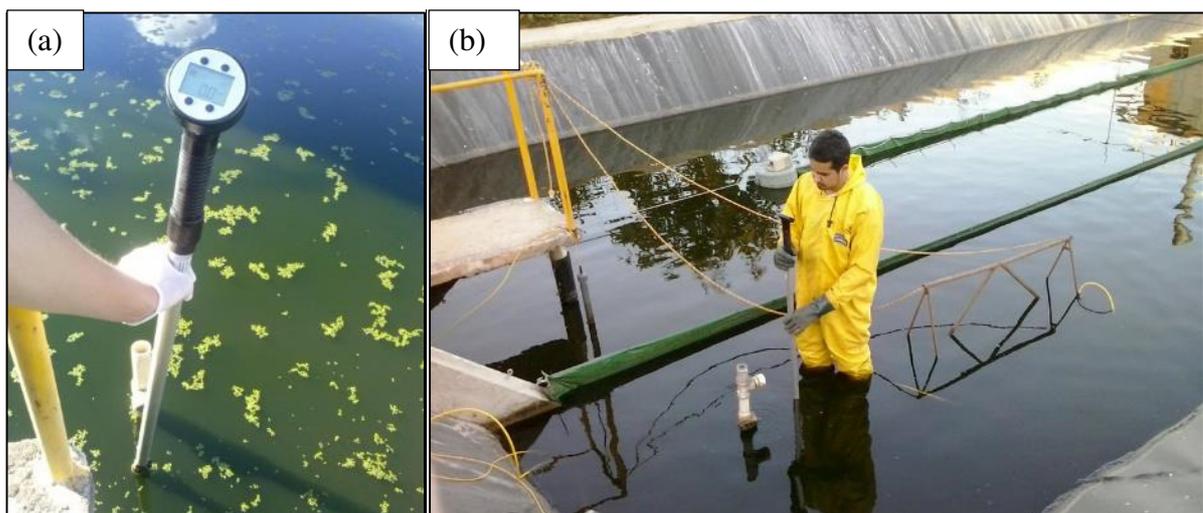


**FIGURA 4.24:** Indicação da localização das seções (linhas pontilhadas) e dos pontos de medição (em vermelho) com os molinetes e com o medidor acústico na lagoa 2 - CePTS UFMG/COPASA.

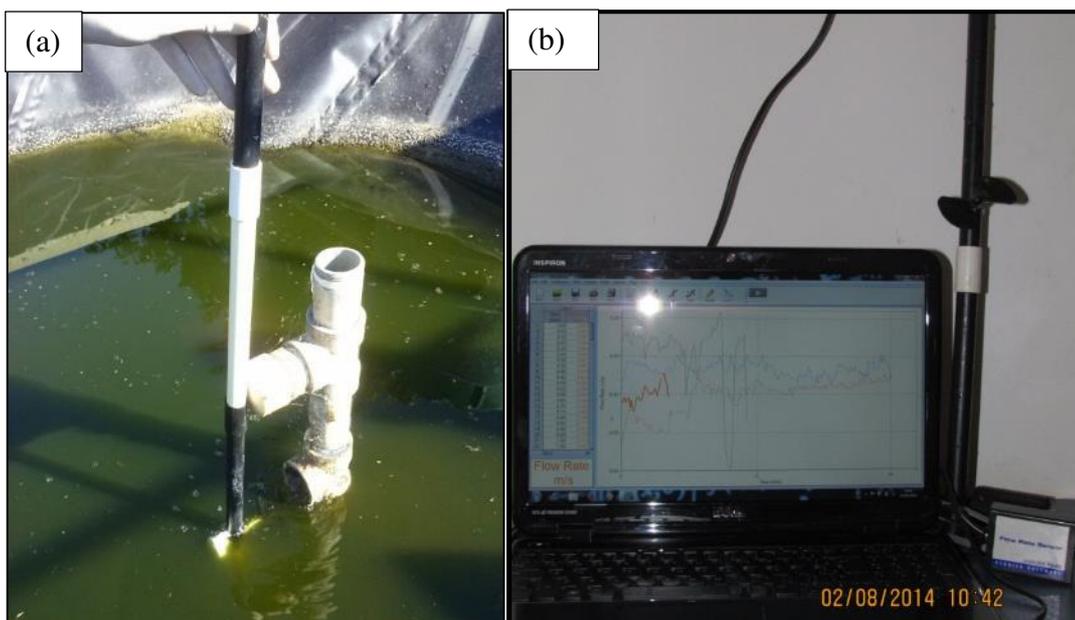


**FIGURA 4.25:** Registro fotográfico da lagoa 1 com os transectos marcados com barbante para identificação das seções de medição - CePTS UFMG/COPASA

As FIG. 4.26a e 4.26b apresentam registro fotográfico das medições com o molinete *Flow Probe 3.7'-6' Swivel Head*®, na entrada da lagoa 1 e lagoa 2 chicaneada, respectivamente. A FIG. 4.27a apresenta registro fotográfico das medições com o molinete *Flow Rate Sensor Go!®Link* na entrada da lagoa com chicanas e a FIG. 4.27b ilustra a interface de registro dos dados no computador conectado diretamente ao molinete. A FIG. 4.28 apresenta registro fotográfico das medições com o *ADV Sontek/YSI FlowTracker*®. No dia desta última fotografia a cor da lagoa ao fundo estava alterada porque testes com corante rodamina haviam sido realizados no dia anterior.



**FIGURA 4.26:** Registro fotográfico das medições com o molinete *Flow Probe 3.7'-6' Swivel Head*®, (a) na entrada da lagoa 1 e (b) na entrada da lagoa 2 chicaneada - CePTS UFMG/COPASA.



**FIGURA 4.27:** (a) Registro fotográfico das medições com o molinete Flow Rate Sensor Go!@Link, Vernier na entrada da lagoa 1 e (b) Computador conectado diretamente ao molinete para registro dos dados.



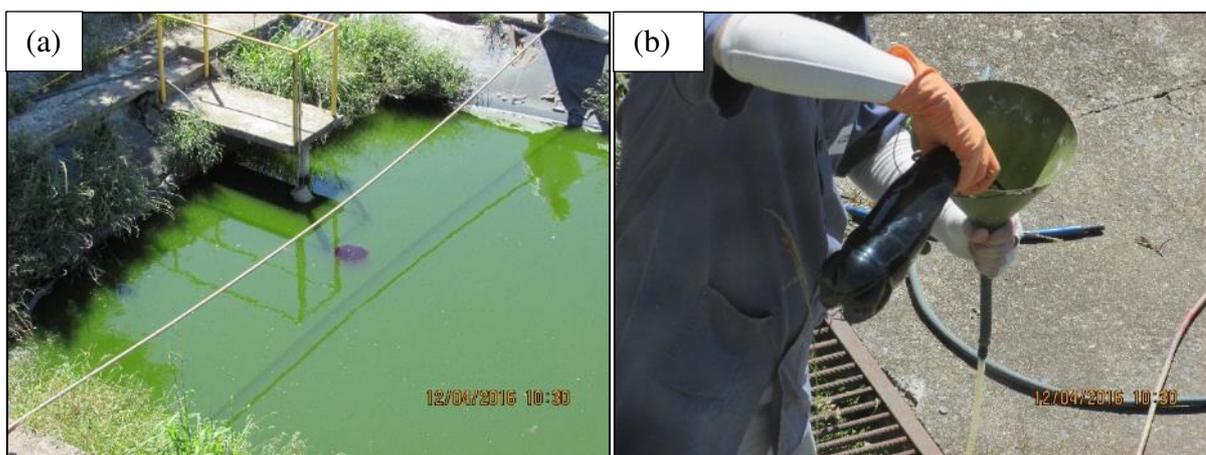
**FIGURA 4.28:** Registro fotográfico das medições com o ADV Sontek/YSI FlowTracker®.

#### 4.3.1.3 Corantes

Foram utilizados pigmentos diluídos em água, tais como os diversos disponíveis no mercado para tintura de roupas e misturas com tintas (ex.: corante líquido Xadrez®), bem como os corantes fluorescentes Rodamina (cor vermelha) e Uranina (cor verde), fornecidos pelo

CDTN. Os corantes foram injetados na entrada das lagoas e em diversos pontos ao longo da superfície, incluindo pontos próximos às saídas, curvas das chicanas, laterais etc., com o intuito de obter informações a respeito da dispersão do fluido nas unidades, mas que também podem ser úteis para validação dos testes com os medidores de velocidade, validação dos modelos em CFD, avaliação do efeito do vento na superfície e discussão dos testes com traçadores.

Para as aplicações nas posições mais distantes dos taludes nas lagoas, utilizou-se um tubo de PVC perfurado ao longo do seu comprimento e tampado em uma das extremidades (ilustrado na FIG. 4.29a durante teste realizado na lagoa 1). O corante foi então aplicado na outra extremidade com uma ajuda de um funil e uma mangueira flexível (FIG. 4.29b). Na entrada da lagoa 1 a aplicação foi a montante do dispositivo, na caixa de distribuição (já apresentado na FIG. 4.3b) e na entrada da lagoa 2 diretamente na tubulação, também com a ajuda do funil.



**FIGURA 4.29:** (a) Registro fotográfico da utilização de tubo de PVC perfurado para aplicação de corante na lagoa 1 e (b) Registro da introdução do corante no tubo

### 4.3.2 Ensaios com traçadores

Ensaios foram conduzidos neste trabalho com traçador salino (cloreto de sódio) e traçador fluorescente (uranina). Os principais aspectos metodológicos dos ensaios com cada traçador encontram-se registrados separadamente a seguir.

#### 4.3.2.1 Ensaios com traçador salino

O traçador salino utilizado nos ensaios foi o sal de cozinha comum (cloreto de sódio - NaCl) em solução aquosa. Os ensaios foram realizados por meio da técnica de estímulo-resposta (LEVENSPIEL, 2000) com injeção de pulso do traçador na entrada das lagoas e análise da

condutividade elétrica na saída. As leituras de condutividade foram realizadas com sondas *Global Water WQ301A-O* (faixa de detecção de 0 a 5.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), acopladas a um *datalogger GL500-7-2 Global Water®*, e sondas *YSI 600XLM V2®* (faixa, de detecção de 0 a 100  $\text{mS}/\text{cm}$ ) com *datalogger* interno. Ambos os modelos de sensores foram calibrados conforme os respectivos manuais dos fabricantes. Os sensores foram afixados nas profundidades requeridas (presos em cavalete ou nas estruturas externas das lagoas) e os dados armazenados nos *dataloggers*. A frequência de medição variou de acordo com a programação de coleta de dados, capacidade de armazenamento dos aparelhos e fase do teste (início ou final), compreendendo intervalos de 10 ou 15 minutos. Os sensores utilizados fazem automaticamente a correção da condutividade para uma temperatura de referência ( $25^\circ\text{C}$ ).

As soluções do traçador salino foram preparadas em reservatórios de 200 e 800L (caixas d'água), com adição do sal e homogeneização contínua. Antes da aplicação do sal foram realizadas medidas da condutividade natural das lagoas, para definição dos valores de *background*. As quantidades de sal de cozinha utilizadas nos ensaios foram definidas a partir de ensaios exploratórios, quando se chegou a uma quantidade mínima por lagoa (de acordo com o volume) capaz de superar o valor de *background* em 3 a 4 vezes no pico e não ultrapassar o limite de quantificação das sondas. De forma a reduzir o volume de traçador para aproximar a aplicação a uma injeção do tipo pulso e facilitar a mistura da massa líquida, o volume de água utilizado para diluição foi o mínimo necessário, observado o limite de solubilidade do NaCl em água à temperatura ambiente.

Após preparo da solução, o traçador foi introduzido nas lagoas lentamente, para reduzir a sedimentação da solução salina (mais densa), mas sempre em período de tempo inferior a 2% do TDH (BRACHO *et al.* (2009)) ou 1/60 do TDH (THIRUMURTHI, 1969; MARSKE e BOYLE, 1973), para não descaracterizar a aplicação em pulso. A vazão nas lagoas também era aferida antes e ao longo de cada ensaio.

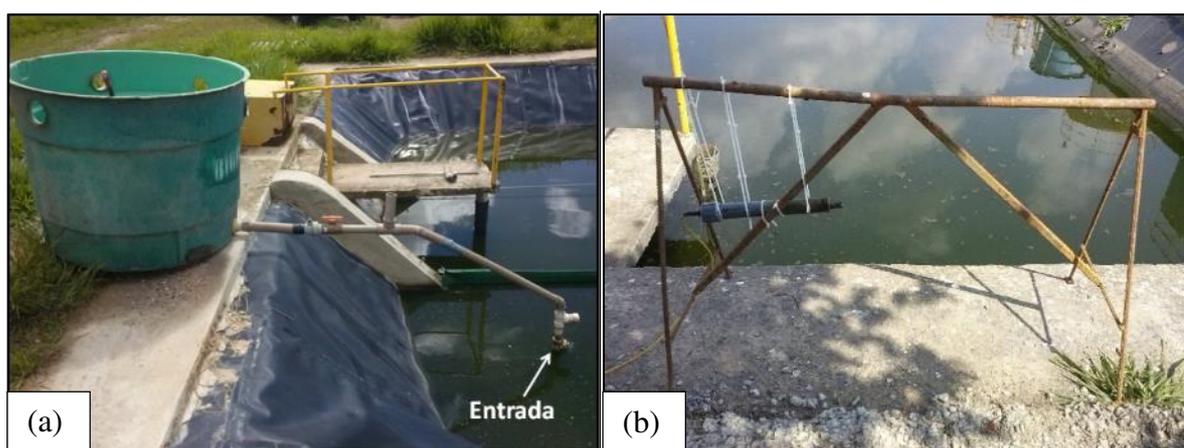
Os valores obtidos de condutividade foram convertidos para concentração de NaCl utilizando-se da equação de calibração da sonda apresentada por Possmoser-Nascimento (2014), em trabalhos no mesmo sistema:

$$[NaCl] = 0,5258 \cdot (cond) - 3,4836 \quad (R^2 = 0,999) \quad (4.1)$$

Em que  $[NaCl]$  é a concentração de sal do traçador (mg/L) e  $cond$  é a condutividade medida ( $\mu S/cm$ ).

Apesar da condutividade nas lagoas ser originária de diferentes compostos dissolvidos, e não apenas do cloreto de sódio, a transformação de toda condutividade em concentração de NaCl possibilitou a subtração dos valores preexistentes dos valores encontrados após a injeção do traçador. Considerou-se como valor de *background* em cada ensaio a condutividade média medida em monitoramento imediatamente antes da aplicação do traçador, com período mínimo de 1 dia.

A FIG. 4.30a apresenta registro de um dos ensaios de traçador (lagoa 2), utilizando o reservatório de 800L, com aplicação do traçador na tubulação de entrada da lagoa, e a FIG. 4.30b registro da sonda *Global Water WQ301A-O* fixa ao cavalete para posterior inserção no final das lagoas.



**FIGURA 4.30:** Registro fotográfico (a) de um dos ensaios de traçador - lagoa 2 e (b) da sonda YSI 600XLM V2 fixa ao cavalete para posterior inserção no final das lagoas - CePTS UFMG/COPASA.

A TAB. 4.7 apresenta sumário das condições de realização dos ensaios realizados com traçador salino.

**TABELA 4.7** – Resumo das condições de realização dos ensaios com traçador salino (cloreto de sódio) nas lagoas do CePTS UFMG/COPASA.

Ensaio n°	Período	Fase de operação	Lagoa	Massa traçador (kg)	Vol. solução (m <sup>3</sup> )	Tempo de aplicação (h)	Vazão afluente* (m <sup>3</sup> /d)	TDH teórico (d)
1	07/11/13 a 24/11/13	Fase 1	1	75	0,35	0,333	19	6,0/3,8**
2	02/12/13 a 06/01/14	Fase 1	1	320	1,45	1,750	19	6,0/3,8**
3	02/12/13 a 06/01/14	Fase 1	2	320	1,45	1,750	19	6,8
4	29/04/14 a 19/05/14	Fase 2	1	320	1,10	2,000	40	3,1/2,1**
5	16/07/14 a 01/08/14	Fase 2	2	150	0,50	1,100	29	2,2
6	09/08/14 a 27/08/14	Fase 2	2	160	0,60	0,833	31	2,1
7	30/08/14 a 17/09/14	Fase 2	1	300	1,00	0,767	34	2,4
8	16/12/14 a 14/01/15	Fase 2	2	175	0,79	0,650	36	1,8

\*Média das aferições ao longo de cada ensaio

\*\* Excluindo-se o volume ocupado pelo lodo, obtido na batimetria de Nascimento *et al.* (2013) e considerando a profundidade de operação no dia do ensaio

Nota 1: Nos ensaios 1, 2, 3, 5, 7 e 8 foram utilizadas as sondas Global Water WQ101®. Nos ensaios 4 e 6 as sondas YSI 600XLM V2®

Nota 2: Intervalos de medição variaram de 5 a 30 minutos

Nota 3: Dados meteorológicos disponíveis a partir do ensaio 5

#### 4.3.2.2 Ensaio com traçador fluorescente

Esta etapa do trabalho contou com a participação do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear – CDTN / Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN (Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovação e Comunicações - MCTIC). Os testes foram realizados em ambas as lagoas, na configuração da fase 2.

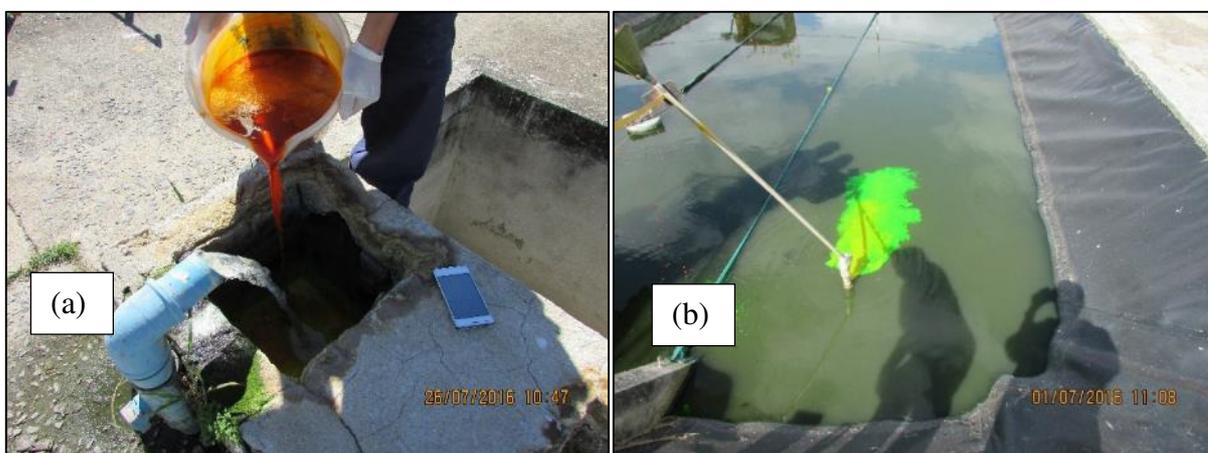
O traçador fluorescente utilizado nos ensaios foi a uranina (sal de sódio da fluoresceína) em solução aquosa. Os ensaios foram realizados por meio da técnica de estímulo-resposta (LEVENSPIEL, 2000) com injeção de pulso do traçador na entrada das lagoas e análise da fluorescência na saída, com correspondência à concentração do traçador (em ppb). As leituras foram realizadas com o fluorímetro ALBILLIA GGUN FL-30 calibrado conforme manual do fabricante e acoplado a um *datalogger* equipado com bateria externa. Este aparato foi capaz de fornecer energia, registrar a hora, a frequência de leitura e armazenar os dados. O fluorímetro possuía limite de detecção de  $2 \times 10^{-11}$  g/ml (uranina) e também media a turbidez, na faixa de 0,02 a 400 NTU. O fluorímetro foi acoplado a uma bomba peristáltica modelo Masterflex® 7518-10 (intervalo de leitura de vazão de 0,001 – 2300 mL/min), que funcionava continuamente realizando a sucção de uma pequena parcela do efluente no dispositivo de saída das lagoas, fazendo-a passar pelo fluorímetro. A frequência de medição variou de acordo com a programação de coleta de dados, capacidade de armazenamento dos aparelhos e fase do teste (início ou final), compreendendo intervalos de 1 a 15 minutos. A FIG. 4.31 apresenta imagem do equipamento.



**FIGURA 4.31:** Registro fotográfico do aparato para medição da concentração do traçador fluorescente nas lagoas: (a) fluorímetro com *datalogger* e (b) bomba peristáltica - CePTS UFMG/COPASA.

As soluções do traçador fluorescente foram preparadas em baldes de 10L, com adição do traçador (em pó) e homogeneização contínua. Antes da aplicação foram realizadas medidas da fluorescência natural das lagoas, para definição dos valores de *background*. As quantidades utilizadas nos ensaios foram definidas a partir de ensaios exploratórios. Após preparo da solução, o traçador era introduzido nas lagoas em minutos (1 a 2 minutos), em um pulso, já que não havia preocupação com a sedimentação. A vazão nas lagoas também era aferida antes e ao longo de cada ensaio.

A FIG. 4.32a apresenta registro de um dos ensaios na lagoa 1, ilustrando a aplicação do traçador no sistema de distribuição do afluente. Na lagoa 2, as tentativas de ensaios aconteceram com aplicação do traçador diretamente na tubulação de entrada da lagoa (FIG. 4.32b).



**FIGURA 4.32:** Registro fotográfico da aplicação do traçador fluorescente (a) na lagoa 1 e (b) na lagoa 2 - CePTS UFMG/COPASA.

A TAB. 4.8 apresenta sumário das condições de realização dos ensaios realizados com traçador fluorescente. Não foram considerados na tabela os ensaios exploratórios (4 testes exploratórios) ou aqueles que não foram bem-sucedidos, principalmente na lagoa 2, em função de interrupção no registro dos dados no computador, falta de energia, entupimento do equipamento de coleta e chuva em excesso (6 testes).

**TABELA 4.8** – Resumo das condições gerais de realização dos ensaios com traçador fluorescente (uranina) nas lagoas do CePTS UFMG/COPASA.

Ensaio n°	Período	Fase de operação	Lagoa	Massa traçador (g)	Vol. solução (L)	Tempo de aplicação (min)	Vazão afluente* (m³/d)	TDH teórico (d)
1	05/09/16 a 09/09/16	Fase 2	1	20	10	2	35	3,4
2	20/03/17 a 31/03/17	Fase 2	1	15	10	1,5	38	3,3
2	26/06/17 a 03/07/17	Fase 2	1	15	10	1,5	22	3,7

\*Média das aferições ao longo de cada ensaio

#### 4.3.2.3 Análise dos dados dos ensaios com traçadores

A partir dos resultados dos ensaios com os traçadores foi possível determinar os tempos de detenção hidráulica médios, assim como as variâncias, baseado na distribuição discreta dos intervalos de tempo medidos. Os valores obtidos foram então utilizados para determinar o número de dispersão de cada lagoa.

Tendo em vista que a curva de traçador obtida em campo é definida por uma distribuição discreta de intervalos de tempo, o tempo de detenção hidráulica médio pode ser calculado por meio da Equação 4.2. A variância dos dados pode ser definida de acordo com a Equação 4.3 e sua forma adimensional ( $\sigma^2_\theta$ ) pode ser relacionada ao número de dispersão  $d$  por meio da Equação 4.4 (LEVENSPIEL, 2000; METCALF e EDDY, 2003). Para obtenção de  $d$  utilizou-se método iterativo com auxílio da ferramenta *solver* do Microsoft Excel®, a partir da qual foi encontrado o valor de  $d$  que mais aproximava de zero a diferença entre os termos dos dois lados da Equação 4.4. Considerou-se que a obtenção de parâmetros considerando sistema fechado pode ser mantida, tendo em vista as baixas velocidades envolvidas (reduzido número de Peclet).

$$\overline{TDH}_{\Delta c} = \frac{\sum t_i \cdot C_i \cdot \Delta t_i}{\sum C_i \cdot \Delta t_i} \quad (4.2)$$

$$\sigma_{\Delta c}^2 = \frac{\sum t_i^2 \cdot C_i \cdot \Delta t_i}{\sum C_i \cdot \Delta t_i} - (\overline{TDH_{\Delta c}})^2 \quad (4.3)$$

$$\sigma_{\theta}^2 = \frac{\sigma_{\Delta c}^2}{\overline{TDH_{\Delta c}}^2} = 2 \cdot d - 2 \cdot d^2 \left[ \left( 1 - e^{-1/d} \right) \right] \quad (4.4)$$

Para as quais:

$\overline{TDH_{\Delta c}}$  = tempo médio de detenção baseado na discretização do intervalo de tempo (T).

$t_i$  = tempo no intervalo i de medição (T).

$\tau$  = tempo de detenção hidráulica teórico (volume/vazão) (T).

$C_i$  = concentração do traçador no intervalo i de medição (M/L<sup>3</sup>).

$\Delta t_i$  = Incremento de tempo (T).

Os valores de  $d$  obtidos pelos testes com traçadores foram comparados com os valores obtidos com o uso de equações empíricas de literatura para estimativa do número de dispersão (item 3.5.2.3).

Outros parâmetros hidráulicos determinados foram:

- **Índices de curto-circuito**  $\phi$  (Equação 4.5) (METCALF e EDDY, 2003) e  $S$  (Equação 4.6) (TA e BRIGNAL, 1998):

$$\phi = \frac{t_i}{\tau} \quad (4.5)$$

$$S = \frac{t_{16}}{\tau} \quad (4.6)$$

Em que  $t_i$  é tempo em que ocorre a primeira aparição do traçador (T),  $\tau$  é o tempo (T) de detenção hidráulica teórico (volume/vazão) e  $t_{16}$  é o tempo de passagem do 16º percentil do traçador (T).

- **Números de tanques em série**  $N$ , baseado em Levenspiel (2000),  $N_\gamma$ , baseado na função gama e  $N_p$  baseado no TDH real médio e no tempo de pico do traçador (KADLEC e WALLACE, 2009), descritos pelas Equações 4.7 e 4.8:

$$N = \frac{1}{2.d - 2.d^2(1 - e^{-1/d})} \quad (4.7)$$

$$N_p = \frac{\overline{TDH}_{\Delta c}}{\overline{TDH}_{\Delta c} - t_p} \quad (4.8)$$

Em que  $d$  é número de dispersão (-),  $t_p$  é o tempo (d) corresponde ao pico (maior concentração) e  $\overline{TDH}_{\Delta c}$  é tempo médio de detenção hidráulica baseado na discretização do intervalo de tempo (T).

Já o número de tanques em série  $N_\gamma$  foi obtido baseado na aplicação da distribuição gama ( $\gamma(t)$ ) aos tempos de residência e posterior ajuste entre os dados do modelo e os dados dos traçadores, com utilização da ferramenta *solver* do Microsoft Excel® para minimização da soma dos quadrados dos desvios entre esses dois conjuntos de dados, encontrando, para isso, o melhor valor de  $N_\gamma$  (que resultava no maior  $R^2$ ). A distribuição gama é dada pela Equação 4.9:

$$\gamma(t) = \frac{N_\gamma}{\overline{TDH}_{\Delta c} \cdot \Gamma(N_\gamma)} \left( \frac{N_\gamma \tau}{\overline{TDH}_{\Delta c}} \right)^{N_\gamma - 1} e^{-\left( \frac{N_\gamma \tau}{\overline{TDH}_{\Delta c}} \right)} \quad (4.9)$$

De forma que a função gama, para um  $N_\gamma$  inteiro positivo, é (Equação 4.10):

$$\Gamma(N_\gamma) = (N_\gamma - 1)! \quad (4.10)$$

- **Eficiência volumétrica**  $E_v$  (KADLEC e WALLACE, 2009) (Equação 4.11):

$$E_v = \frac{\overline{TDH}_{\Delta c}}{\tau} \quad (4.11)$$

- **Fração de zonas mortas**  $\Psi$  (Equação 4.12):

$$\Psi = 1 - E_v \quad (4.12)$$

- **Eficiência hidráulica**  $\lambda$ , conforme proposto por Persson *et al.* (1999) (Equação 4.13):

$$\lambda = \frac{t_p}{\tau} \quad (4.13)$$

O percentual de recuperação do traçador (%R) foi calculado com o emprego da Equação 4.14:

$$\%R = \frac{\sum Q_i \cdot C_i \cdot \Delta t_i}{m_0} \quad (4.14)$$

Para a qual  $Q_i$  é a vazão efluente no intervalo  $i$  (considerada constante), em  $L^3/T$ ,  $C_i$  é a concentração do traçador no intervalo  $i$  de medição ( $M/L^3$ ) e  $m_0$  a massa de traçador adicionada (M).

A partir dos resultados obtidos, buscou-se avaliar os principais parâmetros hidráulicos das lagoas, bem como apontar as principais percepções quanto ao uso dos traçadores escolhidos.

#### **4.4 Modelagem matemática e estatística**

Dados dos ensaios de traçador foram comparados a modelos teóricos de mistura completa, fluxo em pistão e fluxo disperso. Conforme já mencionado, o número de tanques em série foi obtido baseado na aplicação da distribuição gama aos tempos de residência e posterior ajuste entre os dados do modelo e os dados do traçador. Neste caso, a ferramenta *solver* do Microsoft Excel® foi utilizada para minimizar a soma dos quadrados dos desvios entre esses dois conjuntos de dados, encontrando, para isso, o melhor valor do número de tanques em série (que resultava no maior  $R^2$ ).

A ferramenta *solver* também foi utilizada para ajuste dos dados meteorológicos (ventos, temperatura, radiação solar) a modelos e funções matemáticas; tais como senóides, séries de Fourier e modelos de volumes compartimentados, com recirculações internas e trocas lentas. Também nestes casos o método iterativo da ferramenta era aplicado, a partir da qual se obtiveram os valores dos coeficientes em cada modelo ou expressão matemática que minimizava a raiz quadrada do erro quadrático médio (EQM) entre os dados previstos e os dados observados, resultando em equações capazes de serem utilizadas em simulações dinâmicas em CFD (melhor descritas no item 4.5).

Por fim, o *solver* também foi utilizado no ajuste e busca de correlações entre variáveis ambientais externas (temperatura, velocidade do vento) e fenômenos que ocorrem nas lagoas, tais como estratificação térmica e mistura vertical.

Em casos de comparação entre conjunto de dados, as etapas de análise e interpretação tiveram por suporte a estatística descritiva e os testes estatísticos de hipóteses. Dados brutos foram tratados por meio da estatística descritiva e também testados estatisticamente quanto à normalidade, antes da definição dos testes de hipóteses a serem aplicados. Tais testes foram então utilizados para comparação entre grupos amostrais de diferentes períodos (exemplo: estações do ano) ou cenários (exemplo: determinada condição operacional). Em dados com distribuição normal foi aplicado o teste *t* de *Student* para amostras independentes, para avaliar se havia diferenças significativas entre os valores médios nos dois períodos/cenários analisados (dois grupos independentes). Da mesma maneira, para a comparação entre as medianas utilizou-se o teste *U* de *Mann-Whitney*, nos pares de dados com distribuição assimétrica. Quando aplicáveis, testes de correlação de Spearman (para os dados não paramétricos) e correlação de Pearson e análise de regressão linear simples (para dados paramétricos) foram também realizados, na busca de informações que pudessem auxiliar na interpretação dos resultados. Foram utilizados os *softwares* Statistica 8.0<sup>®</sup> e Microsoft Excel 2010<sup>®</sup> para realização das análises estatísticas.

#### **4.5 Modelagem em CFD**

As etapas metodológicas da modelagem em CFD estão resumidamente apresentadas na TAB. 4.9. Basicamente, envolvem a construção de uma geometria tridimensional que represente as unidades de tratamento, o desenvolvimento de uma malha de cálculo em volumes finitos, definição de condições de contorno, modelos de cálculos, equações governantes do escoamento, equações de interesse e critérios de processamento. Os itens seguintes descrevem com mais detalhes essas etapas.

**TABELA 4.9** - Resumo das etapas da modelagem em CFD das unidades de tratamento no CePTS UFMG/COPASA.

<b>ETAPAS</b>	<b>DESCRIÇÃO</b>
Instalação dos programas: Ansys Workbench, Rhinoceros, AutoCAD Civil 3D	Definir programas ou verificar outras possibilidades
Teste dos programas e solução de eventuais erros de instalação	
Verificação da geometria das unidades de tratamento em campo e no projeto executivo, definir dados de entrada (input)	Comprimento, largura, profundidade, taludes, material das paredes, dimensões e localização da entrada de esgoto, dimensões e localização da saída do esgoto, condições de contorno, orientação geográfica, acumulação de lodo
Construção da geometria no computador	Desenho em 3D dessa geometria, com todos os elementos
Construção da malha	Geração de uma malha de cálculo genérica
Simulação prévia	Verificação de erros grosseiros de simulação
Teste de malhas	Definição de métodos e técnicas de geração de malha e grau de refinamento.
Definição da malha	A mais indicada para o tipo de problema e a que melhor atende o par “bom resultado <i>versus</i> convergência”
Simulação hidrodinâmica	Definições de turbulência, propriedades do fluido, condições de contorno, definição das equações governantes e implementação de equações de interesse, métodos de cálculo.
Calibração e validação do modelo hidráulico	Comparação e ajuste entre os dados numéricos e gráficos obtidos na simulação e os resultados obtidos com ensaios de campo (corantes e <i>drogues</i> lançados nas duas lagoas, perfil vertical e ensaios com traçadores).
Obtenção de parâmetros hidrodinâmicos	A partir de ensaios com traçadores simulados nos modelos em CFD

A modelagem numérica em CFD foi realizada em plataforma Ansys Workbench 15.0®. O pacote inclui um *software* gerador e gerenciador de malha e um módulo de pré-processamento, processamento e pós-processamento (CFX 15.0®). Para a construção das geometrias, foram utilizados os softwares Rhinoceros 3D® v. 4.0 (Rhino, Inc) e AutoCad Civil 3D® 2015.

#### **4.5.1 Geometrias**

A geometria tridimensional de cada unidade de tratamento foi construída de acordo com as informações de projeto e medições de campo, apresentados nas figuras e nas tabelas do item 4.1.

Para ser processada nas etapas posteriores, a geometria deve ser exportada como um ‘sólido’ em um arquivo de saída. Durante a pesquisa de Passos (2012), todos os 26 formatos possíveis foram testados, sendo que os formatos que geram um sólido válido para simulação foram *parasolid(.x\_t)* e *IGES(.igs, .iges)* (*initial graphics exchange specification*). As duas extensões foram utilizadas; entretanto, o arquivo IGES apresentou menores problemas quanto a compatibilidade de arquivos. Portanto, todos os arquivos de geometria foram exportados no formato IGES para processamento na etapa posterior (importação dos arquivos no Workbench®, para geração e edição da malha).

A geometria deve representar o domínio da simulação; portanto, considerou-se somente o volume ocupado pelo esgoto, com a profundidade atual de operação de cada unidade de tratamento. Para tal,

- os volumes geométricos representados pelos dispositivos de entrada e saída foram subtraídos dos domínios da simulação em cada unidade, mantendo-se a configuração, dimensões e posicionamento dos mesmos;
- na lagoa 1, a geometria representada pelo lodo foi subtraída da geometria da lagoa;
- na lagoa 2 (que não contém lodo de fundo), fase 2, a geometria representada pelas chicanas e pelos baldes nas curvas foi excluída do domínio da simulação, de acordo com as dimensões das mesmas.

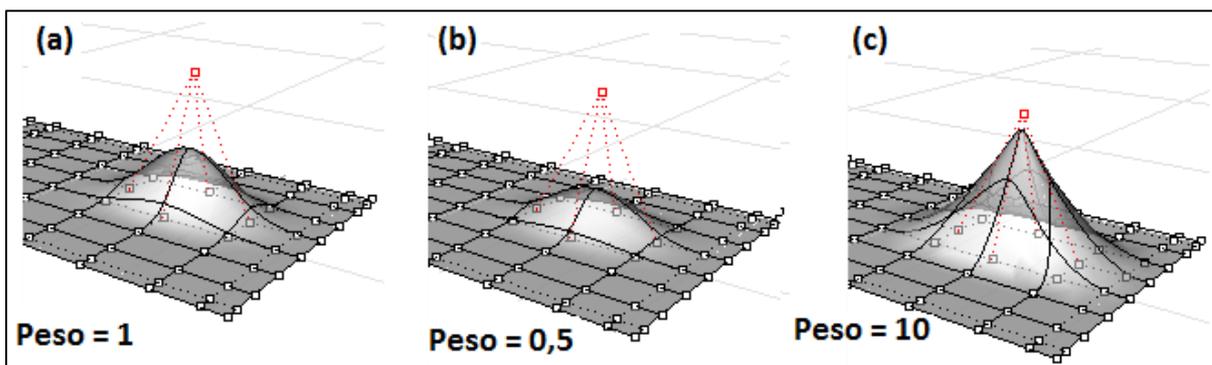
Na maioria dos trabalhos encontrados como parte da revisão de literatura a respeito de modelagem de lagoas em CFD, o lodo não é mencionado ou não foi considerado nas simulações. Naqueles em que o lodo foi considerado, não há menção a respeito do método utilizado para exclusão ou subtração da geometria do lodo do volume total da lagoa para os modelos tridimensionais, nem imagens da geometria após essa etapa (ex.: ALVARADO *et al.*, 2012a).

De fato, há uma dificuldade muito grande na consideração da geometria do lodo, geralmente caracterizada como bastante irregular. O principal motivo é que, a partir da batimetria da lagoa, deve-se gerar um sólido geométrico em formato de entrada compatível com os módulos de simulação em CFD, sendo que tal sólido deve ser perfeitamente integrado com a geometria da lagoa, de modo a permitir ser subtraído dessa geometria (restando apenas o volume líquido

na lagoa – domínio da simulação) sem que haja perda de continuidade do sólido resultante (não haja “furos” na geometria) e que sejam preservadas as interfaces. Essa dificuldade foi encontrada durante a pesquisa de Passos (2012) e de Alvarado (2013), inviabilizando a consideração do lodo nos trabalhos do primeiro (lagoa facultativa em escala real). Esse último relatou não ter conseguido solução para o problema e, por isso, considerou nos seus trabalhos uma geometria aproximada do lodo, desenhada “à mão” por meio da composição de figuras geométricas mais simples, ao invés da batimetria real. Segundo o mesmo autor, apesar da tentativa de maior precisão possível, em alguns locais a geometria era composta de grandes elementos geométricos (ALVARADO, comunicação pessoal em outubro de 2013).

Após diversas tentativas, obteve-se êxito na presente pesquisa, permitindo a consideração do levantamento batimétrico do lodo acumulado na lagoa 1 como fundo da geometria do líquido na lagoa. Para tal, criou-se um sistema de coordenadas comum, tanto para os pontos do levantamento batimétrico em campo (obtidos de Possmoser-Nascimento *et al.*, 2013 e Possmoser-Nascimento *et al.*, 2014) quanto para a geometria em 3D. Logo após, a relação de pontos com coordenadas da batimetria foi exportada para o *software* Rhinoceros 3D® e então uma malha de superfície foi criada, integrando todos os pontos.

A superfície do lodo, ou fundo da lagoa 1, foi criada a partir de funções NURBS (*Non Uniform Rational Basis Spline*) (PIEGL e TILLER, 1997) e da definição de pontos de controle, que influenciam na orientação dos planos formados pela junção dos pontos. Por meio desse método foi possível suavizar regiões de mudança de declividade de forma a evitar quinas, que são prejudiciais à simulação numérica. No Rhinoceros® é possível definir pesos para os pontos de controle, de forma que o peso de um ponto de controle determina o quanto a superfície é atraída para o mesmo; quanto maior for o valor do peso de um ponto, mais perto a superfície fica dele. A FIG. 4.33 apresenta um exemplo ilustrativo para os casos de pesos iguais a 0,5; 1 e 10 (RHINOCEROS, 2011).



**FIGURA 4.33:** Exemplos ilustrativos da influência dos pesos dos pontos de controle na formação da superfície na modelagem com funções NURBS com **(a)** peso = 1; **(b)** peso = 0,5 e **(c)** peso = 10. (Adaptado de RHINOCEROS, 2011).

Em casos de modelagem com malha de pontos oriunda de arquivo externo, recomenda-se adotar o peso como sendo igual a 1 (RHINOCEROS, 2011). Seguiu-se tal recomendação para construção da superfície do lodo na lagoa.

Definida a conformação topográfica do fundo da lagoa, criaram-se quatro pontos cujas coordenadas equivaliam aos quatro pontos que definem a superfície da lagoa e a partir daí mais cinco superfícies puderam ser criadas para formação do sólido que será o domínio da simulação (volume do líquido na lagoa 1).

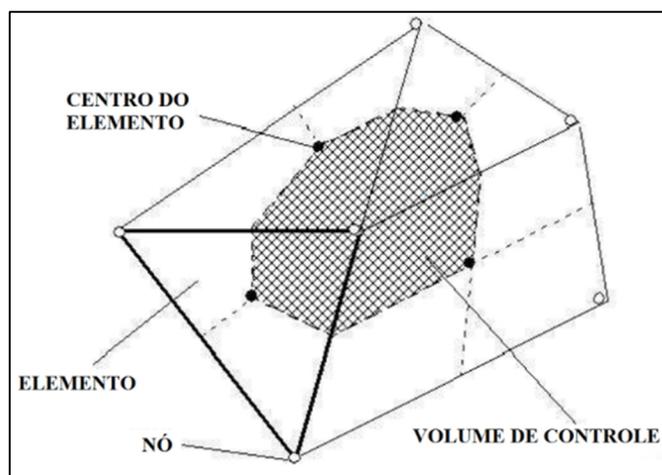
Para fins de comparação de resultados e inferências sobre a real necessidade de se considerar a conformação exata do lodo, fornecida pelo levantamento batimétrico, criou-se também uma geometria para a lagoa 1 baseada em formas geométricas grosseiras para o lodo acumulado (lodo “geométrico”), de forma que representasse a batimetria realizada e que resultassem em igual volume aferido para o lodo no levantamento batimétrico.

Portanto, foram criadas as seguintes geometrias, podendo ser doravante referenciadas como tal:

- Lagoa 1 (lodo geométrico)
- Lagoa 1 (lodo batimétrico)
- Lagoa 2 (sem lodo, sem chicanas)
- Lagoa 2 (sem lodo, com chicanas longitudinais)

## 4.5.2 Malhas

O método de discretização numérica utilizado no Ansys® é o método dos volumes finitos. As malhas geradas nos modelos deste trabalho foram tridimensionais, mas, para simplificar e facilitar o entendimento do processo de formação, apresenta-se na FIG. 4.34 uma ilustração de uma típica malha bidimensional.



**Figura 4.34** - Superfície do volume finito (Adaptado de ANSYS, 2013).

O volume de controle corresponde à parcela sombreada na FIG. 4.34, e é construído ao redor de cada nó por meio da união entre os pontos medianos de cada aresta do elemento de malha e os pontos correspondentes aos centros do elemento. Para uma malha 3D, o mesmo raciocínio se aplica, mas com a noção de que se trata de volumes formados ao redor de cada nó, e não superfícies bidimensionais.

O conjunto de equações necessárias para a solução do problema CFD é associado a cada um desses elementos, com as fronteiras operando como condição de contorno para os elementos próximos. Essas equações são integradas em cada volume de controle e o teorema de divergência de Gauss é aplicado para converter as integrais volumétricas envolvendo gradientes e divergentes em integrais de superfície.

O resultado da simulação é obtido através da solução associada de cada um desses elementos e a qualidade do resultado do cálculo depende diretamente da qualidade da malha.

Não há critérios gerais para avaliar a qualidade de uma malha para um dado problema. No presente estudo fez-se um estudo de independência em cada cenário, realizando simulações

nas mesmas condições físicas e de contorno em malhas progressivamente mais refinadas até que foi obtida uma malha na qual um maior refinamento não alterou significativamente os resultados da simulação.

Para definição do tipo de malha a ser utilizada, foram ponderados os seguintes critérios:

- Uma malha estruturada apresenta a vantagem de permitir uma razão de aspecto (dimensões desiguais) grande nos elementos sem provocar erros numéricos. Malhas estruturadas não são versáteis, não se ajustando bem a geometrias complexas; este tipo de malha não lida bem com deformação dos elementos, não sendo recomendáveis ângulos muito diferentes de noventa graus entre as arestas do elemento.

- Uma malha não-estruturada, por outro lado, é muito versátil e adaptável, podendo ser usada em geometrias complexas sem maiores problemas. No entanto, apresenta problemas de ordenação já que o número de elementos vizinhos para cada elemento pode ser diferente. Além disso, estas malhas não permitem grandes razões de aspecto devido aos erros numéricos que surgem.

Neste trabalho foram utilizadas malhas não-estruturadas para as simulações, visto que as geometrias das unidades de tratamento impõem condições de taludes inclinados, gerando arestas com ângulos variados; geometria irregular do lodo; presença de dispositivos de entrada e saída; chicanas; e outros detalhes que exigem tratamento diferenciado da malha para diferentes regiões. Considerou-se que os possíveis erros numéricos advindos das grandes razões de aspectos seriam minimizados, devido às dimensões das unidades de tratamento.

Portanto, foi gerada uma malha não-estruturada superficial de elementos triangulares sobre a geometria de cada unidade de tratamento, através do método de triangulação de *Delaunay*, que acontece em duas etapas. Na primeira etapa, pontos são posicionados em toda a fronteira do domínio. Na segunda etapa, a triangulação de um conjunto de pontos é definida pela condição de círculo vazio, a qual determina que um triângulo é válido quando a circunferência que o circunscreve não inclui outro ponto do conjunto (vértices). A triangulação de *Delaunay* maximiza os ângulos mínimos para todos os elementos triangulares superficiais gerados, o que é um pré-requisito para uma boa qualidade de elementos de malha. Após a geração da malha superficial, procedeu-se a construção da malha volumétrica

O método de geração de malha volumétrica não-estruturada foi o AFMV (*Advancing Front Volume Mesher*), padrão do CFX, que permite a geração de elementos volumétricos tetraédricos e piramidais avançando por camadas, partindo da malha superficial, até preencher todo o domínio com elementos. Segundo Liseikin (1999), o AFVM oferece a vantagem de proporcionar um posicionamento dos pontos de alta qualidade e integridade das fronteiras.

No processo de geração da malha, as regiões próximas aos dispositivos de entrada e saída nas unidades, próximas a curvas, e as regiões de mudança de direção do fluxo (ex: chicanas) sofreram maior refinamento, de forma a melhor captar os fenômenos hidrodinâmicos que ocorrem nos sistemas. Portanto, a malha apresentou-se mais densa nessas regiões. Como os sistemas apresentam menores profundidades em relação às outras dimensões, buscou-se gerar uma malha suficientemente refinada ao ponto de garantir múltiplas camadas ao longo da profundidade, possibilitando análise mais apurada do movimento vertical (útil, por exemplo, nos modelos com gradientes térmicos e turbulências causadas pelo vento).

Os arquivos das malhas volumétricas, exportados no formato *GTM file*, foram utilizados no módulo de pré-processamento do CFX® para definição de todas as variáveis, equações e condições de contorno do problema.

### **4.5.3 Domínio e condições de contorno**

#### **4.5.3.1 Domínios de simulação**

Para todo o domínio e como cenário básico das simulações, foram primeiramente definidas as propriedades do fluido como sendo as mesmas da água (TAB. 4.10). A aproximação das propriedades do fluido às da água é geralmente assumida devido à ausência de dados experimentais e registros na literatura. Exceto no trabalho de Karteris *et al.* (2005) em uma lagoa anaeróbia, todos os outros trabalhos acessados como parte da presente pesquisa, referente à utilização de CFD em lagoas de estabilização, os autores utilizaram a água como fluido ou não fizeram menção a respeito. Se considerado que o esgoto doméstico é composto por aproximadamente 99,9% de água (VON SPERLING e CHERNICHARO, 2005), é possível assumir grande similaridade entre os dois fluidos quanto às propriedades de escoamento, o que levaria à conclusão de que pelo menos o fluido de entrada em lagoas primárias (esgoto após tratamento preliminar) apresentaria comportamento bastante similar ao caso em que fosse água o fluido a escoar na unidade. Entretanto, logo após sua chegada, o fluido que se move na lagoa sofre transformações e passa a apresentar características

consideravelmente diferentes da água ou do esgoto bruto, principalmente no que diz respeito aos sólidos suspensos; o que pode afetar também as características de escoamento. Apesar de tal assertiva, Wood *et al.* (1998) e Alvarado *et al.* (2011) relataram que as concentrações de sólidos suspensos comumente encontradas em lagoas ( $\leq 100$  mg/l, citado por Wood *et al.*) não afetam significativamente as propriedades do fluido definidas para simulação. As concentrações observadas no presente trabalho se situam abaixo desse limite (item 5.1.1).

**TABELA 4.10** - Propriedades do fluido definidas para as simulações em CFD – abordagem de aproximação à água.

	<b>Unidade</b>	<b>Valor</b>
Massa específica	kg/m <sup>3</sup>	997
Massa molar	g/mol	18,02
Viscosidade dinâmica	kg/m.s	$8,899 \times 10^{-4}$
Condutividade térmica	W/m.K	0,6069
Capacidade calorífica específica	J/Kg.K	4181,7
Temperatura	K	Variável

Simulações foram também realizadas utilizando-se as propriedades de densidade e capacidade calorífica atribuídas ao esgoto por Stafford *et al.* (1981) e de condutividade térmica e viscosidade dinâmica em lagoas de aquacultura por Peterson *et al.* (2000), bem como os registrados em Karteris *et al.* (2005). Os valores estão apresentados na TAB. 4.11.

**TABELA 4.11** - Propriedades do fluido definidas para as simulações em CFD — abordagem de aproximação às características de águas residuárias e lagoas, de acordo com Stafford *et al.* (1981) e Peterson *et al.* (2000)

	<b>Unidade</b>	<b>Valor</b>
Massa específica	kg/m <sup>3</sup>	1020
Viscosidade dinâmica	kg/m.s	$14 \times 10^{-4}$
Condutividade térmica	W/m.K	0,35
Capacidade calorífica específica	J/Kg.K	4094

Ademais, cenários foram também simulados com variações de algumas dessas propriedades na etapa de calibração do modelo, na tentativa de aproximar ainda mais às características do fluido nas lagoas, principalmente em relação às propriedades térmicas, que afetam o regime de estratificação e desestratificação vertical nas lagoas.

#### 4.5.3.2 Condições de contorno

Foi utilizada a condição de contorno de entrada para os **locais de aporte do fluido nas unidades** (entrada única nas lagoas). A partir daí foram definidos a magnitude, direção e sentido do fluido que entra no domínio, além de informações sobre as condições de turbulência e perturbações presentes no escoamento.

Existem diferentes maneiras de se definir a condição de entrada. É possível definir valores para o fluxo mássico, para a velocidade ou para a pressão como condição de entrada. Quando definido como condição de entrada, o fluxo mássico ( $\dot{m}$ , em M/T) correspondeu ao produto da vazão ( $Q$ , em L<sup>3</sup>/T) pela massa específica do fluido ( $\rho$ , em M/L<sup>3</sup>) (Equação 4.15).

$$\dot{m} = Q \cdot \rho \quad (4.15)$$

Já a velocidade em cada entrada, quando definida como condição de contorno, foi determinada por meio da Equação 4.16 abaixo, em coordenadas cartesianas:

$$U = u_i + v_j + w_k \quad (4.16)$$

A equação acima foi utilizada de forma que resultasse em um vetor velocidade normal à condição de contorno, com intensidade definida como (Equação 4.17):

$$U = \frac{Q}{A} \quad (4.17)$$

onde  $Q$  é a vazão de entrada e  $A$  é a área da seção transversal de escoamento na saída da tubulação (L<sup>2</sup>).

Nos modelos térmicos, a temperatura na entrada foi definida como uma média do esgoto afluente. A partir de tal, o fluxo de calor proporcionado pela entrada foi definido como a soma do fluxo de calor advectivo ( $Q_{adv}$ ) e do fluxo difusivo ( $Q_{dif}$ ) (Equação 4.18):

$$Q_{ent} = Q_{adv} + Q_{dif} \quad (4.18)$$

O fluxo de energia na entrada devido à difusão foi considerado irrisório comparado à advecção e, portanto, foi zerado. Já o fluxo de energia devido à advecção foi calculado considerando o fluxo mássico  $\dot{m}$  (M/T), por (Equação 4.19):

$$Q_{adv} = \dot{m} \cdot h_{tot} \quad (4.19)$$

na qual é a entalpia total  $h_{tot}$  (M<sup>2</sup>/T<sup>2</sup>) foi computada a partir da entalpia específica estática ( $h_{est}$ ) e da velocidade de entrada (Equação 4.20):

$$h_{tot} = h_{est} + \frac{1}{2} U^2 \quad (4.20)$$

Nessa equação, a entalpia estática é calculada usando a temperatura na entrada, os valores de contorno de velocidade e pressão ( $p$ ) e a relação termodinâmica para  $h=h(p,T)$  para a água (comentada posteriormente).

Nos modelos com testes de traçadores virtuais, a injeção do traçador foi considerada como termo fonte de uma variável pré-definida que representou o traçador (denominada *tracer*). Este termo será matematicamente descrito na apresentação do modelo de injeção de traçador.

Para a turbulência, foi adotado o valor típico de 5%, supondo que o escoamento entra no domínio medianamente perturbado. Tal valor é recomendado quando não se tem dados experimentais, nem informações a respeito da turbulência na entrada (ANSYS, 2013).

Para os **dispositivos de saída** das unidades de tratamento, foi utilizada a condição de abertura, onde se ajusta a pressão relativa (ajustada como nula), condições de turbulência e demais variáveis do modelo. A condição de contorno de saída também foi testada, definindo-se um fluxo mássico de saída ou intensidade, direção e sentido para o vetor velocidade, mas esta última é mais recomendada quando se conhece com exatidão a direção dos vetores de velocidade. Nos modelos incluindo balanço térmico, um valor para a temperatura para a condição de contorno foi definido como um valor médio para o efluente.

A condição de contorno de parede define fronteiras onde ocorrem interações do escoamento com superfícies sólidas. Esta condição pode ser definida como sem escorregamento -

velocidade tangencial igual à zero na interface sólido/fluido - ou com escorregamento - sem restrição à velocidade tangencial na interface.

Para as **paredes dos taludes** das unidades foi definida condição de não deslizamento, com velocidade tangencial igual a zero na interface e condições de rugosidade suave, já que o material que compõe os taludes apresenta tal característica (manta de PEAD – Polietileno de Alta Densidade). Portanto, para as condições de parede sem deslizamento nos taludes das unidades de tratamento, a condição de contorno para a velocidade se torna (Equação 4.21):

$$U_w = 0 \quad (4.21)$$

Para a **superfície** das unidades, foram testadas as condições de abertura e de parede, esta última com deslizamento (representando uma superfície sem atrito e que não oferece resistência ao escoamento), e também sem deslizamento (já comentada acima). Na condição de parede com deslizamento, a componente da velocidade paralela à parede passa a ter um valor finito (que é computado), mas a velocidade normal à parede e a tensão de cisalhamento são nulas. Respectivamente (Equações 4.22 e 4.23):

$$U_{n,w} = 0 \quad (4.22)$$

$$\tau_w = 0 \quad (4.23)$$

Na condição de parede sem deslizamento, é possível a adição de tensões de cisalhamento em qualquer direção com intensidade definida, situação que não ocorre com a condição de abertura ou de parede com deslizamento. Portanto, de forma a contemplar a influência do vento no escoamento, foi escolhida esta condição de contorno para esses casos. Assim, foram inseridos, na superfície, os modelos de tensão de cisalhamento representativos da atuação do vento na área das lagoas, considerando as direções e velocidades registradas na estação meteorológica, inclusive de forma dinâmica.

A transferência de calor para as condições de parede (seja com ou sem deslizamento) foi definida em alguns modelos como uma temperatura específica (fixa ou variável); como condição adiabática (sem transferência de calor  $q_w$ , conforme Equação 4.24, incluindo eventuais fluxos devido à radiação); como condição especificada de fluxo de calor ( $q_{espec}$ , na

Equação 4.25) ou a partir da definição de um coeficiente de transferência de calor ( $h_c$ ), condição para a qual o fluxo de calor  $q_w$  foi calculado conforme Equação 4.26.

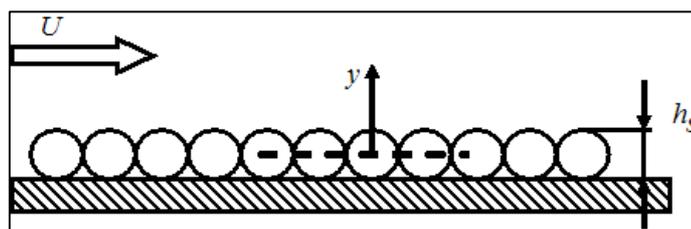
$$q_w = 0 \quad (4.24)$$

$$q_w = q_{espec} \quad (4.25)$$

$$q_w = h_c \cdot (T_e - T_i) \quad (4.26)$$

Nesta última,  $T_e$  é a temperatura externa ao domínio (no caso, a temperatura do ar registrada pela estação meteorológica) e  $T_i$  é a temperatura interna, calculada a partir do balanço de energia. O coeficiente de transferência de calor também foi definido em alguns cenários como função da velocidade do vento no local.

Para o **fundo da lagoa 1 (superfície do lodo)**, utilizou-se também a condição de contorno de parede, sem deslizamento. Foram realizadas simulações com diferentes valores de rugosidade, bem como uma análise de sensibilidade do modelo quanto a essa variável. A rugosidade no CFX é computada em termos do diâmetro do grão de areia equivalente (SCHLICHTING, 1936; SCHLICHTING e GERSTEN, 2003). Em poucas palavras, tal concepção considera para a superfície rugosa uma parede com uma camada de esferas estreitamente empacotadas de rugosidade média correspondente a uma altura  $h_s$  (FIG. 4.35).



**Figura 4.35** – Rugosidade da superfície de acordo com a teoria do diâmetro médio do grão de areia equivalente (Adaptado de ANSYS, 2013).

Não foram encontrados trabalhos de lagoas com detalhes da rugosidade do lodo. Muito menos há na literatura referências que associassem a rugosidade do lodo de fundo de lagoas com o diâmetro do grão de areia equivalente. Em um dos raros estudos onde este tema é mencionado, Vega *et al.*, (2003) realizaram modelagem em CFD em que apresentam a

rugosidade do lodo como parâmetro de calibração do modelo. Os valores de rugosidade mencionados pelos autores como responsáveis por uma boa estabilidade numérica estiveram situados na faixa de 16 –48 m<sup>1/3</sup>/s, em termos do coeficiente de rugosidade de Manning-Strickler ( $k_{ms}$ ). No trabalho de Coggins *et al.* (2017) a rugosidade também foi utilizada como parâmetro de calibração do modelo. O valor da rugosidade de Manning de 0.01 s m<sup>-1/3</sup> (1/ $k_{ms}$ ) foi determinado por Coggins et al. como sendo o melhor ajuste para lagoas. Após simulações com diferentes valores de rugosidade, bem como uma análise de sensibilidade do modelo quanto a essa variável, foi adotado como representativo da rugosidade de fundo das lagoas.

Por sua vez, o coeficiente de Manning-Strickler é definido pelo inverso do coeficiente de Manning ( $\eta$ ); este mais comumente utilizado na engenharia hidráulica. Portanto (Equação 4.27):

$$\eta = \frac{1}{k_{ms}} \quad (4.27)$$

O intervalo mencionado por Vega e colaboradores (2003) corresponde a uma faixa de  $\eta$  de 0,02 a 0,06; o que compreende aproximadamente os valores recomendados para aplicação em canais não revestidos e cursos naturais (CHOW, 1959).

Há na literatura diversas equações semelhantes que associam o coeficiente  $k_{ms}$  com o tamanho médio das partículas que compõem o leito de canais naturais. As equações, derivadas da expressão de Strickler, são do tipo  $k_{ms} = c.(d_p^{1/6})$ , em que  $d_p$  é o diâmetro característico das partículas (m) e  $c$  é uma constante que varia de um estudo para outro e de acordo com as condições de obtenção dos dados que deram origem à expressão. Marriott e Jayaratne (2010) realizaram uma revisão dessas expressões e um estudo da relação entre  $d_p$  e  $k_{ms}$ . Tendo em vista a gama de valores citados e estudados, os autores sugeriram que uma relação aproximada geral apropriada para relacionar o  $\eta$  de Manning com diâmetro típico do sedimento seria (Equação 4.28):

$$\eta \approx 0,04 d_p^{1/6} \quad (4.28)$$

Esta foi a analogia encontrada a fim de se obter o diâmetro médio das partículas do fundo equivalente a determinada rugosidade definida para o fundo da lagoa. Dessa forma, é possível

uma associação ao coeficiente de manning, já que para este último podem ser encontradas semelhanças com outros sistemas hidráulicos, tais como canais e cursos naturais e suas composições do leito.

Independentemente dos valores atribuídos inicialmente com base nesta analogia e na literatura, uma melhor aproximação para a rugosidade foi buscada por meio de testes de sensibilidade, calibração e validação dos modelos da lagoa com lodo (L1).

#### 4.5.4 Modelos de transporte (equações governantes)

A modelagem em CFD tem por base principal as equações governantes da dinâmica dos fluidos. Tais equações representam as definições das leis de conservação da física. Como todos os escoamentos obedecem às leis de conservação de massa, quantidade de movimento linear e de energia, é possível descrevê-los a partir dessas equações. Fenômenos adicionais, tais como empuxo, tensões de cisalhamento e turbulência, injeção virtual de traçador, foram considerados nos modelos a partir dessas equações.

##### 4.5.4.1 Equação da continuidade

Considerando a aplicação do balanço de massa em cada volume de controle, têm-se que a taxa de variação da massa equivale ao fluxo mássico líquido que cruza a superfície ( $S$ ) do volume ( $V$ ). No termo de fluxo, a variável  $U$  foi considerada como representativa da velocidade. Matematicamente, tem-se tal balanço na forma integral como (Equação 4.29):

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho dV = - \int_S \rho U \cdot \eta dS \quad (4.29)$$

Na qual  $\eta$  é o vetor unitário normal à superfície,  $\rho$  a massa específica do fluido,

Considerando o teorema de divergência de Gauss, que exprime uma relação entre uma integral de superfície e uma integral de volume sobre a região limitada pela superfície, tem-se que a integral volumétrica do divergente do vetor velocidade é equivalente a integral desse vetor ao longo da superfície que define o volume. Matematicamente (Equação 4.30):

$$\int_V \text{div} \rho U dV = - \int_S \rho U \cdot \eta dS \quad (4.30)$$

De forma que os termos do lado direito das Equações 4.29 e 4.30 são iguais e a equação pode ser escrita como (Equação 4.31):

$$\int_V \left[ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) \right] dV = 0 \quad (4.31)$$

Nessa equação foi utilizada a notação  $\nabla \cdot (\rho U) \equiv \text{div } \rho U$ .

Na medida em que a Equação 4.31 é válida para qualquer elemento de malha, de qualquer volume  $V$ , então temos a Equação 4.32:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (4.32)$$

que é a equação de conservação de massa.

No sistema de coordenadas cartesiano,  $U$  pode ser decomposto em termos de componente da velocidade na direção  $x$  (representado por  $u$ ),  $y$  (representado por  $v$ ) e  $z$  (representado por  $w$ ) (Equação 4.33):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w) = 0 \quad (4.33)$$

Na qual:

$\rho$  = massa específica do fluido ( $\text{ML}^{-3}$ );  
 $u$  = componente  $x$  ( $u$ ) do vetor velocidade  $U$  ( $\text{LT}^{-1}$ );  
 $v$  = componente  $y$  ( $v$ ) do vetor velocidade  $U$  ( $\text{LT}^{-1}$ );  
 $w$  = componente  $z$  ( $w$ ) do vetor velocidade  $U$  ( $\text{LT}^{-1}$ );  
 $t$  = tempo ( $\text{T}$ );

Para os casos de escoamento incompressível ( $\rho$  constante), tem-se para o modelo convectivo/difusivo tridimensional transiente, a Equação 4.34 de conservação da massa:

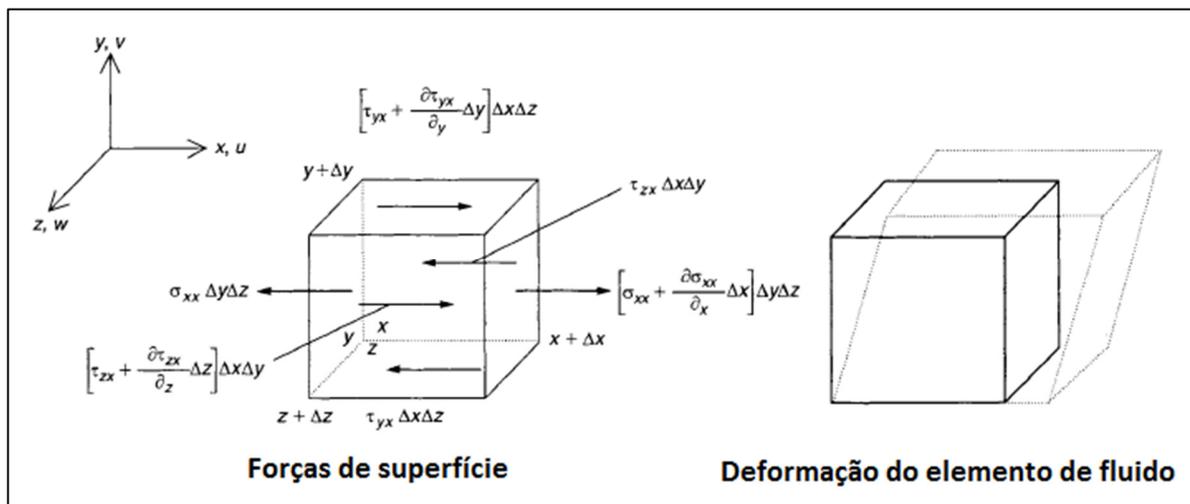
$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4.34)$$

#### 4.5.4.2 Equações de quantidade de movimento

Considera-se a lei de conservação da quantidade de movimento nos modelos em CFD a partir da segunda lei de Newton do movimento. Considerando apenas a componente  $x$  desse balanço para um elemento de fluido infinitesimal (FIG. 4.36), tem-se (Equação 4.35):

$$\sum F_x = m.a_x \quad (4.35)$$

Onde  $F_x$  e  $a_x$  são a força e a aceleração, respectivamente, do elemento de fluido de massa  $m$ .



**Figura 4.36** – Forças de superfície agindo sobre um volume de controle de fluido infinitesimal para a componente da velocidade  $u$  e ilustração da deformação do elemento de fluido (adaptado de Tu *et al.*, 2012).

A aceleração  $a_x$  no lado direito da Equação 4.35 pode ser escrita como sendo a taxa de variação da velocidade  $u$ , que é dada por uma derivada material  $Du/Dt$  (assim denominada por BATCHELOR, 2000 e BIRD *et al.*, 2006) (ou derivada *substantiva* ou *de Stokes* por GRANGER, 1995). Então (Equação 4.36):

$$\frac{Du}{Dt} = \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = a_x \quad (4.36)$$

Para o elemento de fluido infinitesimal ilustrado na FIG. 4.36, pode-se escrever a massa  $m$  como o produto do volume  $\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z$  pela massa específica  $\rho$ . Então, a taxa de variação da quantidade de movimento em  $x$  é:

$$\rho \cdot \frac{Du}{Dt} \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z \quad (4.37)$$

Existem duas fontes de força que podem agir no elemento de fluido. São as forças de campo (ou corpo) e as forças de superfície. As forças de campo que podem influenciar a quantidade de movimento do fluido são a gravitacional, a centrífuga, a de Coriolis e a eletromagnética (TU *et al.*, 2012). Nas simulações em CFD, esses efeitos podem ser modelados pela incorporação na equação de quantidade de movimento de termos fonte como contribuição às forças de superfície. Neste trabalho não foram considerados os efeitos das forças de Coriolis, centrífuga e eletromagnética.

As forças de superfície para a componente  $u$  da velocidade, que deformam o elemento de fluido na FIG. 4.36, são devido à tensão normal  $\sigma_{xx}$  e às tensões tangenciais  $\tau_{yx}$  e  $\tau_{zx}$  agindo sobre as superfícies desse elemento. Combinando a soma destas forças de superfície sobre o elemento de fluido (detalhes podem ser consultado em TU *et al.*, 2012 e VERSTEEG e MALALASEKERA, 2007) e taxa de variação temporal de  $u$  (a partir do termo 4.37) na Equação 4.36, a equação de quantidade de movimento em  $x$  torna-se (Equação 4.38):

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \sum F_x^{\text{forças de campo}} \quad (4.38)$$

Em raciocínio análogo, as equações em  $y$  e  $z$  podem ser definidas como (Equações 4.39 e 4.40):

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \sum F_y^{\text{forças de campo}} \quad (4.39)$$

e

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \sum F_z^{\text{forças de campo}} \quad (4.40)$$

As tensões normais  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$  e  $\sigma_{zz}$  nas Equações 4.38, 4.39 e 4.40 ocorrem devido à combinação entre a pressão  $p$  e as componentes das tensões viscosas normais  $\tau_{xx}$ ,  $\tau_{yy}$  e  $\tau_{zz}$  agindo em direção perpendicular ao volume de controle. Os termos restantes contêm as componentes das tensões viscosas tangenciais. Em muitos modelos de fluxo, expressões adequadas para as tensões viscosas são introduzidas. Essas são normalmente funções da taxa de deformação, que é expressa em termos dos gradientes de velocidade. A formulação matemática das relações tensão-deformação adequadas para um fluido newtoniano pode ser encontrada em Tu *et al.* (2012).

Para o caso de fluido incompressível, após invocação da equação da continuidade e desconsideração das forças de campo, as equações de quantidade de movimento com a inclusão das relações tensão-deformação podem ser reduzidas a (Equações 4.41 à 4.43):

$$\frac{Du}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + S_u \quad (4.41)$$

$$\frac{Dv}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} + S_v \quad (4.42)$$

$$\frac{Dw}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} + S_w \quad (4.43)$$

Ou, após expansão da derivada material e reconformação das equações para melhor visualização (Equações 4.44 à 4.46):

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial(uu)}{\partial x} + \frac{\partial(vu)}{\partial y} + \frac{\partial(wu)}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ (\nu + \nu_t) \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ (\nu + \nu_t) \frac{\partial u}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ (\nu + \nu_t) \frac{\partial u}{\partial z} \right] + S_u \quad (4.44)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial(uv)}{\partial x} + \frac{\partial(vv)}{\partial y} + \frac{\partial(wv)}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ (\nu + \nu_t) \frac{\partial v}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ (\nu + \nu_t) \frac{\partial v}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ (\nu + \nu_t) \frac{\partial v}{\partial z} \right] + S_v \quad (4.45)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial(uw)}{\partial x} + \frac{\partial(vw)}{\partial y} + \frac{\partial(ww)}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ (\nu + \nu_t) \frac{\partial w}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ (\nu + \nu_t) \frac{\partial w}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ (\nu + \nu_t) \frac{\partial w}{\partial z} \right] + S_w \quad (4.46)$$

Para as quais:

$p$  = pressão ( $ML^{-1}T^{-2}$ );

$\nu$  = viscosidade cinemática =  $\mu/\rho$  (viscosidade dinâmica dividido pela densidade) ( $L^2T^{-1}$ );

$\nu_t$  = viscosidade cinemática turbulenta =  $\mu_t/\rho$  (viscosidade turbulenta dividido pela densidade);

$S$  = termo fonte ( $ML^{-2}T^{-2}$ );

Para o caso de escoamento compressível, temos as Equações 4.47 à 4.49:

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v u)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w u)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ (\mu + \mu_t) \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ (\mu + \mu_t) \frac{\partial u}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ (\mu + \mu_t) \frac{\partial u}{\partial z} \right] + S_u \quad (4.47)$$

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u v)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w v)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ (\mu + \mu_t) \frac{\partial v}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ (\mu + \mu_t) \frac{\partial v}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ (\mu + \mu_t) \frac{\partial v}{\partial z} \right] + S_v \quad (4.48)$$

$$\frac{\partial \rho w}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u w)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v w)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w w)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ (\mu + \mu_t) \frac{\partial w}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ (\mu + \mu_t) \frac{\partial w}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ (\mu + \mu_t) \frac{\partial w}{\partial z} \right] + S_w \quad (4.49)$$

nas quais:

$\mu$  = viscosidade dinâmica ( $ML^{-1}T^{-1}$ )

$\mu_t$  = viscosidade turbulenta ( $ML^{-1}T^{-1}$ )

Nota-se nas equações acima a inclusão de termos relacionados aos modelos de turbulência (comentados posteriormente) e a inclusão de termos-fontes relacionados a gradientes de pressão e outras possíveis fontes ( $S$ ) que podem influenciar a movimentação do fluido, tais como a gravidade nos modelos com inclusão do empuxo (principalmente naqueles para verificação da estratificação térmica, onde a diferença de densidade gera força motriz para circulação vertical).

Em notação mais compacta, pode-se escrever as equações de quantidade de movimento como (Equação 4.50):

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \otimes U) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + S^M \quad (4.50)$$

onde o tensor de tensão  $\tau$  é relacionado à taxa de deformação por (Equação 4.51):

$$\tau = \mu \left( \nabla U + (\nabla U)^T - \frac{2}{3} \delta \nabla \cdot U \right) \quad (4.51)$$

Em que  $\delta$  é a matriz identidade (Delta de Kronecker). Na Equação 4.51 também se considera a notação de gradiente e divergente utilizada nas equações anteriores e para a qual o operador  $T$  define a transposta da matriz e o termo  $U \otimes U$  representa o produto tensorial dos vetores de velocidade  $U$ . Então o termo  $\nabla \cdot (\rho U \otimes U)$  representa, nessa notação tensorial (Equação 4.52):

$$\nabla \cdot (\rho U \otimes U) = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} (\rho U_x U_x) & \frac{\partial}{\partial y} (\rho U_x U_y) & \frac{\partial}{\partial z} (\rho U_x U_z) \\ \frac{\partial}{\partial x} (\rho U_y U_x) & \frac{\partial}{\partial y} (\rho U_y U_y) & \frac{\partial}{\partial z} (\rho U_y U_z) \\ \frac{\partial}{\partial x} (\rho U_z U_x) & \frac{\partial}{\partial y} (\rho U_z U_y) & \frac{\partial}{\partial z} (\rho U_z U_z) \end{bmatrix} \quad (4.52)$$

#### 4.5.4.3 Equação de energia

Utilizou-se nas simulações o modelo de energia total, de formulação matemática semelhante à das equações de quantidade de movimento. A equação da energia total, na sua forma mais geral, está apresentada em notação compacta da Equação 4.53:

$$\frac{\partial(\rho h_{tot})}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U h_{tot}) = \nabla \cdot (\xi \nabla T) + \nabla \cdot (U \cdot \tau) + S^E \quad (4.53)$$

Na qual  $h_{tot}$  é a entalpia total, a variável  $\xi$  é a condutividade térmica ( $MLT^{-3}\Theta^{-1}$ ), o termo  $\nabla \cdot (U \cdot \tau)$  representa o trabalho devido às tensões viscosas e  $S^E$  o termo fonte de energia ( $ML^{-1}T^{-3}$ ). O termo que representa o trabalho devido a fontes externas de quantidade de movimento não foi considerado nas simulações, já que pode ser negligenciado (ANSYS, 2013).

#### 4.5.4.4 Modelos de empuxo

Para cálculos envolvendo o empuxo ou flutuabilidade (importante nas simulações com modelos térmicos para avaliação da estratificação nas lagoas), um termo fonte é adicionado às equações de quantidade de movimento, tal como na Equação 4.54:

$$S^M_{empuxo} = (\rho - \rho_{ref}) \cdot g \quad (4.54)$$

Neste caso, a diferença de densidade  $\rho - \rho_{ref}$  é avaliada diretamente tanto com o uso do modelo de empuxo completo (quando a densidade é modelada como função de outra variável, como a temperatura) quanto com o uso do modelo de Boussinesq (utilizando densidade constante do fluido, mas aplicando uma força gravitacional local como sendo uma função linear da expansividade térmica e diferença local de temperatura - utilizado para pequenas variações de densidade). Simulações foram realizadas com os dois tipos.

Em alguns casos pode-se obter uma convergência mais rápida com o modelo de Boussinesq. Este modelo trata a densidade como um valor constante em todas as equações resolvidas, exceto para o termo de empuxo na equação do momento, que é aproximado pela Equação 4.55:

$$\rho - \rho_{ref} = -\rho_{ref} \cdot \beta \cdot (T - T_{ref}) \quad (4.55)$$

onde  $\beta$  representa a expansividade térmica (coeficiente de dilatação térmica, em  $\Theta^{-1}$ ) (Equação 4.56):

$$\beta = \frac{1}{\rho} \left. \frac{\partial \rho}{\partial T} \right|_p \quad (4.56)$$

e  $T_{ref}$  a temperatura de referência para o empuxo (valor médio aproximado da temperatura esperada para o domínio).

A importância de se considerar ou não as forças de empuxo devido às variações de temperatura em um fluxo convectivo foi inferida pelo cálculo do número adimensional de Richardson. Um valor de  $Ri$  próximo à unidade, ou superior, indica que os efeitos do empuxo

são significantes nas condições de fluxo em estudo. Por outro lado, se muito pequeno, as forças de empuxo podem ser ignoradas na simulação (ANSYS, 2013). Os elevados gradientes de temperatura, dimensões e as baixas velocidades do escoamento nas lagoas em estudo sugerem valores de número de Richardson consideravelmente superiores à unidade.

#### 4.5.4.5 Modelos de turbulência

Segundo Alvarado (2013), o modelo  $k-\varepsilon$  tem sido amplamente utilizado na modelagem de lagoas em CFD, tendo sido relatado nos trabalhos de Wood et al. (1998), Salter et al. (2000); Shilton (2000); Baléo et al. (2001); Shilton e Harrison (2003c); Sweeney et al. (2003); Vega et al. (2003); Shilton e Mara (2005); Aldana et al. (2005); Sweeney et al. (2005); Karteris et al. (2005); Abbas et al. (2006); Banda et al. (2006a); Banda et al. (2006b); Sweeney et al. (2007); Shilton et al. (2008); Abbassi et al. (2010); Herdianto et al. (2010); Olukanni e Ducoste (2011); Alvarado et al. (2011); Sah et al. (2011); Souza et al. (2012); Alvarado et al. (2012a), Alvarado et al. (2012b), Alvarado et al. (2013). Por outro lado, as características de dualidade do modelo SST parecem ser apropriadas para modelagem em lagoas, já que proporciona melhor captura dos fenômenos de parede (que podem ser importantes na análise do fluido próximo aos taludes, zonas estagnadas, influência do vento etc.). Passos et al. (2014a) utilizaram com sucesso este modelo. Tendo em vista o exposto, foram realizadas neste trabalho simulações com essas duas formulações de turbulência.

No **modelo  $k-\varepsilon$** , a variável  $k$  é a energia cinética turbulenta e é definida como a variação das flutuações da velocidade. Tem dimensões  $L^2T^{-2}$ . Já o  $\varepsilon$  representa a dissipação dessa energia turbulenta (a taxa na qual as flutuações de velocidade se dissipam), e tem dimensões  $L^2T^{-3}$ .

O modelo introduz duas novas variáveis no sistema de equações. A equação de continuidade é então escrita, em notação de índice, como (Equação 4.57):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j) = 0 \quad (4.57)$$

E a equação de quantidade de movimento se torna (Equação 4.58):

$$\frac{\partial \rho U_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_i U_j) = -\frac{\partial p'}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu_{ef} \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right] + S_M \quad (4.58)$$

Na qual  $S_M$  é a soma de forças de campo,  $\mu_{ef}$  é a viscosidade efetiva, representando a turbulência, e  $p'$  é a pressão modificada, dada pela Equação 4.59 (ANSYS, 2013):

$$p' = p + \frac{2}{3} \rho k + \frac{2}{3} \mu_{ef} \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \quad (4.59)$$

De forma que se leva em conta o conceito de viscosidade turbulenta, representado na Equação 4.60:

$$\mu_{ef} = \mu + \mu_t \quad (4.60)$$

onde  $\mu_t$  é a viscosidade turbulenta.

O modelo  $k-\varepsilon$  assume que a viscosidade turbulenta é associada à energia cinética turbulenta por meio da relação apresentada na Equação 4.61:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4.61)$$

Para a qual  $C_\mu$  é uma constante, adotada como sendo igual a 0,09 (ANSYS, 2013).

Os valores de  $k$  e  $\varepsilon$  vêm diretamente das equações diferenciais de transporte para a energia cinética turbulenta e taxa de dissipação de turbulência (Equações 4.62 e 4.63):

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho \varepsilon + P_{kb} \quad (4.62)$$

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon + C_{\varepsilon 1} P_{eb}) \quad (4.63)$$

nas quais  $C_{\varepsilon 1}$ ,  $C_{\varepsilon 2}$ ,  $\sigma_k$  e  $\sigma_\varepsilon$  são constantes cujos valores são, respectivamente, 1,44; 1,92; 1,0 e 1,3 (ANSYS, 2013).

$P_k$  é a produção de turbulência devido às forças viscosas, e foi modelado utilizando a seguinte expressão (Equação 4.64):

$$P_k = \mu_y \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \frac{2}{3} \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \left( 3\mu_t \frac{\partial U_k}{\partial x_k} + \rho k \right) \quad (4.64)$$

$P_{kb}$  e  $P_{eb}$  representam a influência de forças de empuxo, para os casos em que são modeladas também junto com a formulação de turbulência. Para esses casos, o termo  $P_{kb}$  considerado foi (Equação 4.65):

$$P_{kb} = - \frac{\mu_t}{\rho \sigma_\rho} g_i \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \quad (4.65)$$

utilizando-se o modelo completo de empuxo, ou (Equação 4.66):

$$P_{kb} = - \frac{\mu_t}{\rho \sigma_\rho} \rho \beta g_i \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (4.66)$$

utilizando-se o modelo de empuxo de Boussinesq.

Já  $P_{eb}$  é assumido sendo proporcional a  $P_{kb}$  e deve ser positivo, logo foi modelado a partir da Equação 4.67:

$$P_{eb} = C_3 \cdot \max(0, P_{kb}) \quad (4.67)$$

As constantes foram consideradas como (ANSYS, 2013):

- Número de Schmidt turbulento:  $\sigma_p = 0,9$  (para modelo de Boussinesq) e  $\sigma_p = 1,0$  (para modelo de empuxo completo).

- Coeficiente de dissipação:  $C_3 = 1$

Para o modelo de turbulência SST, no qual há termos envolvendo a frequência de turbilhões  $\omega$ , as equações correspondentes são derivadas dessas anteriores, utilizando a transformação  $\varepsilon = \beta' \omega k$ .

Após manipulação matemática, as equações finais do **modelo SST** para  $\bar{k}$  (energia cinética turbulenta) e  $\omega$  (frequência dos turbilhões,  $ML^2T^{-3}$ ) são (Equações 4.68 e 4.69):

$$\frac{\partial(\rho\bar{k})}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho\bar{u}_j\bar{k}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{k3}} \right) \frac{\partial\bar{k}}{\partial x_j} \right] + (P_k - \beta' \rho\bar{k}\omega) \quad (4.68)$$

$$\frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho\bar{u}_j\omega) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{k3}} \right) \frac{\partial\omega}{\partial x_j} \right] + (1-F) \frac{2\rho}{\sigma_{\omega 2}} \frac{\partial\bar{k}}{\partial x_j} \frac{\partial\omega}{\partial x_j} + \alpha_3 \frac{\omega}{\bar{k}} P_k - \beta_3 \rho\omega^2 \quad (4.69)$$

As constantes do modelo SST são uma combinação linear das constantes correspondentes aos modelos  $k-\varepsilon$  e  $k-\omega$ , obtidas através da relação apresentada na Equação 4.70:

$$\Phi_3 = F_1 \Phi_1 + (1 - F_1) \Phi_2 \quad (4.70)$$

Na qual  $\Phi_1$  representa as constantes do modelo  $k-\varepsilon$  e  $\Phi_2$  as do modelo  $k-\omega$ .

As funções de acoplamento são fundamentais para o sucesso do método. Sua formulação é baseada na distância entre o ponto analisado e a superfície mais próxima e nas variáveis do escoamento. A função acopladora  $F_1$  é dada por (Equação 4.71):

$$F_1 = \tanh \left\{ \left\{ \text{MÍNIMO} \left[ \text{MÁXIMO} \left( \frac{\sqrt{\bar{k}}}{\beta' \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right), \frac{4\rho\bar{k}}{CD_{k\omega} \sigma_{\omega 2} y^2} \right] \right\}^4 \right\} \quad (4.71)$$

onde  $CD_{k\omega}$  é dado pela Equação 4.72:

$$CD_{k\omega} = MÁXIMO \left( 2\rho \frac{1}{\sigma_{\omega 2} \omega} \frac{\partial \bar{k}}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 10^{-10} \right) \quad (4.72)$$

Na Equação 4.71,  $y$  é a distância do ponto avaliado para a parede mais próxima (superfície de não deslizamento) e  $\nu$  é a viscosidade cinemática do fluido.

No modelo SST, existe um limite superior para a tensão cisalhante turbulenta na camada limite. Isto evita níveis excessivos de tensão cisalhante, problema presente em outros modelos baseados na hipótese de viscosidade turbulenta. No modelo, a viscosidade turbulenta é definida como (Equação 4.73):

$$\mu_t = \rho \frac{a_1 \bar{k}}{MÁXIMO (a_1 \omega, SF_2)} \quad (4.73)$$

Onde  $a_1$  é uma constante com valor típico de 0,31 (ANSYS, 2013) e  $S$  é o tensor de tensões médias absoluto ( $ML^{-1}T^{-2}$ ), definido pelas Equações 4.74 e 4.75:

$$S = \sqrt{S_{ij} S_{ij}} \quad (4.74)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (4.75)$$

$F_2$  é a função que restringe as tensões cisalhantes turbulentas na camada limite, definida pela Equação 4.76:

$$F_2 = \tanh \left\{ \left[ MÁXIMO \left( \frac{2\sqrt{\bar{k}}}{\beta' \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right) \right]^2 \right\} \quad (4.76)$$

#### 4.5.5 Modelos de temperatura, radiação solar e perda de calor por evaporação (balanço térmico)

O modelo de energia para as simulações foi apresentado no item 4.5.4.3. A partir dele o balanço de transferência de calor por condução e convecção foi resolvido nas simulações. Este item destaca as expressões para as fontes de ganho e perda de calor nas lagoas, definidas como condições de contorno da superfície. Demais termos do balanço térmico, de menor peso neste estudo, foram desconsiderados.

Conforme já mencionado, a transferência de calor na superfície foi definida em alguns modelos como uma temperatura específica (fixa ou variável); como condição adiabática (Equação 4.24); como condição especificada de fluxo de calor (Equação 4.25) ou a partir da definição de um coeficiente de transferência de calor, condição para a qual o fluxo de calor foi calculado conforme Equação 4.26. Da mesma forma, essas condições de contorno foram definidas para os taludes das lagoas e para o lodo de fundo.

Devido ao seu comportamento naturalmente cíclico de variações diárias, oscilando em torno de um valor central, a temperatura para o ambiente externo ao domínio foi definida nos modelos dinâmicos com base em uma senóide ajustada estatisticamente aos dados discretos de temperatura do ar (obtidos a partir do monitoramento meteorológico local) (Equação 4.77):

$$T(^{\circ}C) = A.\text{sen}(kx - \omega t - \varphi) + D \quad (4.77)$$

onde:

$A$  = amplitude ( $^{\circ}C$ )  
 $k$  = número de onda (rad/m)  
 $\omega$  = frequência angular (rad/s)  
 $\varphi$  = mudança de fase (rad)  
 $D$  = deslocamento vertical ( $^{\circ}C$ )

Os valores das variáveis foram obtidos com base no conjunto de dados registrados na estação meteorológica do local e após utilização de método iterativo de ajuste estatístico entre a função e os dados de campo, utilizando a ferramenta *Solver* do Microsoft Excel®.

Já as quantidades de calor fornecidas pela radiação solar e as perdas devido a evaporação foram modeladas por meio da introdução de termos fonte na equação de energia (Equação 4.53).

No caso da radiação solar, o comportamento natural não é simétrico em relação a um valor central, já que durante o dia a intensidade de radiação segue um comportamento de formato aproximadamente parabólico seguido de um período sem nenhuma radiação incidente (à noite). Portanto trata-se, neste caso, de uma “meia onda” de radiação solar, que foi modelada neste trabalho a partir de uma combinação de senóides com uma função denominada *step* e a partir de uma série de Fourier.

A função *step* associada a uma variável de interesse “*a*” foi definida como (Equação 4.78):

$$step(a) = \begin{cases} 1, & a > 0 \\ 0, & a < 0 \\ 0,5 & a = 0 \end{cases} \quad (4.78)$$

A partir da introdução combinada da função *step*, buscou-se anular a senóide da radiação solar durante partes do tempo de simulação correspondentes aos períodos noturnos. A equação resultante utilizada está apresentada na Equação 4.79:

$$I = step[(sen(kx - \omega t)] \cdot A \cdot sen(kx - \omega t) \quad (4.79)$$

Na qual *I* é a intensidade de radiação solar (irradiação), em W/m<sup>2</sup>.

Com relação ao modelo com a série de Fourier, considerou-se a manipulação matemática de retificação de meia onda periódica, de forma que a seguinte expressão geral da série (Equação 4.80),

$$f(t) = \frac{1}{2} a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)] \quad (4.80)$$

passa a ser submetida à seguinte condição de saída (Equação 4.81):

$$f(t) = \begin{cases} \text{sen}(\omega t), & 0 < \omega t < \pi \\ 0, & \pi < \omega t < 2\pi \end{cases} \quad (4.81)$$

Sendo  $a_n$  (Equação 4.82) e  $b_n$  (Equação 4.83):

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \cos(nt) dt \quad (4.82)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \text{sen}(nt) dt \quad (4.83)$$

Considerando os valores assumido por  $f(t)$  nos intervalos definidos como condição de saída, e  $I_{\text{máx}}$  a amplitude da onda (representada pela irradiação solar máxima nas lagoas), tem-se (Equações 4.84 e 4.85):

$$a_n = \frac{I_{\text{máx}}}{\pi} \int_0^{\pi} \text{sen}(\omega t) \cos(nt) dt + \frac{I_{\text{máx}}}{\pi} \int_{\pi}^{2\pi} 0 \cos(nt) dt \quad (4.84)$$

$$b_n = \frac{I_{\text{máx}}}{\pi} \int_0^{\pi} \text{sen}(\omega t) \text{sen}(nt) dt + \frac{I_{\text{máx}}}{\pi} \int_{\pi}^{2\pi} 0 \text{sen}(nt) dt \quad (4.85)$$

Para o cálculo dos coeficientes  $a_n$  e  $b_n$ , considerou-se a velocidade angular  $\omega$  correspondente a um período  $T$  de um dia, assim como nas simulações transientes em CFD (ciclos diários). Após manipulação matemática e cálculo das integrais para obtenção de  $a_n$  e  $b_n$ , obteve-se a série de Fourier para a radiação solar (irradiação “ $I$ ”) nas lagoas (Equações 4.86 e 4.87):

$$I(t) = \frac{A}{\pi} + \frac{A}{2} \text{sen}(\omega t) - \frac{A}{\pi} \sum_{n=2,4,6\dots} \frac{1}{n^2 - 1} \cos(n.\omega t) \quad (4.86)$$

ou

$$I(t) = \frac{A}{\pi} + \frac{A}{2} \text{sen}(\omega t) - \frac{A}{\pi} \left[ \frac{\cos(2 \times t \times \omega)}{3} + \frac{\cos(4 \times t \times \omega)}{15} + \dots \right] + D \quad (4.87)$$

Com  $A$  sendo a amplitude observada da radiação solar no local, ou amplitude da irradiação ( $\text{W/m}^2$ ) e  $D$  o deslocamento vertical necessário para evitar valores negativos na função.

Na aplicação direta desta expressão a parte entre colchetes foi truncada nos seus primeiros termos, visto que o comportamento da curva é predominantemente ditado por eles. Mas uma análise de erros e sensibilidades foi feita antes dessas definições.

Em tese, o modelo a partir da série de Fourier, caso apresente resultados satisfatórios, poderia ser utilizado sem a necessidade de subprogramações ou uso de funções complementares que podem não estar disponíveis em softwares de modelagem, como no caso da função *step* (Equação 4.78) no modelo da Equação 4.79.

As perdas de calor por evaporação na superfície das lagoas (Evap, em  $\text{W/m}^2$ ) foram modeladas de acordo com o método de Fritz *et al.* (1980) (Equação 4.88):

$$\text{Evap} = \frac{Q}{A} = 0,1587 \cdot U_{\text{vento}} (e - e_{\text{amb}}) \quad (4.88)$$

Sendo  $U_{\text{vento}}$  a velocidade média do vento (m/s) e  $e$  e  $e_{\text{amb}}$  as pressões de vapor de saturação da superfície da lagoa e do ar no ambiente externo (mm Hg), definidas respectivamente por (Equações 4.89 e 4.90):

$$e = 25,374 \cdot e^{17,62 - \frac{5271}{T_{\text{sup}}}} \quad (4.89)$$

$$e_{\text{amb}} = 25,374 \cdot R_h \cdot e^{17,62 - \frac{5271}{T_{\text{ar}}}} \quad (4.90)$$

Nas quais  $T_{\text{sup}}$  é a temperatura na superfície (K),  $T_{\text{ar}}$  é a temperatura do ar no ambiente externo (K) e  $R_h$  é a umidade relativa local.

Tanto os valores de velocidade do vento quanto das temperaturas e umidade relativa foram definidos com base nos dados de monitoramento em campo.

A fim de considerar os efeitos da atenuação dos raios solares pela biomassa, considerou-se em alguns cenários a redução na intensidade luminosa e da transferência de temperatura ao longo da profundidade. O modelo foi definido a partir de uma função do tipo (Equação 4.91):

$$I = I_{\text{sup}} \cdot e^{-\eta \cdot z} \quad (4.91)$$

Onde  $z$  é a profundidade (m) e  $\eta$  é o fator que depende da concentração de sólidos suspensos na lagoa (SS, em g/m<sup>3</sup>), dado pela Equação 4.92 (CHAUVON *et al.*, 2016):

$$\eta = 0,32 + 0,03 \cdot SS \quad (4.92)$$

#### 4.5.6 Modelo de cisalhamento pela atuação do vento

As componentes da tensão de cisalhamento sobre a superfície das lagoas foram definidas sob condição de contorno de parede com livre deslizamento.

A magnitude da tensão de cisalhamento na superfície da lagoa foi definida como correspondente à Equação 3.54, já descrita no item 3.5.4, dependente da velocidade do vento medida a determinada altura do solo, da densidade do ar e de uma constante empírica  $C_d$  (BANDA *et al.*, 2006b; UKPONG, 2013):

$$\tau_{\text{vento}} = C_d \rho_{\text{ar}} U_{\text{vento}}^2 \quad (3.54)$$

onde:

$\tau_{\text{vento}}$  = tensão de cisalhamento proporcionada pelo vento (N/m<sup>2</sup>)

$U_{\text{vento}}$  = velocidade do vento (m/s)

$\rho_{\text{ar}}$  = densidade do ar (= 1,14 kg/m<sup>3</sup>)

$C_d$  = constante empírica (-)

A densidade do ar foi definida como a média atribuída pela estação meteorológica durante todo o período de monitoramento. A definição da constante empírica  $C_d$  é importante e depende da altura na qual a velocidade foi medida. Valores da constante empírica encontrados

na literatura se situam na ordem de grandeza de  $10^{-3}$ , como  $0,9 \times 10^{-3}$  e  $2,9 \times 10^{-3}$  adotados por Sweeney *et al.* (2003), de acordo com a velocidade medida;  $2,6 \times 10^{-3}$  por Vega *et al.* (2003) e  $1,7 \times 10^{-3}$  por Banda *et al.* (2006b) e Sah *et al.* (2011). A partir de estudos em uma lagoa de 60 m de largura, 240 m de comprimento e 2 m de profundidade, Van Dorn (1953) cita valores desta constante que variaram de  $3,7 \times 10^{-3}$ , a 0,25 m de altura na medição, a  $1,1 \times 10^{-3}$  para medições a 10 m. Ukpong (2013) utilizaram o valor de  $0,9 \times 10^{-4}$ , mencionado como aplicável para velocidades do vento maiores que 10 m/s medidas à 10 m de altura. Simulações foram realizadas neste trabalho utilizando valores dentro da faixa de  $0,9 \times 10^{-4}$  a  $3,7 \times 10^{-3}$ .

Buscou-se também no modelo de cisalhamento proposto capturar a dinâmica dos ventos observada nos dados meteorológicos, de forma que foram definidas funções matemáticas de tensão de cisalhamento com velocidades do vento variáveis ao longo do tempo; consideração inédita na literatura que relata da aplicação de CFD em lagoas com consideração dos efeitos do vento. Para tal, as variações de velocidade e direção do vento foram ajustadas estatisticamente às funções matemáticas que melhor descrevessem o comportamento observado e tais equações foram implementadas como condição de contorno de parede com tensão de cisalhamento na superfície das lagoas.

Devido ao observado comportamento cíclico de variações diárias, oscilando em torno de um valor central, a magnitude do vento foi definida nos modelos dinâmicos com base em senóides ajustadas estatisticamente aos dados discretos registrados no monitoramento meteorológico local.

#### 4.5.7 Modelo de injeção de traçador virtual

A modelagem do traçador virtual foi realizada a partir da implementação de um termo fonte de uma variável adicional pré-definida que representou o traçador (denominada *tracer*). Assim, a forma geral da equação de transporte do traçador para o fluxo turbulento nas unidades de tratamento foi definida como (Equação 4.93):

$$\frac{\partial(\rho\varphi)}{\partial t} = \nabla \cdot (\rho U \varphi) = \left( \nabla \cdot \left( \rho D_{\Phi} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \nabla \varphi \right) + S_{\varphi} \quad (4.93)$$

onde:

$\Phi = \text{tracer} = \text{concentração do traçador (ML}^{-3}\text{)}$   
 $\varphi = \Phi/\rho = \text{fração em massa do traçador (-)}$   
 $S_\varphi = \text{termo fonte volumétrico (ML}^3\text{T}^{-1}\text{)}$   
 $D_\varphi = \text{difusividade cinemática do traçador (L}^2\text{T}^{-1}\text{)}$   
 $Sc_t = \text{número de Schmidt turbulento } (\mu_t/\Gamma_t) \text{ (-)}$   
 $\Gamma_t = \text{difusividade turbulenta (ML}^{-1}\text{T}^{-1}\text{)}$

A operação de introdução do traçador foi modelada por meio de uma função denominada *step*, já descrita no item 4.5.5. A partir da função *step*, foi possível caracterizar um pulso na injeção do traçador virtual com as mesmas concentrações e mesmos tempos de aplicação do traçador dos ensaios de campo, de forma que a função torna-se positiva apenas nesse intervalo de tempo correspondente (Equação 4.94):

$$\text{tracer} = \text{step}(t - t_1) \cdot \text{step}(t_2 - t) \cdot S_\varphi \quad (4.94)$$

Sendo *tracer* a variável representativa da concentração do traçador,  $t_1$  o momento de início da injeção de traçador e  $t_2$  o momento de término.

Na equação 4.93 é possível desconsiderar a difusividade cinemática do traçador e suprimir o termo correspondente da equação, já que a maior parte do transporte é advectivo. Foram realizadas simulações considerando os dois casos, sendo a difusividade cinemática obtida em literatura.

#### 4.5.8 Critérios básicos de processamento

Os modelos foram simulados nas condições de regime permanente (*steady state*) e transiente (*transient*). Definiu-se como critério de convergência o RMSE (*Root Mean Square Error*) de  $10^{-4}$  para todas as variáveis. Para as simulações em regime transiente, o critério para término da etapa de processamento foi o tempo total de simulação, com ajustes dos passos de tempo para cada iteração (*time steps*) na busca da maior estabilidade possível para as simulações.

Nesse sentido, um dos parâmetros que foi verificado durante os cálculos das simulações em regime transiente (etapa de processamento) foi o número de Courant, apresentado, na forma unidimensional para simplificação, pela Equação 4.95:

$$\text{Courant} = \frac{u\Delta t}{\Delta x} \quad (4.95)$$

Onde  $u$  é a velocidade do fluido,  $\Delta t$  é o *timestep* e  $\Delta x$  é o tamanho da malha. O número de Courant calculado no CFX é uma generalização multidimensional dessa expressão, onde a velocidade e a escala de comprimento são baseados no fluxo de massa dentro do volume de controle e na dimensão desse volume de controle.

Considerando que a velocidade do fluido é um dado de saída do modelo, as demais variáveis devem ser ajustadas a fim de se produzir um número de Courant menor possível. Valores ideais se aproximam da unidade (ANSYS, 2013). Entretanto, pequenos números de Courant não se configuram como exigência para estabilidade da solução, apenas melhoram o resultado para simulações em regime transiente (ANSYS, 2013).

Em modelagem de lagoas com uso de CFD, Vega *et al.* (2003) relatam que o número de Courant de 20 demonstrou boa estabilidade computacional para as simulações. Buscou-se nos modelos desta pesquisa não ultrapassar tal valor.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Dados de monitoramento em campo

#### 5.1.1 Análises físicas, químicas e biológicas de entrada e saída e medições de vazão

A TAB. 5.1 apresentada as concentrações médias e medianas dos principais constituintes de qualidade do esgoto bruto e do efluente de cada unidade de tratamento, bem como os seus respectivos desvios padrões (entre parênteses), durante a segunda fase de operação do sistema, de janeiro de 2014 a abril de 2015, na qual as duas lagoas operaram em série, sendo a segunda lagoa com chicanas longitudinais. Após a lagoa 2 (L2) há ainda um filtro grosseiro de pedras, que proporciona grande melhoria na qualidade do efluente. No entanto, esta unidade não será avaliada aqui. A TAB. 5.2 exhibe as respectivas eficiências de remoção das variáveis de maior interesse, calculadas a partir das medianas das concentrações. Na TAB. 5.3 são mostrados os valores médios e medianos das variáveis ambientais presentes em cada unidade de tratamento.

**TABELA 5.1** - Resumo dos valores médios/medianos (desvio padrão) das concentrações dos efluentes ao longo da linha de tratamento.

Variável	Esgoto Bruto	UASB	Lagoa 1 (L1)	Lagoa 2 (L2)
<b>DBO Total</b>	278/257 (101)	81/73 (27)	66/55 (30)	67/56 (28)
<b>DBO Part.</b>	155/138 (48)	44/41 (21)	39/40 (19)	41/36 (22)
<b>DBO Filtr.</b>	75/64 (33)	39/35 (17)	29/25 (20)	26/20 (16)
<b>DQO Total</b>	485/481 (133)	218/208 (59)	221/215 (94)	186/189 (91)
<b>DQO Part.</b>	332/324 (83)	121/125 (46)	124/119 (75)	84/79 (65)
<b>DQO Filtr.</b>	181/204 (61)	107/108 (60)	111/127 (65)	108/110 (60)
<b>SST</b>	198/165 (102)	33/30 (14)	67/61 (31)	91/78 (54)
<b>SSV</b>	158/154 (78)	28/26 (12)	63/61 (30)	85/79 (51)
<b>NTK</b>	26/26 (7)	30/29 (6)	25/24 (6)	16/16 (6)
<b>Amônia-N</b>	24/23 (7)	29/28 (7)	22/20 (7)	15/16 (7)
<b>Col. Totais*</b>	$7,32 \times 10^{+10}/8,23 \times 10^{+10}$	$3,45 \times 10^{+09}/5,68 \times 10^{+09}$	$1,87 \times 10^{+07}/1,98 \times 10^{+07}$	$3,12 \times 10^{+05}/4,45 \times 10^{+05}$
<b><i>E. coli</i>*</b>	$1,23 \times 10^{+10}/1,20 \times 10^{+10}$	$7,55 \times 10^{+08}/1,85 \times 10^{+09}$	$2,96 \times 10^{+06}/2,44 \times 10^{+06}$	$3,74 \times 10^{+04}/4,80 \times 10^{+04}$

Unidades: mg/L, exceto coliformes totais e *E. coli* (NMP/100 mL). Número de dados (n) da cada parâmetro variou de 18 a 75

\* Coliformes totais e *E. coli*— média geométrica/mediana;

**TABELA 5.2** - Eficiências de remoção (medianas) das unidades ao longo da linha de tratamento, bem como pontos intermediários na lagoa 2.

Parâmetro	UASB	Lagoa 1 (L1)	Lagoa 2 (L2C2)	Lagoa 2 (L2C3)	Lagoa 2 (L2C4)	EB – L1	EB – L2
<b>DBO Total</b>	71,7	12,3	-	-	-17,9	75,9	73,5
<b>DQO Total</b>	59,5	-1,0	-	-	12,4	55,3	63,3
<b>SST</b>	84,0	-80,4	-	-	-9,8	58,0	44,6
<b>NTK</b>	-24,7	13,9	-	-	33,3	4,3	30,2
<b>Amônia-N</b>	-25,3	24,3	-	-	28,3	15,1	37,8
<b>Colif.Tot.</b>	1,1	2,1	0,6	0,9	0,3	3,6	5,5
<b><i>E. coli</i></b>	1,0	2,3	0,5	0,9	0,5	3,7	5,5

Eficiência de remoção (%), exceto coliformes totais e *E. coli* (unidades log). (EB = esgoto bruto; L1 = Lagoa 1; L2C2, L2C3 e L2C4 = Lagoa 2, ao longo das chicanas. Estes pontos são ilustrados na FIG. 4.14.

**TABELA 5.3** - Resumo dos valores médios/medianos (desvio padrão) dos dados ambientais ao longo da linha de tratamento, bem como pontos intermediários na lagoa 2.

Parâmetro	Esgoto Bruto	UASB	Lagoa 1 (L1)	Lagoa 2 (L2C2)	Lagoa 2 (L2C3)	Lagoa 2 (L2C4)
<b>Turbidez (UT)</b>	220/179 (139)	60/52 (23)	81/67 (50)	87/63 (74)	88/61 (70)	86/56 (75)
<b>Temp. (°C)</b>	24,4/24,5 (1,7)	24,4/24,1 (2,0)	22,5/22,7 (2,4)	21,6/21,1 (2,4)	21,5/21,1 (2,3)	21,3/20,8 (2,2)
<b>OD (mg/L)</b>	-	-	6,67/5,80 (3,57)	7,99/6,19 (4,77)	8,93/8,74 (4,71)	9,29/7,83 (4,38)
<b>pH (-)</b>	7,5/7,5 (0,2)	7,2/7,3 (0,1)	7,9/7,9 (0,3)	8,6/8,5 (0,4)	8,7/8,7 (0,4)	8,9/8,8 (0,5)
<b>POR (mV)</b>	-184/-205 (74)	-173/-165 (32)	9/12 (43)	26/26 (38)	28/24 (41)	34/28 (38)
<b>Alcalinidade (mgCaCO<sub>3</sub>/L)</b>	193/195 (35)	234/246 (52)	205/200 (44)	-	-	182/180 (30)

OD: oxigênio dissolvido; POR: potencial de oxirredução.

Durante o tempo operacional a vazão afluyente apresentou um valor médio de 37 m<sup>3</sup>/d, sendo que a linha de tratamento foi dimensionada para 40 m<sup>3</sup>/d (equivalente populacional de aproximadamente 250 habitantes). O valor médio é bastante próximo ao valor de projeto, sendo difícil controlar totalmente a vazão do afluyente devido às variações da mesma.

O reator UASB removeu a maior parcela da DBO, aproximadamente 71,7%, produzindo um efluente com uma concentração média de 81 mg/L (TAB. 5.1 e 5.2). A taxa de aplicação superficial média aplicada na primeira lagoa durante o monitoramento foi de 195 kgDBO/ha.d, indicando que esta primeira lagoa, do ponto de vista de carga orgânica, se aproxima de lagoas facultativas, que têm valores usuais de projeto entre 100 e 350 kgDBO/ha.d (VON SPERLING, 2002). A primeira lagoa da série apresentou remoção complementar de DBO, enquanto a segunda lagoa teve uma tendência contrária, ao aumentar

a concentração de DBO em 17,9%, provavelmente devido à produção de algas. Von Sperling *et al.* (2008) e Dias *et al.* (2014) observaram a mesma tendência no sistema com uma configuração semelhante. A remoção global de DBO desde o esgoto bruto até a segunda lagoa (EB – FG) foi de 73,5%, que pode ser considerada boa e dentro do esperado para esse tipo de sistema. A concentração média de DBO do efluente final foi de 67 mg/L. A DBO filtrada diminuiu em concentração ao longo da linha de tratamento, ocorrendo a maior remoção no UASB, sendo que a concentração média do efluente final foi de 26 mg/L, considerada boa (se comparada com padrões de lançamento comumente exigidos na legislação). A DBO particulada não foi removida nas lagoas, devido à intensa atividade algal, afetando o balanço de remoção. Isto destaca a importância de incluir uma unidade de tratamento de filtração, tal como um filtro de pedras, após uma série de lagoas de maturação, o que de fato ocorreu. A avaliação do sistema completo (incluindo o filtro grosseiro de pedras como última unidade do sistema) foi realizada por Dias *et al.* (2015).

Em termos de DQO, a eficiência de remoção global para a linha de tratamento (EB – L2) foi de 63,3%, sendo que a maior contribuição de remoção foi do reator UASB (59,5%). O reator UASB apresentou um efluente com concentração média de 218 mg/L, após o qual houve um pequeno aumento de concentração de DQO na L1, devido às algas, e uma diminuição da concentração de DQO na L2. O aumento da concentração de DQO na L1 ocorreu provavelmente devido à presença de biomassa algal, mas como nunca foi removido o lodo na L1, este pode ter influenciado a remoção complementar que a primeira lagoa tem demonstrado ao longo dos últimos anos. O efluente final apresentou concentração média de DQO de 186 mg/L. O efluente final no sistema completo, incluindo filtro grosseiro de pedras, estudado por Dias *et al.* (2015) apresentou concentração média bem baixa, de 53 mg/L, uma redução de mais de 130 mg/L da lagoa 2. Novamente, é possível atestar a importância do filtro de pedras para o sistema.

O reator UASB apresentou uma remoção mediana de 84% de SST do esgoto bruto. As lagoas, por sua vez, aumentaram a concentração de SST devido à presença de algas, sendo que a maior contribuição foi presenciada na primeira lagoa, onde houve um aumento de 80,4% de SST, enquanto a segunda lagoa contribuiu pouco para o aumento de SST relativamente à lagoa 1. A turbidez aumentou o seu valor na L1 também devido à presença de algas. Na segunda lagoa esse valor continuou a aumentar no primeiro canal (entre L1 e L2C2), mas diminuiu no segundo e terceiro canais (entre L2C2 e L2C4).

É de se notar que as concentrações de *E. coli* no esgoto bruto durante o período de monitoramento foram anormalmente altas quando comparadas com o típico reportado em literatura. É possível observar um declínio constante na concentração, sendo que a maior remoção ocorreu na primeira lagoa. O maior decaimento na segunda lagoa aconteceu no canal do meio (entre L2C2 e L2C3), que corresponde também ao maior aumento da concentração de OD na unidade. No que diz respeito às eficiências de remoção de *E. coli* na linha de tratamento, é possível concluir que o desempenho do sistema como um todo foi excelente, ao apresentar uma remoção mediana de 5,5 unidades log. Tal eficiência de remoção foi atingida com um TDH bastante reduzido nas lagoas, sendo que a primeira lagoa apresentou um TDH de 2,1 d (desconsiderando o volume ocupado pelo lodo) e uma eficiência de remoção mediana de 2,3 unidades de log, enquanto a segunda lagoa com chicanas, com um TDH de 1,6 d, apresentou uma eficiência de remoção mediana de 1,9 unidades log. A eficiência de remoção na segunda lagoa pode ser considerada alta, quando observado o reduzido valor de TDH, corroborando assim o efeito positivo da reduzida profundidade e chicanas, que aprimora os mecanismos de remoção baseados na radiação solar (UV e PAR), pH e OD.

Como esperado, a concentração de OD aumentou ao longo das lagoas, e os valores de pH também acompanharam esta tendência. Apesar de a primeira lagoa receber uma carga orgânica maior (similar à de uma lagoa facultativa típica), esta foi capaz de manter uma concentração elevada de OD. O efluente final apresentou uma concentração de OD de 9,29 mg/L, indicativo da elevada atividade fotossintética das algas. É possível observar que na segunda lagoa ocorreu maior acréscimo na concentração de OD no canal do meio (L2C2 – L2C3), coincidindo com a mesma tendência, mas no sentido inverso, do decaimento de *E. coli* nesse mesmo canal.

#### 5.1.1.1 Síntese conclusiva / pontos mais relevantes

Dentre as diversas inferências que podem ser feitas a respeito do funcionamento das lagoas a partir dos resultados apresentados e desta breve discussão, é possível mencionar a grande produção de biomassa algal, bem como o aparente efeito positivo proporcionado pela presença das chicanas e pela reduzida profundidade. Esses fatores apresentam interfaces com fatores hidrodinâmicos a serem avaliados no presente trabalho. Com relação aos sólidos suspensos, por exemplo, predominantemente algas neste caso, constata-se que as concentrações observadas estão abaixo do valor mencionado por Wood *et al.* (1998) como insignificante para alteração das propriedades de escoamento do fluido (fator hidrodinâmico).

Por outro lado, é possível que haja a influência dessas algas (e demais sólidos suspensos) na transferência de calor, vinculada ao fenômeno de estratificação térmica/desestratificação, aspecto também avaliado neste trabalho. Um outro exemplo é a avaliação da influência da profundidade no perfil de fluxo das lagoas, que, por sua vez, pode ter relação com a eficiência e remoção de constituintes (exemplo: mistura vertical *versus* eficiência de remoção bacteriana).

### 5.1.2 Condições climáticas e meteorológicas

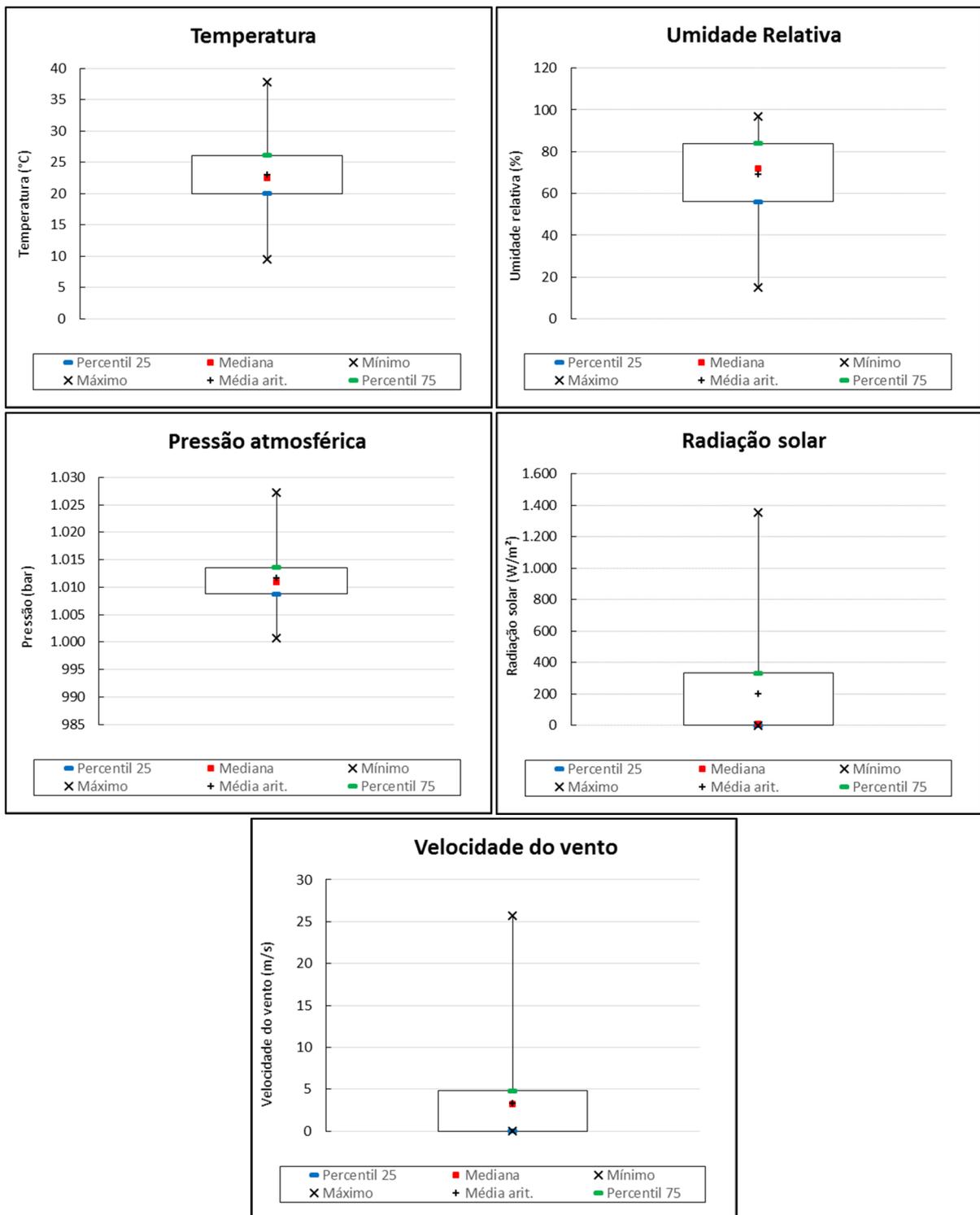
O clima da região onde está o centro experimental, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Cwa, subtropical/tropical de altitude, com inverno seco e verão quente. A temperatura média anual é 22,1 °C e precipitação de 1540 mm/ano, sendo caracterizado por um período seco que se estende de abril a setembro e um chuvoso que vai de outubro a março. No período seco a temperatura média é de 20,9 °C e a precipitação média de 33 mm/mês, já durante o período chuvoso as temperaturas médias são de 23,4 °C e a precipitação média de 254 mm/mês (dados do INMET - Instituto Nacional de Meteorologia).

A estação meteorológica instalada no CePTS, a 8 metros da lateral da lagoa 2, forneceu panorama mais exato das condições meteorológicas do local durante o período monitorado. A seguir estão apresentados alguns dos dados obtidos, com o intuito de fornecer as características meteorológicas gerais para todo o período de monitoramento, ao longo de um ano ou de um dia típico. Durante apresentação e discussão dos demais resultados desta pesquisa, a situação meteorológica de um dia ou período específico pode ser referenciada.

A TAB. 5.4 apresenta a estatística descritiva geral e medidas de dispersão dos dados registrados desde a data de instalação da estação para os parâmetros temperatura (em °C), umidade relativa (%), radiação solar (W/m<sup>2</sup>), pressão atmosférica (bar) e velocidade do vento em todas as direções (m/s). A FIG. 5.1, apresenta gráficos *box-plot* com a representação desses mesmos dados.

**TABELA 5.4** - Estatística descritiva geral e medidas de dispersão dos dados registrados desde a data de instalação da estação para os parâmetros temperatura (em °C), umidade relativa (%), radiação solar (W/m<sup>2</sup>), pressão atmosférica (bar) e velocidade do vento (m/s)

<b>TENDÊNCIA CENTRAL</b>	<b>TEMPERATURA (°C)</b>	<b>UMIDADE (%)</b>	<b>PRESSÃO ATM. (bar)</b>	<b>RADIAÇÃO SOLAR (W/m<sup>2</sup>)</b>	<b>VEL. VENTO (m/s)</b>
<b>Número de dados</b>	58841	58841	58841	58841	58841
<b>Média arit.</b>	22,5	70,3	1012,3	194,9	3,3
<b>Mediana</b>	22,1	73,0	1011,4	4,0	3,2
<b>Moda</b>	21,2	88	1010,4	0	0
<b>MEDIDAS DE DISPERSÃO</b>	<b>TEMPERATURA (°C)</b>	<b>UMIDADE (%)</b>	<b>PRESSÃO ATM. (bar)</b>	<b>RADIAÇÃO SOLAR (W/m<sup>2</sup>)</b>	<b>VEL. VENTO (m/s)</b>
<b>Máximo</b>	37,8	98,0	1027,3	1355,0	25,7
<b>Mínimo</b>	9,5	15,0	1000,7	0,0	0,0
<b>Amplitude</b>	28,3	83,0	26,6	1355,0	25,7
<b>Percentil 75</b>	25,5	85,0	1015,1	316,0	4,8
<b>Percentil 25</b>	19,5	58,0	1009,0	0,0	0,0
<b>Amplitude intequartis</b>	6,0	27,0	6,1	316,0	4,8
<b>Variância</b>	21,1	307,2	20,5	87228,5	9,5
<b>Desvio-padrão</b>	4,6	17,5	4,5	295,3	3,1
<b>Coef. Variação</b>	0,20	0,25	0,00	1,51	0,93

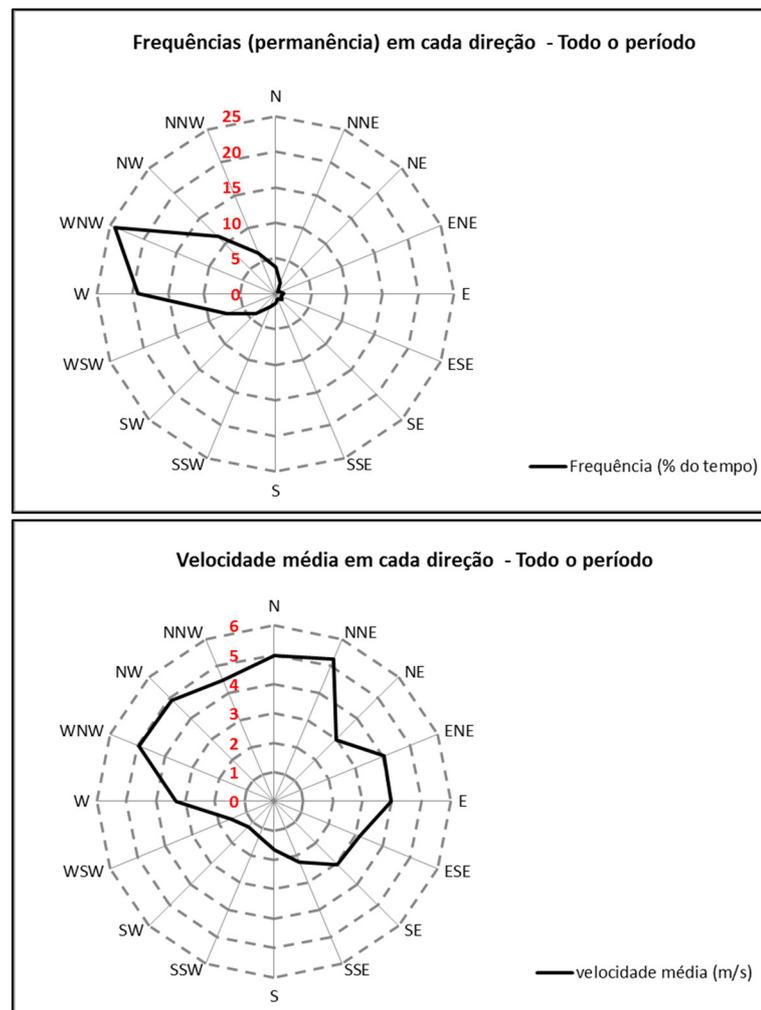


**FIGURA 5.1:** Gráficos *box-plot* com a representação dos dados registrados desde a data de instalação da estação meteorológica do CePTS UFMG/COPASA, para os parâmetros temperatura (em °C), umidade relativa (%), radiação solar (W/m<sup>2</sup>), pressão atmosférica (bar) e velocidade do vento (m/s)

Os dados apresentados aparentam ter distribuição aproximada da normal, com a maioria (como, por exemplo, aqueles compreendidos no intervalo interquartis) situada dentro do esperado pelo clima da região. Comportamento distinto pode ser observado nos dados da

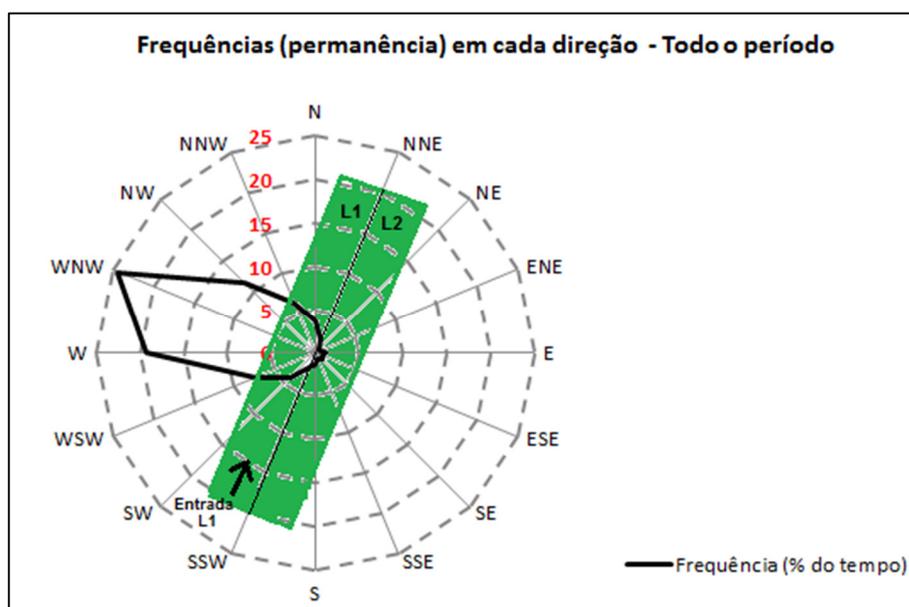
radiação solar, em que se tem grande diferença entre a média e a mediana, grande variância e valor nulo para a moda e para o percentil 25. Isto ocorre porquê em boa parte do tempo a radiação solar é contabilizada como zero (do pôr do sol à alvorada), o que também reflete na distribuição estatística dos dados. Apesar de apresentar mediana praticamente idêntica à média aritmética, os dados de velocidade do vento também relevaram o valor nulo para a moda e para o percentil 25, principalmente por causa dos valores registrados à noite.

Os anemogramas apresentados nas FIG. 5.2a e 5.2b evidenciam as direções predominantes do vento (em termos de porcentagem de permanência no tempo) considerando os pontos cardeais, colaterais e subcolaterais da rosa dos ventos, bem como as velocidades médias em cada uma dessas direções, respectivamente.



**FIGURA 5.2:** Anemogramas com (a) direções predominantes do vento (em termos de porcentagem de permanência no tempo) e (b) velocidades médias em cada uma dessas direções

Nota-se predominância dos ventos nas direções oeste e oes-noroeste, com maiores velocidades encontradas nas direções oes-noroeste, noroeste, nor-noroeste, norte e nor-nordeste (portanto, na região aproximada do noroeste, entre o oes-noroeste e o nor-nordeste). Entretanto, a região norte, apesar de receber ventos de maiores velocidades, apresenta baixo percentual de permanência. Observa-se então que maior influência do vento nas lagoas deve ser percebida mesmo no sentido oes-noroeste. Tomando por referência o alinhamento da lagoa L1 da entrada para a sua saída, trata-se de uma direção perpendicular à direção predominante do fluxo nas lagoas. A FIG. 5.3 apresenta a locação das lagoas com relação a essas direções (lagoas representadas pelo retângulo em verde). A entrada da lagoa 1 (que não sofreu alterações ao longo das duas fases de operação) está sinalizada na figura para melhor referência.



**FIGURA 5.3:** Representação da locação das lagoas com relação às direções da rosa dos ventos (lagoas representadas pelo retângulo em verde)

O **panorama anual** fornecido pela estação também revela um comportamento típico do clima da região segundo a classificação de Köppen, com maiores temperaturas e maior precipitação de outro a março. A TAB. 5.5 apresenta a estatística descritiva geral e medidas de dispersão dos dados registrados e agrupados em cada mês (numerados de 01-janeiro a 12-dezembro) para temperatura (em °C), velocidade do vento (m/s) e radiação solar (W/m<sup>2</sup>), que são as variáveis de maior interesse nesta pesquisa. A FIG. 5.4, apresenta gráficos *box-plot* com a representação desses mesmos dados

**TABELA 5.5** - Estatística descritiva geral e medidas de dispersão dos dados registrados em cada mês para os parâmetros temperatura (em °C), velocidade do vento (m/s) e radiação solar (W/m<sup>2</sup>)

<b>TEMPERATURA (°C)</b>		<b>MÊS</b>											
Tendência central	<b>01</b>	<b>02</b>	<b>03</b>	<b>04</b>	<b>05</b>	<b>06</b>	<b>07</b>	<b>08</b>	<b>09</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	
Número de dados	13491	6321	7260	2098	3520	2310	6478	6494	4139	11068	6862	7594	
Média arit.	25,0	23,8	23,9	22,6	20,1	18,5	18,3	20,0	23,3	25,1	23,5	23,5	
Mediana	24,4	23,0	23,2	21,9	19,6	18,3	17,6	19,5	23,4	24,3	22,4	22,7	
Moda	21,6	19,8	21,4	20,4	19,1	18,1	15,4	18,8	23,7	21,2	20,7	20,1	
Medidas de dispersão	<b>01</b>	<b>02</b>	<b>03</b>	<b>04</b>	<b>05</b>	<b>06</b>	<b>07</b>	<b>08</b>	<b>09</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	
Máximo	34,4	33,1	32,2	31,5	30,1	28,9	28,2	32,4	34,9	37,8	32,6	34,1	
Mínimo	17,2	18,2	17,7	15,3	13,0	9,7	9,8	9,5	12,1	12,6	16,1	17,4	
Amplitude	17,2	14,9	14,5	16,2	17,1	19,2	18,4	22,9	22,8	25,2	16,5	16,7	
Percentil 75	28,2	26,9	26,6	25,0	22,2	20,9	21,1	23,3	26,9	28,4	25,8	26,0	
Percentil 25	21,6	20,6	21,3	20,3	17,5	16,1	15,5	16,5	19,7	21,5	21,1	20,6	
Amplitude interquartis	6,6	6,3	5,3	4,7	4,7	4,8	5,6	6,8	7,2	6,9	4,7	5,4	
Variância	16,4	13,8	10,5	11,7	11,4	13,3	14,3	21,8	23,3	22,4	11,0	13,0	
Desvio-padrão	4,0	3,7	3,2	3,4	3,4	3,6	3,8	4,7	4,8	4,7	3,3	3,6	
Coef. Variação	0,16	0,16	0,14	0,15	0,17	0,20	0,21	0,23	0,21	0,19	0,14	0,15	

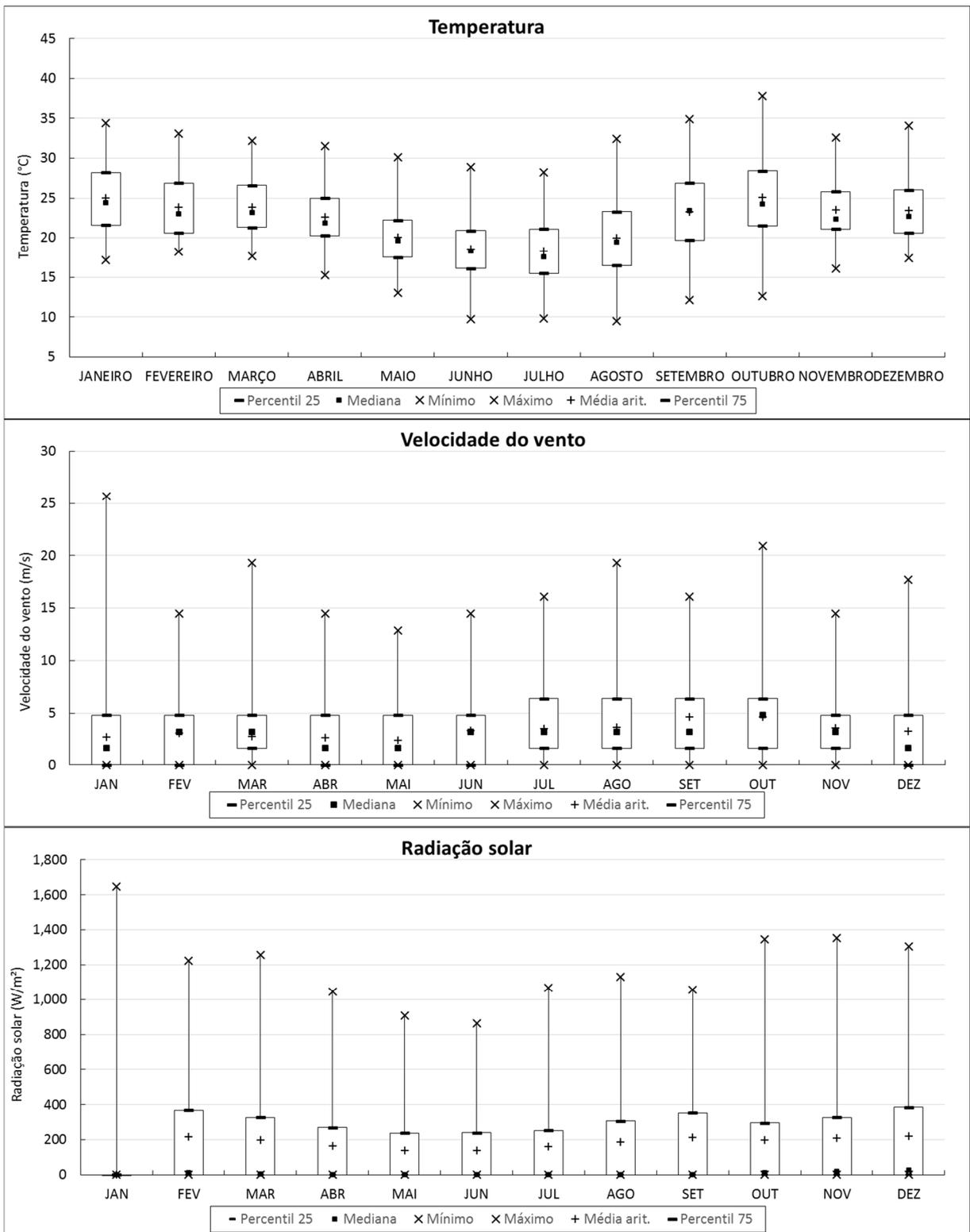
<b>VEL. DO VENTO (°C)</b>		<b>MÊS</b>											
Tendência central	<b>01</b>	<b>02</b>	<b>03</b>	<b>04</b>	<b>05</b>	<b>06</b>	<b>07</b>	<b>08</b>	<b>09</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	
Número de dados	13491	6321	7260	2098	3520	2310	6478	6494	4139	11068	6862	7594	
Média arit.	2,7	3,1	2,8	2,6	2,4	3,3	3,5	3,7	4,6	4,6	3,6	3,3	
Mediana	1,6	3,2	3,2	1,6	1,6	3,2	3,2	3,2	3,2	4,8	3,2	1,6	
Moda	0	0	1,6	0	0	0	1,6	0	1,6	3,2	1,6	0	
Medidas de dispersão	<b>01</b>	<b>02</b>	<b>03</b>	<b>04</b>	<b>05</b>	<b>06</b>	<b>07</b>	<b>08</b>	<b>09</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	
Máximo	25,7	14,5	19,3	14,5	12,9	14,5	16,1	19,3	16,1	20,9	14,5	17,7	
Mínimo	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Amplitude	25,7	14,5	19,3	14,5	12,9	14,5	16,1	19,3	16,1	20,9	14,5	17,7	
Percentil 75	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	6,4	6,4	6,4	6,4	4,8	4,8	
Percentil 25	0,0	0,0	1,6	0,0	0,0	0,0	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	0,0	
Amplitude interquartis	4,8	4,8	3,2	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	3,2	4,8	
Variância	7,6	7,8	5,6	6,1	6,4	11,3	10,8	10,7	11,9	10,6	7,8	10,4	
Desvio-padrão	2,8	2,8	2,4	2,5	2,5	3,4	3,3	3,3	3,4	3,3	2,8	3,2	
Coef. Variação	1,01	0,90	0,85	0,93	1,05	1,00	0,93	0,89	0,74	0,70	0,77	0,98	

<b>RAD. SOLAR (W/m<sup>2</sup>)</b>		<b>MÊS</b>											
Tendência central	<b>01</b>	<b>02</b>	<b>03</b>	<b>04</b>	<b>05</b>	<b>06</b>	<b>07</b>	<b>08</b>	<b>09</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	
N	13491	6321	7260	2098	3520	2310	6478	6494	4139	11068	6862	7594	
Média arit.	1	216	198	166	139	139	161	189	213	200	211	220	
Mediana	0	14	7	0	0	0	0	0	3	14	21	28	
Moda	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Medidas de dispersão	<b>01</b>	<b>02</b>	<b>03</b>	<b>04</b>	<b>05</b>	<b>06</b>	<b>07</b>	<b>08</b>	<b>09</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	
Máximo	1646	1223	1259	1046	908	863	1069	1130	1055	1346	1355	1306	
Mínimo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Amplitude	1646	1223	1259	1046	908	863	1069	1130	1055	1346	1355	1306	

Percentil 75	0	369	327	270	239	241	253	308	354	297	328	386
Percentil 25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Amplitude interquartis	0	369	327	270	239	241	253	308	354	297	328	386
Variância	426	99165	87440	63610	46813	45700	65724	835	96763	90846	101245	95353
Desvio-padrão	20,6	314,9	295,7	252,2	216,4	213,8	256,4	288,5	311,1	301,4	318,2	308,8
Coef. Variação	34,76	1,46	1,50	1,52	1,56	1,54	1,59	1,53	1,46	1,51	1,51	1,40

---



**FIGURA 5.4:** Gráficos box-plot com a representação dos dados de temperatura (°C), velocidade do vento (m/s) e radiação solar (W/m<sup>2</sup>) registrados em cada mês no CePTS – UFMG/COPASA

Em geral, os dados demonstram pouca variação ao longo do ano da radiação solar e da velocidade dos ventos. Para este último, observa-se um ligeiro aumento de intensidade de

julho a outubro. Tais dados sugerem que poucos ganhos de precisão seriam obtidos em modelos que considerassem variações mensais destes parâmetros.

As variações **diárias** de temperatura, radiação solar e vento foram consideradas nos modelos dinâmicos em CFD neste trabalho, visto que esses fatores variam significativamente ao longo de um dia e podem exercer grande influência no desempenho hidrodinâmico das lagoas. Assim, estão apresentados a seguir os resultados do perfil diário para cada uma destas variáveis.

A TAB. 5.6 apresenta a estatística descritiva geral e medidas de dispersão dos dados registrados e agrupados em cada hora do dia para os parâmetros temperatura (em °C), radiação solar (W/m<sup>2</sup>) e velocidade do vento (m/s). A FIG. 5.5 mostra gráficos *box-plot* com a representação em série temporal desses mesmos dados.

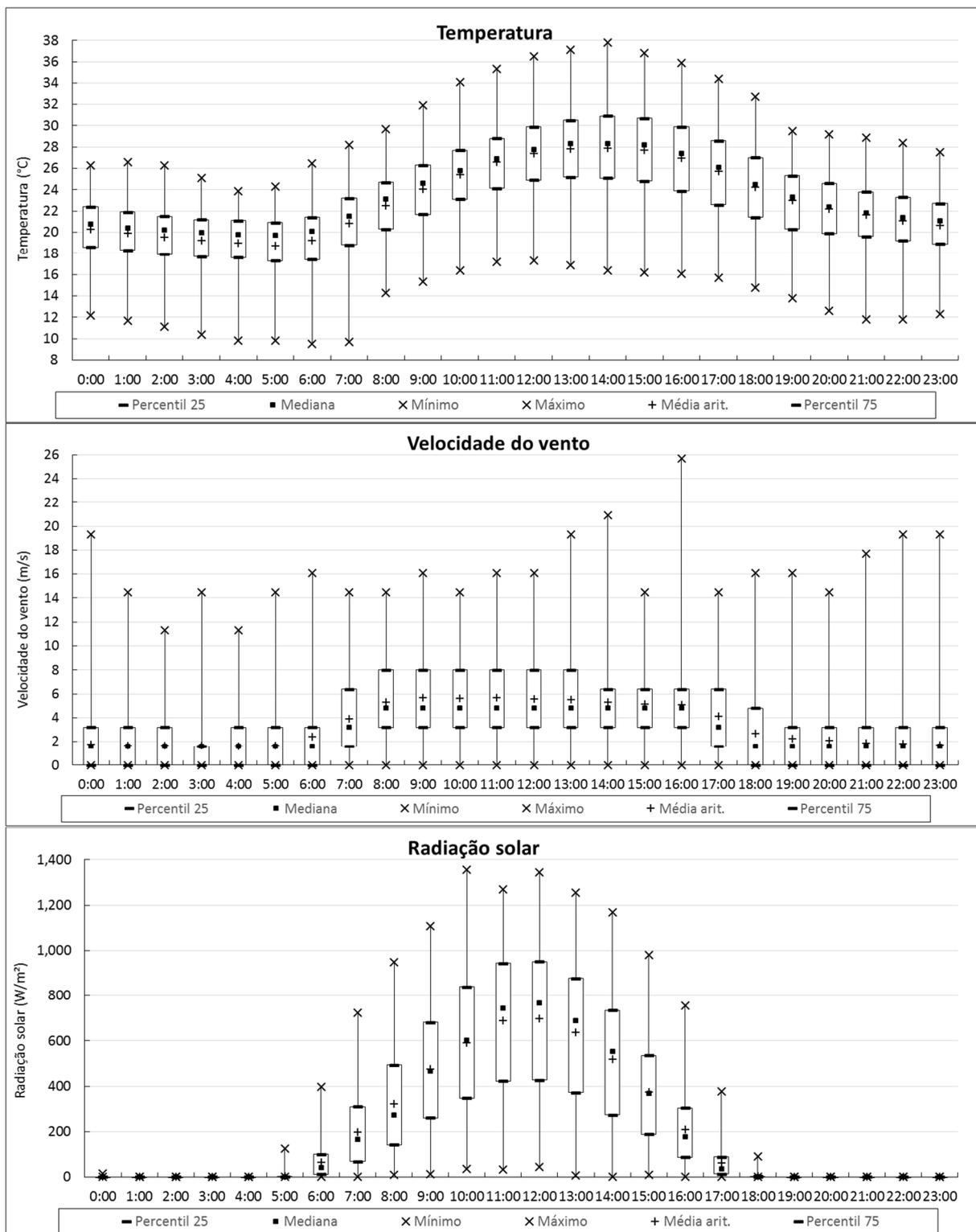
**TABELA 5.6 - Estatística descritiva geral e medidas de dispersão dos dados registrados em cada hora para os parâmetros temperatura (em °C), velocidade do vento (m/s) e radiação solar (W/m<sup>2</sup>)**

<b>TEMPERATURA (°C)</b>																								
<b>Tendência central</b>	<b>00h</b>	<b>01h</b>	<b>02h</b>	<b>03h</b>	<b>04h</b>	<b>05h</b>	<b>06h</b>	<b>07h</b>	<b>08h</b>	<b>09h</b>	<b>10h</b>	<b>11h</b>	<b>12h</b>	<b>13h</b>	<b>14h</b>	<b>15h</b>	<b>16h</b>	<b>17h</b>	<b>18h</b>	<b>19h</b>	<b>20h</b>	<b>21h</b>	<b>22h</b>	<b>23h</b>
N	3260	3264	3264	3264	3264	3264	3262	3258	3270	3276	3267	3258	3256	3231	3237	3237	3210	3190	3153	3150	3155	3188	3216	3241
Média arit.	20,3	19,9	19,5	19,2	19,0	18,8	19,2	20,8	22,5	24,1	25,4	26,6	27,4	27,8	27,9	27,7	27,0	25,7	24,2	23,0	22,2	21,6	21,1	20,7
Mediana	20,8	20,4	20,2	20,0	19,8	19,7	20,1	21,5	23,1	24,6	25,8	26,9	27,8	28,3	28,3	28,2	27,4	26,1	24,5	23,3	22,4	21,8	21,4	21,1
Moda	21,4	21,3	21,1	20,4	21,4	20,7	20,9	23,2	24,3	26,1	27,3	28,3	28,4	29,6	29,4	29,6	27,4	28,3	25,6	23,6	23,1	19,9	21,6	21,6
<b>Dispersão</b>	<b>00h</b>	<b>01h</b>	<b>02h</b>	<b>03h</b>	<b>04h</b>	<b>05h</b>	<b>06h</b>	<b>07h</b>	<b>08h</b>	<b>09h</b>	<b>10h</b>	<b>11h</b>	<b>12h</b>	<b>13h</b>	<b>14h</b>	<b>15h</b>	<b>16h</b>	<b>17h</b>	<b>18h</b>	<b>19h</b>	<b>20h</b>	<b>21h</b>	<b>22h</b>	<b>23h</b>
Máximo	26,3	26,6	26,3	25,1	23,9	24,3	26,5	28,2	29,7	31,9	34,1	35,3	36,5	37,1	37,8	36,8	35,9	34,4	32,7	29,5	29,2	28,9	28,4	27,5
Mínimo	12,2	11,7	11,1	10,4	9,8	9,8	9,5	9,7	14,3	15,3	16,4	17,2	17,3	16,9	16,4	16,2	16,1	15,7	14,8	13,8	12,6	11,8	11,8	12,3
Amplitude	14,1	14,9	15,2	14,7	14,1	14,5	17,0	18,5	15,4	16,6	17,7	18,1	19,2	20,2	21,4	20,6	19,8	18,7	17,9	15,7	16,6	17,1	16,6	15,2
Percentil 75	22,4	21,9	21,5	21,2	21,1	20,9	21,4	23,2	24,7	26,3	27,7	28,8	29,9	30,5	30,9	30,7	29,9	28,6	27,0	25,3	24,6	23,8	23,3	22,7
Percentil 25	18,6	18,3	17,9	17,7	17,6	17,3	17,4	18,8	20,3	21,7	23,1	24,1	24,9	25,2	25,1	24,8	23,9	22,6	21,4	20,3	19,9	19,6	19,2	18,9
Amplitude interquartis	3,8	3,6	3,6	3,5	3,5	3,6	4,0	4,4	4,4	4,6	4,6	4,7	5,0	5,3	5,8	5,9	6,0	6,0	5,6	5,0	4,7	4,2	4,1	3,8
Variância	8,1	8,1	8,3	8,4	8,5	8,6	10,2	10,5	9,4	9,7	10,5	11,6	13,0	14,3	16,0	16,2	16,1	15,0	12,7	10,4	9,4	8,8	8,4	8,2
Desvio-padrão	2,8	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	3,2	3,2	3,1	3,1	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,0	4,0	3,9	3,6	3,2	3,1	3,0	2,9	2,9
Coef. Variação	0,14	0,14	0,15	0,15	0,15	0,16	0,17	0,16	0,14	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,14	0,14	0,15	0,15	0,15	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
<b>VELOCIDADE DO VENTO (m/s)</b>																								
<b>Tendência central</b>	<b>00h</b>	<b>01h</b>	<b>02h</b>	<b>03h</b>	<b>04h</b>	<b>05h</b>	<b>06h</b>	<b>07h</b>	<b>08h</b>	<b>09h</b>	<b>10h</b>	<b>11h</b>	<b>12h</b>	<b>13h</b>	<b>14h</b>	<b>15h</b>	<b>16h</b>	<b>17h</b>	<b>18h</b>	<b>19h</b>	<b>20h</b>	<b>21h</b>	<b>22h</b>	<b>23h</b>
N	3260	3264	3264	3264	3264	3264	3262	3258	3270	3276	3267	3258	3256	3231	3237	3237	3210	3190	3153	3150	3155	3188	3216	3241
Média arit.	1,7	1,6	1,7	1,7	1,6	1,7	2,4	3,9	5,3	5,7	5,6	5,7	5,6	5,5	5,3	5,2	5,1	4,1	2,7	2,3	2,1	1,9	1,8	1,7
Mediana	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	3,2	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	3,2	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
Moda	0	0	0	0	0	0	0	3,2	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	3,2	3,2	6,4	1,6	0	0	1,6	0	0	0
<b>Dispersão</b>	<b>00h</b>	<b>01h</b>	<b>02h</b>	<b>03h</b>	<b>04h</b>	<b>05h</b>	<b>06h</b>	<b>07h</b>	<b>08h</b>	<b>09h</b>	<b>10h</b>	<b>11h</b>	<b>12h</b>	<b>13h</b>	<b>14h</b>	<b>15h</b>	<b>16h</b>	<b>17h</b>	<b>18h</b>	<b>19h</b>	<b>20h</b>	<b>21h</b>	<b>22h</b>	<b>23h</b>
Máximo	19,3	14,5	11,3	14,5	11,3	14,5	16,1	14,5	14,5	16,1	14,5	16,1	16,1	19,3	20,9	14,5	25,7	14,5	16,1	16,1	14,5	17,7	19,3	19,3
Mínimo	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Amplitude	19,3	14,5	11,3	14,5	11,3	14,5	16,1	14,5	14,5	16,1	14,5	16,1	16,1	19,3	20,9	14,5	25,7	14,5	16,1	16,1	14,5	17,7	19,3	19,3
Percentil 75	3,2	3,2	3,2	1,6	3,2	3,2	3,2	6,4	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	6,4	6,4	6,4	6,4	4,8	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2

Percentil 25	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,6	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	1,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Amplitude interquartis	3,2	3,2	3,2	1,6	3,2	3,2	3,2	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	3,2	3,2	3,2	4,8	4,8	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2
Variância	5,0	4,0	3,9	3,9	3,2	3,6	6,0	8,0	8,9	9,9	8,6	8,7	8,3	8,7	8,1	7,2	8,5	8,6	6,7	6,5	5,4	4,7	4,9	5,0
Desvio-padrão	2,2	2,0	2,0	2,0	1,8	1,9	2,4	2,8	3,0	3,1	2,9	2,9	2,9	3,0	2,8	2,7	2,9	2,9	2,6	2,6	2,3	2,2	2,2	2,2
Coef. Variação	1,28	1,23	1,20	1,20	1,10	1,15	1,02	0,72	0,56	0,55	0,52	0,52	0,51	0,53	0,54	0,52	0,57	0,71	0,96	1,13	1,10	1,16	1,21	1,29

**RADIAÇÃO SOLAR (W/m<sup>2</sup>)**

<b>Tendência central</b>	<b>00h</b>	<b>01h</b>	<b>02h</b>	<b>03h</b>	<b>04h</b>	<b>05h</b>	<b>06h</b>	<b>07h</b>	<b>08h</b>	<b>09h</b>	<b>10h</b>	<b>11h</b>	<b>12h</b>	<b>13h</b>	<b>14h</b>	<b>15h</b>	<b>16h</b>	<b>17h</b>	<b>18h</b>	<b>19h</b>	<b>20h</b>	<b>21h</b>	<b>22h</b>	<b>23h</b>
N	3260	3264	3264	3264	3264	3264	3262	3258	3270	3276	3267	3258	3256	3231	3237	3237	3210	3190	3153	3150	3155	3188	3216	3241
Média arit.	0	0	0	0	0	5	66	199	323	474	590	689	697	637	518	375	210	63	5	0	0	0	0	0
Mediana	0	0	0	0	0	0	41	167	273	467	603	745	766	690	552	369	179	36	0	0	0	0	0	0
Moda	0	0	0	0	0	0	0	33	98	76	475	1044	1036	773	641	218	94	0	0	0	0	0	0	0
<b>Dispersão</b>	<b>00h</b>	<b>01h</b>	<b>02h</b>	<b>03h</b>	<b>04h</b>	<b>05h</b>	<b>06h</b>	<b>07h</b>	<b>08h</b>	<b>09h</b>	<b>10h</b>	<b>11h</b>	<b>12h</b>	<b>13h</b>	<b>14h</b>	<b>15h</b>	<b>16h</b>	<b>17h</b>	<b>18h</b>	<b>19h</b>	<b>20h</b>	<b>21h</b>	<b>22h</b>	<b>23h</b>
Máximo	15	0	0	0	0	125	398	724	950	1108	1355	1271	1346	1254	1168	980	755	377	90	0	0	0	0	0
Mínimo	0	0	0	0	0	0	0	0	11	12	35	32	44	7	0	9	0	0	0	0	0	0	0	0
Amplitude	15	0	0	0	0	125	398	724	939	1096	1320	1239	1302	1247	1168	971	755	377	90	0	0	0	0	0
Percentil 75	0	0	0	0	0	2	100	310	494	681	840	944	951	877	734	535	304	89	3	0	0	0	0	0
Percentil 25	0	0	0	0	0	0	12	69	142	261	348	422	427	372	274	188	87	14	0	0	0	0	0	0
Amplitude interquartis	0	0	0	0	0	2	88	241	352	420	492	522	524	506	460	347	217	75	3	0	0	0	0	0
Variância	0	0	0	0	0	168	5257	21260	44502	65111	80767	91807	94217	92115	73191	46219	22502	5188	132	0	0	0	0	0
Desvio-padrão	1	0	0	0	0	13	73	146	211	255	284	303	307	304	271	215	150	72	11	0	0	0	0	0
Coef. Variação	12	-	-	-	-	3	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	2	-	-	-	-	-



**FIGURA 5.5:** Gráficos box-plot com a representação dos dados de temperatura (°C), velocidade do vento (m/s) e radiação solar (W/m<sup>2</sup>) registrados ao longo de cada hora de um dia - CePTS – UFMG/COPASA

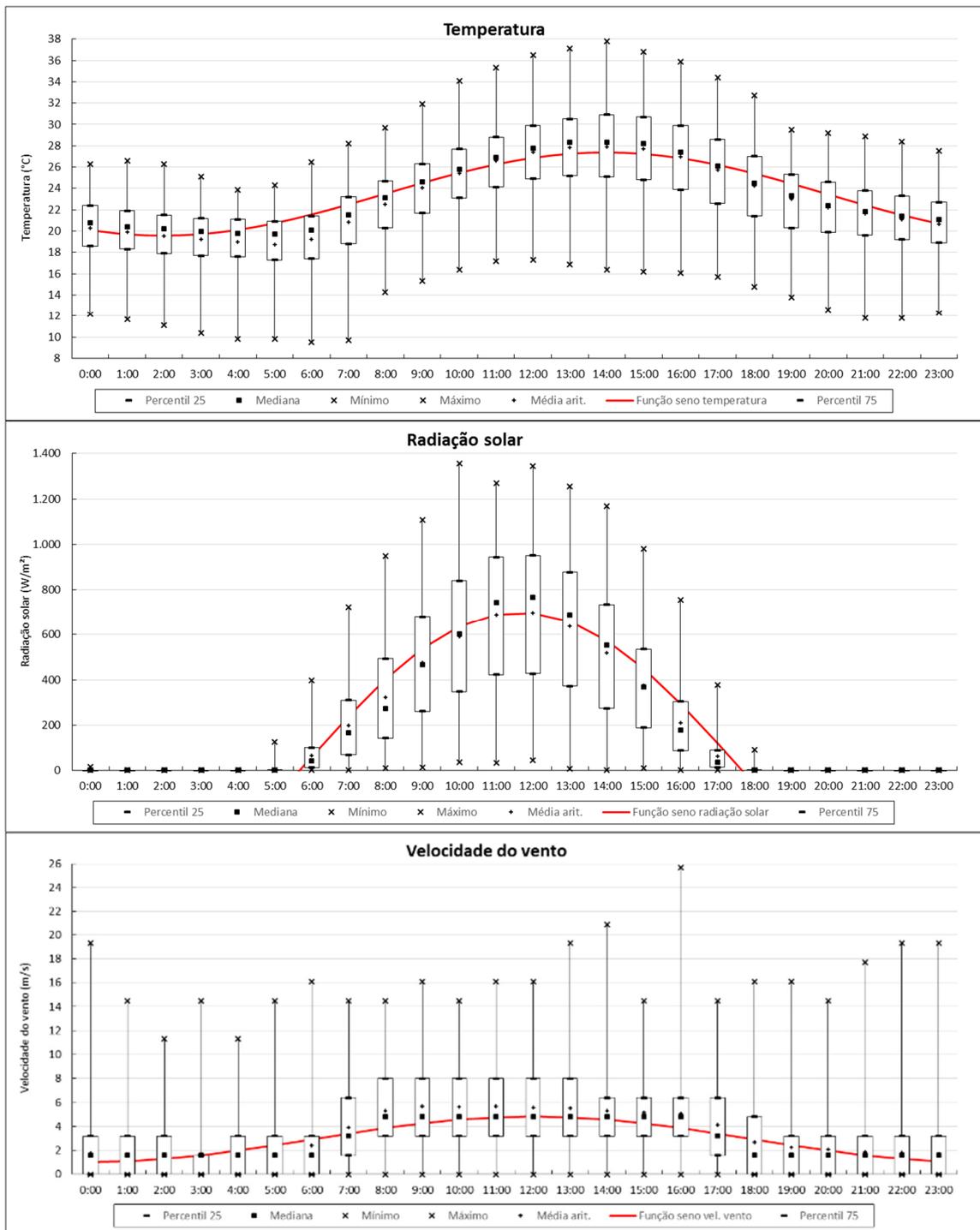
Em geral, os dados demonstram variação significativa ao longo do dia para estas variáveis, até mesmo para a velocidade do vento (já que temperatura e radiação solar já era naturalmente esperado). A mediana da temperatura chega a aproximadamente 28° das 13h às 15h (período

mais quente do dia) e a um pouco menos de 20°C no período mais frio do dia (3h às 5h). A máxima chegou a 38°C e a mínima a 10°, durante todo o período de monitoramento.

Grosso modo, dois períodos distintos para a velocidade do vento podem ser notados. A mediana gira em torno de 2 m/s durante a noite e chega a cerca de 5 m/s durante o dia. As maiores velocidades se concentram em torno das 12h.

A radiação solar apresentou um comportamento dentro do esperado, visto que dados foram predominantemente registrados das 06h (alvorada) às 17h (crepúsculo), com pico por volta das 12h. A mediana nas horas de pico se situou próximo a 800 W/m<sup>2</sup>, típico do clima da região, com valor máximo registrado de pouco mais de 1300 W/m<sup>2</sup>.

Para inclusão dessas tendências nos modelos das lagoas em CFD, ajustaram-se funções senoidais aos dados da estatística descritiva, visto que um comportamento periódico foi notado ao longo dos dias. O ajuste gráfico das funções às medianas, bem como as equações resultantes e o valor correspondente do coeficiente de correlação obtido, após iterações para otimização no *Solver* do *Excel*, estão apresentados a seguir (FIG. 5.6 e Equações 5.1, 5.2 e 5.3). No caso da função da radiação solar, a equação já está apresentada com senóides associadas à função *step*, a fim de anular os períodos em que a expressão retorna um valor negativo (valores noturnos).



**FIGURA 5.6:** Gráficos box-plot com a representação dos dados de temperatura (°C), velocidade do vento (m/s) e radiação solar (W/m<sup>2</sup>) registrados ao longo de cada hora de um dia, com ajuste de funções senoidais

Temperatura –  $T$  (em °C):

$$T = 23,48 + 3,90 \cdot \text{sen}(7,272 \times 10^{-5} \cdot t - 2,086) \quad (r = 0,97) \quad (5.1)$$

Vento –  $U_{vento}$  (em m/s):

$$U_{vento} = 2,93 + 1,90 \cdot \text{sen}(7,272 \times 10^{-5} \cdot t - 1,571) \quad (r = 0,92) \quad (5.2)$$

Radiação solar –  $I$  (em W/m<sup>2</sup>):

$$I = \text{step}[\text{sen}(7,272 \times 10^{-5} \cdot t - 1,482)] \cdot 700 \cdot \text{sen}(7,272 \times 10^{-5} \cdot t - 1,482) \quad (r = 0,87) \quad (5.3)$$

Sendo  $t$  o tempo (s).

#### 5.1.2.1 Síntese conclusiva / pontos mais relevantes

A estação meteorológica instalada no CePTS forneceu panorama mais exato das condições meteorológicas do local durante o período monitorado. O panorama anual fornecido pela estação também revelou um comportamento típico do clima da região. Foi observada predominância da atuação do vento no sentido oes-noroeste, perpendicular à direção do fluido nas lagoas.

Observou-se variação significativa ao longo do dia com padrão cíclico para as variáveis ambientais, o que possibilitou uma aproximação do comportamento médio a funções matemáticas de oscilações repetitivas, como as soidais e cossenoidais. As equações obtidas após ajuste estatísticos aos dados da estação foram aplicadas para modelagem da influência média dinâmica das condições externas de vento, temperatura e radiação solar a que as lagoas estão submetidas, já que todo o período de monitoramento foi considerado na dedução dessas equações. Variantes dessas expressões, aplicadas a determinados períodos específicos de tempo, foram também utilizadas nas práticas de verificação, calibração ou validação.

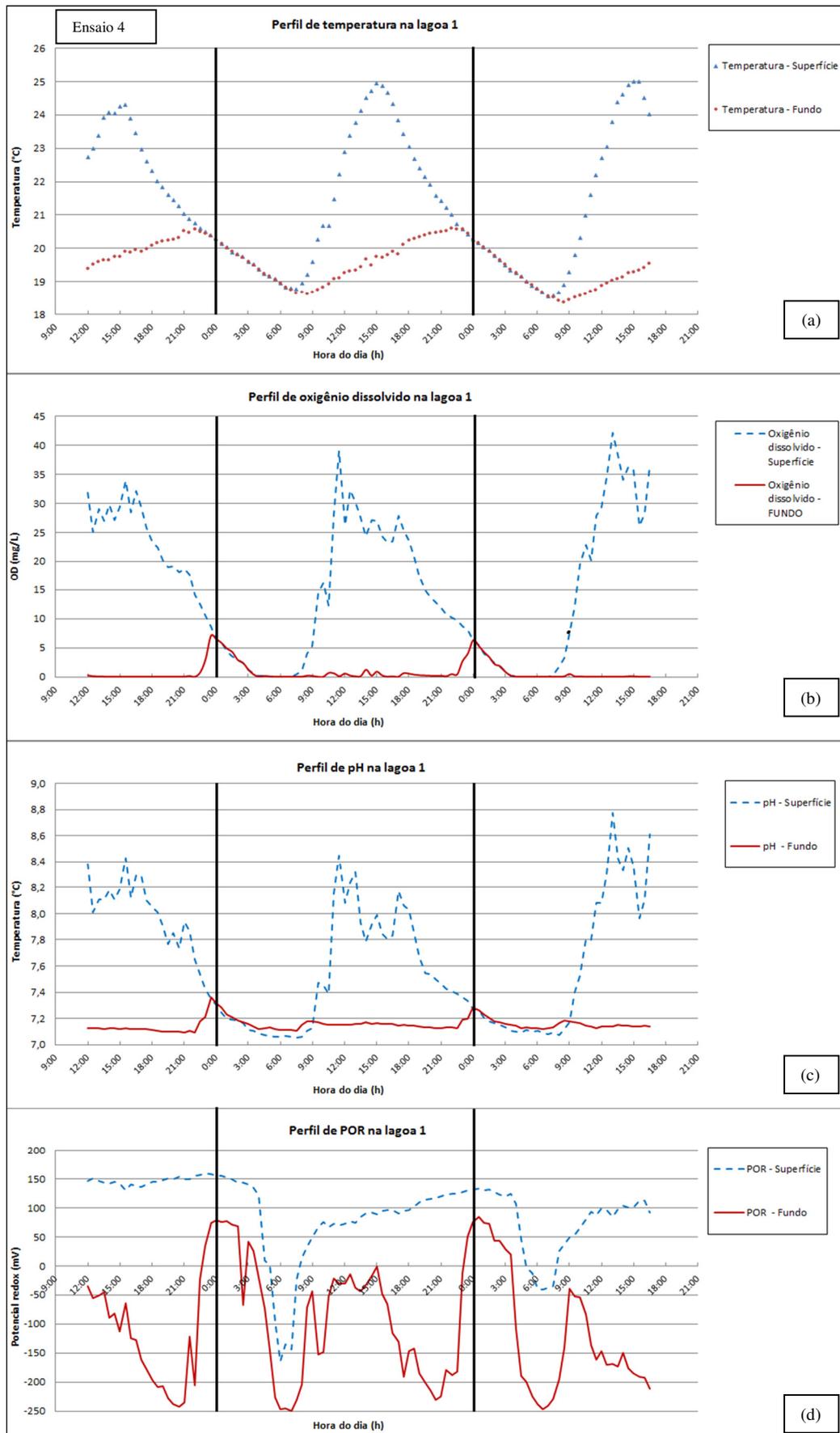
### 5.1.3 **Análises temporais do perfil vertical dos principais parâmetros de qualidade**

#### 5.1.3.1 Ocorrências de estratificação térmica e desestratificação

De forma geral, os dados demonstram eventos periódicos diários de estratificação térmica durante o dia seguidos de mistura vertical (desestratificação) à noite, em ambas as lagoas e fases de operação, independente da sua configuração geométrica ou do local de monitoramento. Somente os principais resultados serão apresentados aqui, visto que o mesmo comportamento se repete na maioria dos dados.

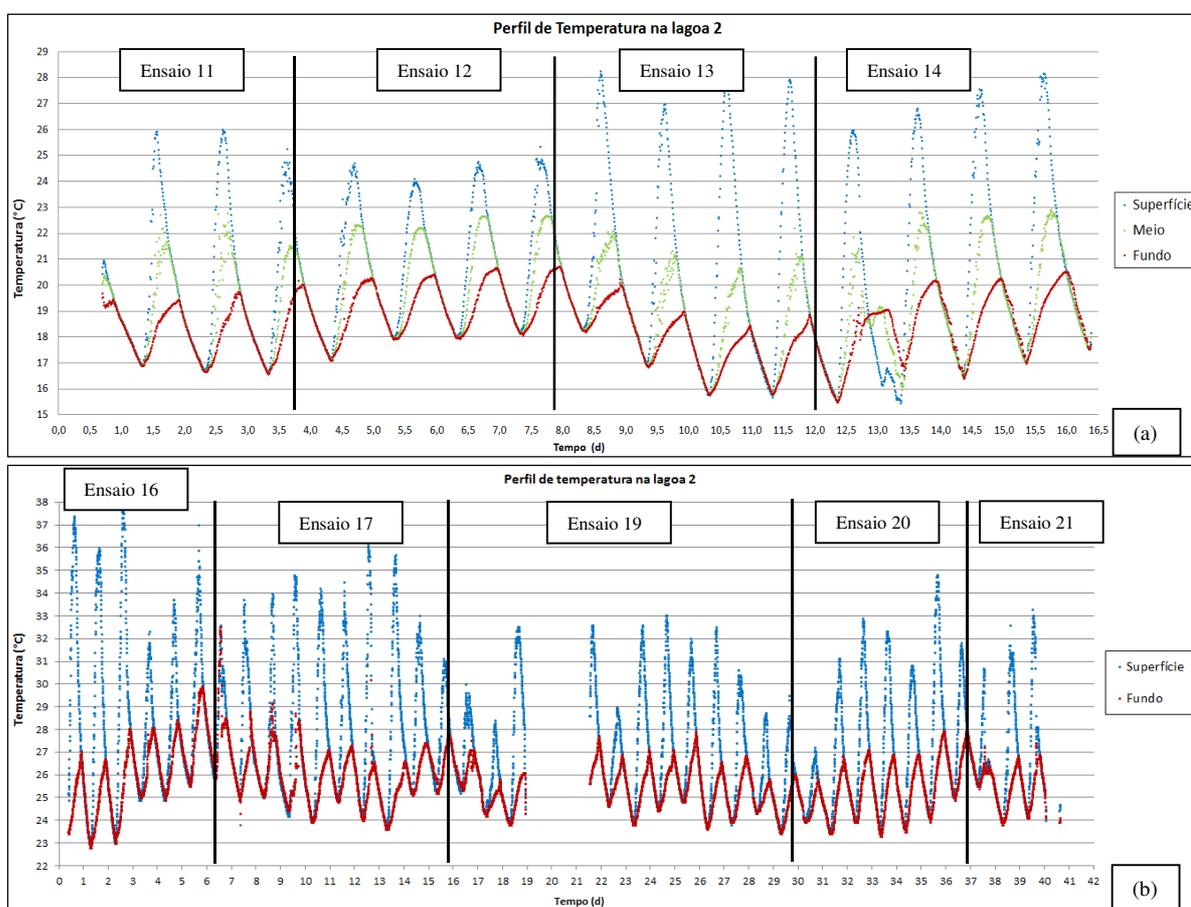
Um exemplo típico é o da FIG. 5.7a, que apresenta o perfil de temperatura (da superfície e do fundo nos marcadores de cor azul e vermelha, respectivamente) na lagoa 1 durante o ensaio n° 4, com o eixo das abcissas representando a hora do dia e linhas verticais indicando a separação entre os dias. Durante esse ensaio, foi possível verificar estratificação térmica a partir das 07h, com a desestratificação ocorrendo por volta das 22h. Isto significa que a lagoa permaneceu em mistura vertical por cerca de 9 horas, assim como observado nos ensaios 1 e 2 na lagoa 2, fase 1. A média das amplitudes máximas de temperatura observadas no ensaio foi de 5,1°C entre a superfície e o fundo (ocorrendo por volta das 15h de cada dia), que para as posições das sondas no ensaio conduziu a um gradiente de temperatura máximo de cerca de 15°C/m. A posição da sonda de fundo na lagoa 1 foi escolhida neste ensaio de forma a aproximar da interface com o lodo, mas não imersa nele, representando assim o fundo da lagoa em relação ao líquido e não em relação à geometria.

A mistura é comprovada pelo monitoramento de OD, pH e POR na superfície e no fundo da lagoa (FIG. 5.7b, 5.7c e 5.7d, respectivamente). Também nessas figuras a linha de cor azul representa o monitoramento na superfície e a linha vermelha o monitoramento no fundo da lagoa (interface com o lodo), com o eixo das abcissas representando a hora do dia e linhas verticais indicando a separação entre os dias. Nota-se que os valores de OD na superfície são bastante elevados, de forma que a supersaturação acontece na maior parte do dia (devido às horas de insolação e consequente atividade fotossintética). Naturalmente, os valores de pH também são mais elevados na superfície. Já o fundo tem predominância de ausência de OD e menores valores de pH. Os dados revelam elevação brusca da concentração de OD e do pH de fundo no momento da mistura, bem como ocorrência de POR positivos para o mesmo momento. Isto ocorre porque as camadas superficiais do fluido na lagoa (com maiores concentrações de OD e de pH mais elevado) são levadas ao fundo. Assim, os teores de OD e pH são igualados no perfil vertical, indicando a mistura, cerca de 1 hora depois de as temperaturas serem igualadas. Este mesmo comportamento foi observado nos demais ensaios.



**FIGURA 5.7:** Perfil de (a) temperatura, (b) oxigênio dissolvido, (c) pH e (d) POR na lagoa 1 (superfície e fundo) durante o ensaio n° 4 - fase 2 –  $H = 0,80$

A FIG. 5.8a apresenta os resultados obtidos a partir dos ensaios 11, 12, 13 e 14 na lagoa 2, que ocorreram durante o inverno, na fase 2. Os pontos em azul, verde e vermelho representam a temperatura na superfície, meio e fundo da lagoa, respectivamente. Nesta fase a lagoa operou em profundidade ainda mais reduzida (0,44 m) e com chicanas. O valor zero no eixo das abscissas corresponde a 00:00h do dia 28/07/2014. As linhas pretas verticais no gráfico indicam a separação entre os ensaios. Já a FIG. 5.8b apresenta os resultados obtidos a partir dos ensaios 16, 17, 19, 20 e 21, na lagoa 2, fase 2, durante o verão e outono. O valor zero no eixo das abscissas corresponde a 00:00h do dia 21/02/2015. Devido a uma interrupção no fornecimento de energia durante o ensaio 19, há uma falha de aproximadamente três dias na série.



**FIGURA 5.8:** Perfil de temperatura na lagoa 2 (a) durante os ensaios 11, 12, 13 e 14, no inverno e (b) durante os ensaios 16, 17, 19, 20 e 21, no verão/outono. Fase 2, lagoa 2 com chicanas e  $H = 0,44\text{m}$ .

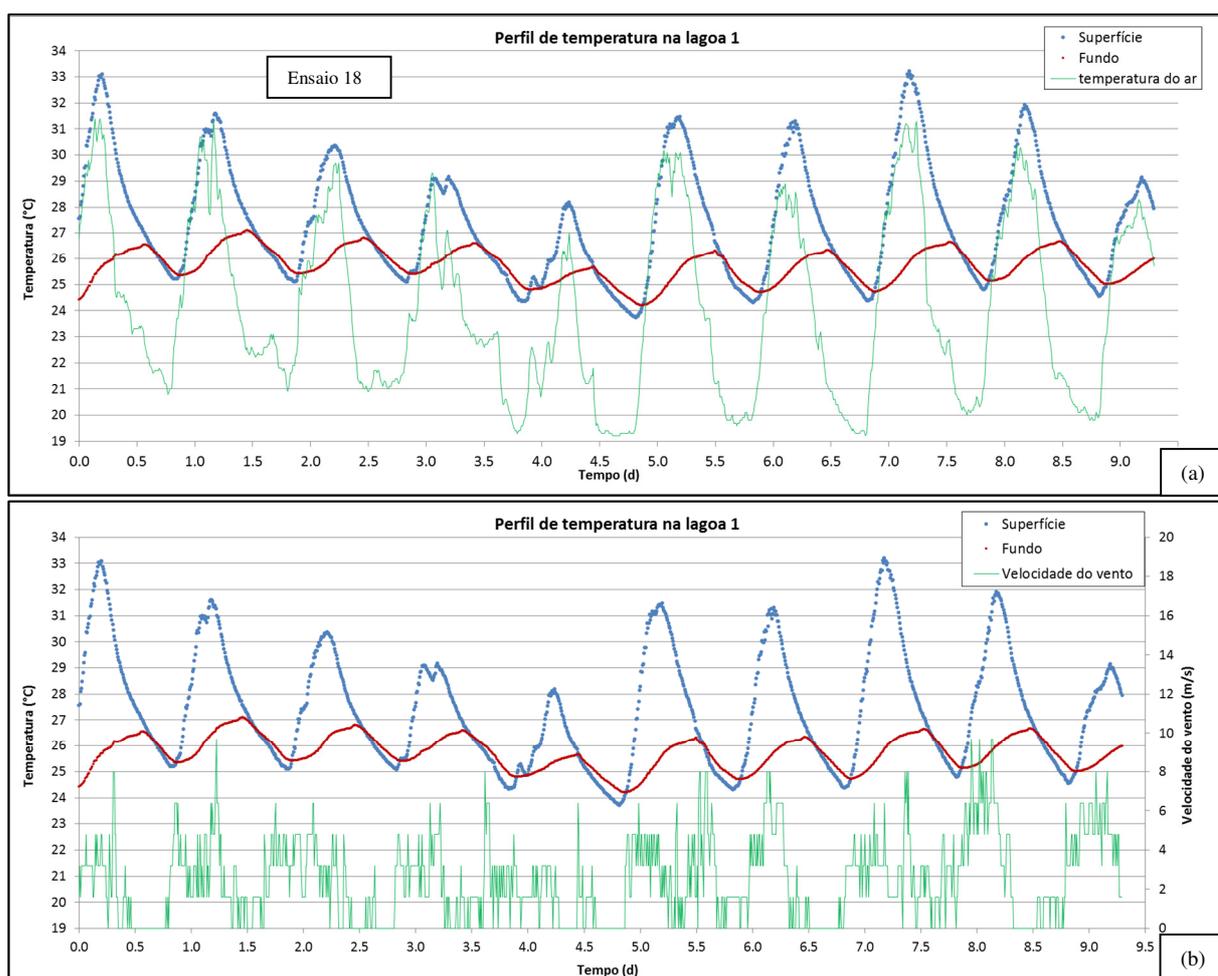
Da mesma forma que na FIG. 5.7, nota-se claramente na FIG. 5.8a a ocorrência de eventos periódicos de estratificação térmica seguidos de mistura/desestratificação em todos os ensaios. Também como nos casos anteriores, tais eventos ocorreram a cada período de um dia, mas nestes ensaios o início da estratificação ocorria aproximadamente às 08h, atingia a diferença

máxima por volta das 13h e a mistura vertical ocorria novamente por volta das 21h. Observando-se os resultados dos ensaios na mesma lagoa durante a fase anterior (ensaios 1 e 2, não apresentados aqui), na qual a mesma operava com quase o dobro da profundidade e sem chicanas, nota-se que a lagoa 2 permaneceu por mais tempo estratificada na fase 1 que nas condições destes ensaios (fase 2), mas ainda com ciclos diários de oscilações da temperatura. O período em que a lagoa 2 ficou em mistura vertical nestes ensaios foi de 11 horas. Observa-se que há pouca diferença perceptível no comportamento da temperatura nas diferentes profundidades entre os ensaios 11 e 12 e entre os ensaios 13 e 14 (quando apenas o local de monitoramento na lagoa é alterado). Já comparando os ensaios 11 e 12 com os ensaios 13 e 14, nota-se aumento das amplitudes de temperatura em função da elevação da sonda da superfície em 3 cm (um pouco mais próximo da interface água-ar). Foram observados gradientes situados até na faixa dos 30 °C/m durante os ensaios 13 e 14.

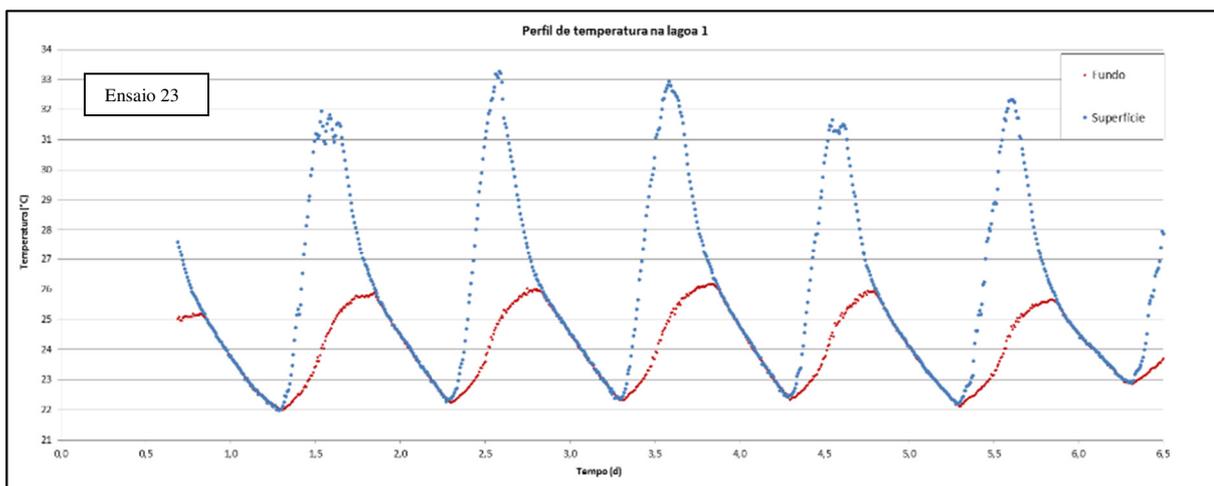
Na FIG. 5.8b também se observa claramente a ocorrência de eventos periódicos de estratificação térmica seguidos de mistura/desestratificação sistematicamente em frequência diária, em todos os ensaios, mesmo naqueles realizados durante o verão. Nestes ensaios, a estratificação se inicia nas proximidades de 07h-08h, atingindo a máxima diferença de temperatura entre as camadas por volta das 15h e igualando as temperaturas novamente por volta das 21h, de forma bastante semelhante aos ensaios na mesma lagoa durante o inverno. Observa-se que as amplitudes de temperatura dos ensaios 19, 20 e 21 (ocorridos no outono) foram menores que as dos ensaios 16 e 17. Nota-se também que não há diferença perceptível no comportamento do perfil térmico em relação ao local do monitoramento no primeiro canal da lagoa 2.

Os ensaios 16 e 17 (FIG. 5.8b) aconteceram com as sondas bem próximas à entrada do afluente, a uma distância de 0,5m, onde há maior turbulência do fluido. A intenção foi de verificar se a quantidade de movimento e a turbulência fornecidas pelo fluxo de entrada eram capazes de evitar a estratificação. Os dados sugerem que não, visto que foram observados os mesmos ciclos diários de estratificação, apesar de ser sugerido na literatura que a mistura na entrada poderia reduzir esse efeito. Há de se ressaltar que o fluido afluente à lagoa 2 tende a apresentar temperatura semelhante ao fluido nas proximidades do local de chegada, já que esse fluxo é proveniente da primeira lagoa da série. Tanto a tomada d'água na saída da lagoa 1 quanto a chegada do efluente na lagoa 2 ocorrem na superfície.

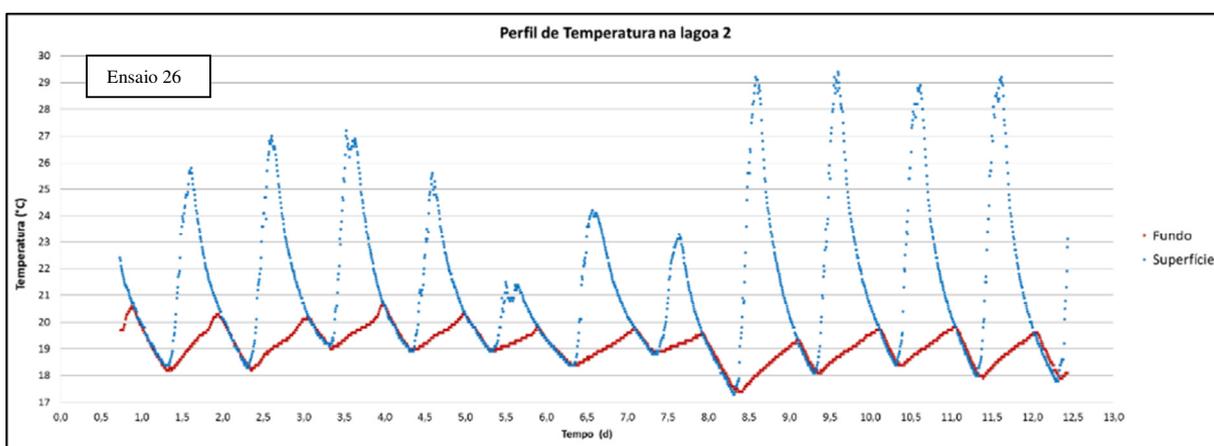
Resultados de outros ensaios estão apresentados nas figuras abaixo (FIG. 5.9, 5.10 e 5.11) corroborando o comportamento típico da temperatura no perfil vertical das lagoas. As figuras detalham o local de monitoramento, bem como apresentam a identificação do ensaio, sempre com início às 00:00h do dia correspondente. Na FIG. 5.9 os dados de temperatura são apresentados com dados ambientais da estação meteorológica no mesmo gráfico, para o mesmo período. Nota-se que a temperatura do ar tende a acompanhar a tendência de variação na superfície da lagoa, mas sempre com valores inferiores. Em relação ao vento, os gráficos não permitem influência clara do vento na indução da desestratificação, visto que a ocorrência de ventos com maiores velocidades coincide com períodos em que as lagoas permanecem estratificadas (durante o dia). Esta relação será analisada de forma mais global em item adiante.



**FIGURA 5.9:** Perfil de temperatura na lagoa 1 durante o ensaio n° 18 (pontos em azul e vermelho) apresentados com (a) registros da temperatura do ar no mesmo período (linha em amarelo) e (b) registros da velocidade do vento no mesmo período (linha em amarelo) – Fase 2, lagoa com lodo e  $H = 0,44\text{m}$ .



**FIGURA 5.10:** Perfil de temperatura na lagoa 1 durante o ensaio nº 23 (pontos em azul e vermelho) – Fase 2, lagoa com lodo e H = 0,85m.



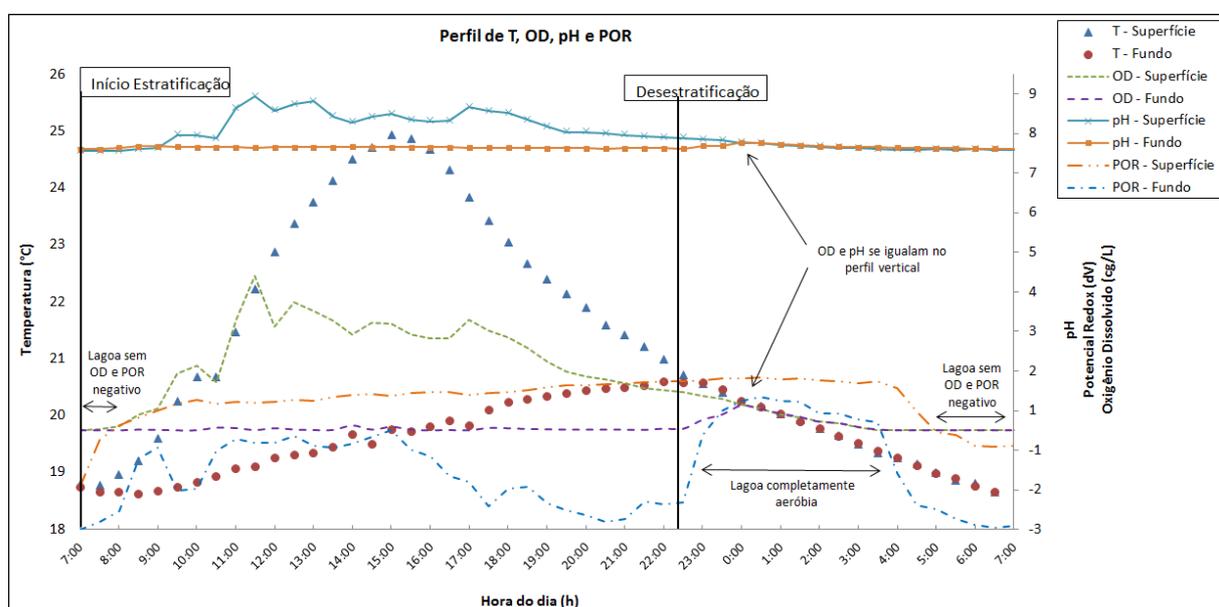
**FIGURA 5.11:** Perfil de temperatura na lagoa 2 durante o ensaio nº 26 - Fase 2, lagoa 2 com chicanas e H = 0,44m.

### 5.1.3.2 Perfil típico ao longo de um dia

Para efeitos de exemplificação do comportamento típico das lagoas ao longo de um dia no que diz respeito ao seu perfil vertical, consideraram-se os dados de monitoramento na lagoa 1 das 07h da manhã do dia 23/06/14 (para coincidir o início do ciclo com o início da estratificação térmica) até as 07h do dia 24/06/14, para as variáveis T, OD, POR e pH (FIG. 5.12). Apesar de a figura ser complexa, por conter oito curvas, seu objetivo é de síntese didática de um comportamento típico. É possível observar claramente as principais características já mencionadas, como o início da estratificação térmica acompanhado quase que imediatamente da estratificação química (gradientes de OD, pH), gradiente máximo por volta das 15h e a mistura vertical ocorrendo pouco tempo depois da desestratificação térmica (comprovado pela elevação do OD e pH de fundo), sugerindo que o gradiente limite para quebra da estratificação é provavelmente ainda menor que a referência utilizada (0,6 °C/m), em um valor próximo de

zero. Considerando a precisão das medições de temperatura, é possível afirmar que o gradiente limite foi menor que  $0,01^{\circ}\text{C}/\text{m}$  para as condições deste estudo.

Após cerca de duas horas do início da mistura nota-se que os teores de OD são igualados no perfil vertical, assim como o pH. Também é possível notar que, após a desestratificação, o POR do fundo (que é predominantemente negativo) fica positivo por um período de tempo, denotando aerobiose completa da lagoa ao longo da sua profundidade. Logo após esse período todo o OD é consumido e a partir de certo momento (por volta das 05h) a lagoa passa a operar com ausência de OD e com POR negativo.



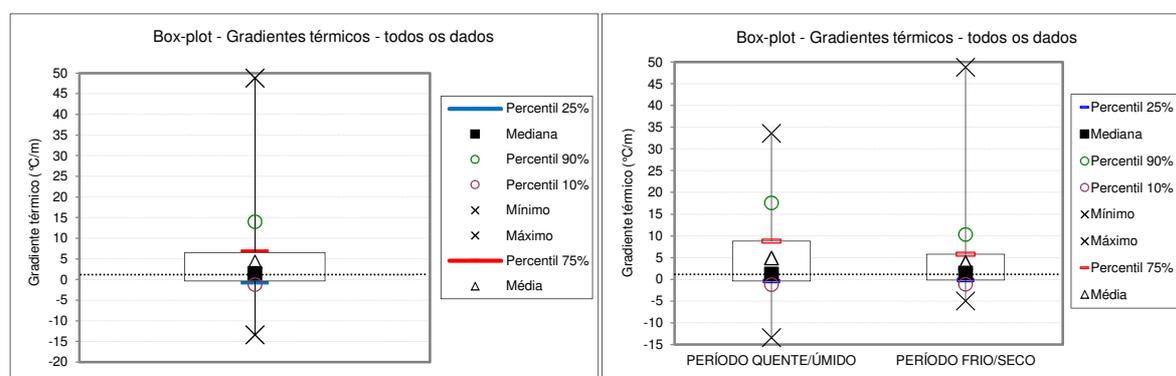
**FIGURA 5.12:** Perfil vertical típico ao longo de um dia para as variáveis T, OD, pH e POR: monitoramento na lagoa 1 das 07h da manhã do dia 23/06/14 até as 07h do dia 24/06/14.

### 5.1.3.3 Estatística descritiva dos dados de gradiente térmico

De forma geral, o início da estratificação térmica ocorreu no início da manhã em todos os ensaios, mais frequentemente entre 07h e 09h, e a quebra da desestratificação à noite, mais frequentemente entre 19h e 21h. Considerando todos os gradientes obtidos nos ensaios (em um total de 43951 dados), pode-se afirmar que a grande maioria esteve abaixo de  $14^{\circ}\text{C}/\text{m}$  (percentil 90%) durante os períodos de estratificação, mas foram encontrados gradientes térmicos de até  $49^{\circ}\text{C}/\text{m}$ . O gradiente médio foi de  $4,2^{\circ}\text{C}/\text{m}$  (mediana  $1,5^{\circ}\text{C}/\text{m}$ ). A elevada turbidez nas lagoas pode ser responsável por gradientes elevados, conforme afirmam Ukpong *et al.* (2006a, 2006b) e Kellner e Pires (2002), mesmo em lagoas de profundidades bastante reduzidas como as do presente estudo. Sweeney *et al.* (2005) relataram o gradiente térmico

médio de 0,4 °C/m (máximo de 11,7 °C/m e mínimo de -0,5°C/m no verão e outono, respectivamente) em uma lagoa de 112 ha na Austrália. Para essa mesma lagoa, os eventos de estratificação duraram em média 2,8h (máxima duração de 35,5 h e mínima de 0,2 h). Abis e Mara (2005) encontraram gradientes máximos de pouco mais que 20°C/m em lagoas experimentais no Reino Unido (clima temperado). Ressalta-se que as equações disponíveis nos textos de limnologia, para avaliação da estratificação térmica em lagos, não se aplicam para as lagoas rasas.

A FIG. 5.13a apresenta a estatística descritiva de todos os dados de gradiente térmico por meio de apresentação em gráfico *box-plot*. A linha pontilhada indica o gradiente limite para ocorrência da estratificação tomado como referência (0,6 °C/m). Considerando todos os dados analisados (n = 43951 dados), nota-se, nas condições deste estudo, que as lagoas permaneceram 56% do tempo sob estratificação térmica e 44% em mistura vertical. A FIG. 5.13b apresenta os mesmos dados separados nos períodos quente/úmido (primavera e verão) e frio/seco (outono e inverno), na qual não se notou diferença significativa entre os dados de gradiente ao grau de confiança de 99% (*p*-valor = 0,48). Ressalta-se que, nas condições tropicais do local do estudo, não há grande diferença entre as temperaturas de verão e inverno, como ocorre em locais de clima temperado. Estes resultados são, portanto, característicos de lagoas em climas tropicais.

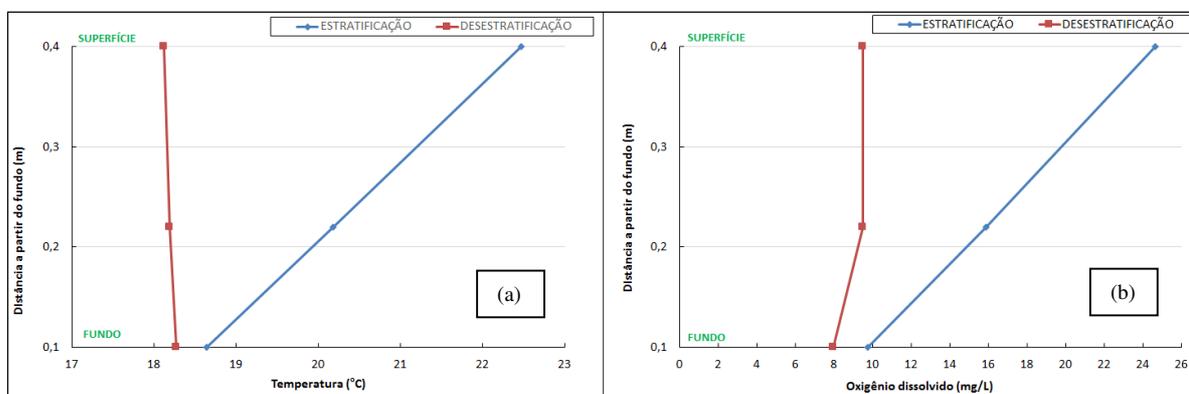


**FIGURA 5.13:** Estatística descritiva dos dados de gradiente térmico nas lagoas do CePTS UFMG/COPASA, (a) considerando todos os dados e (b) segregando os dados por período sazonal.

#### 5.1.3.4 Perfis verticais médios de temperatura e OD para a lagoa 2 – fase 2

A partir dos dados dos ensaios 11, 12, 13 e 14 na lagoa 2, fase 2 (em séria com a primeira lagoa e com chicanas longitudinais), únicos que aconteceram com monitoramento em três pontos ao longo da profundidade, foi traçado o perfil térmico da lagoa com a média dos dados de temperatura em cada profundidade em dois períodos: quando a unidade estava em período de

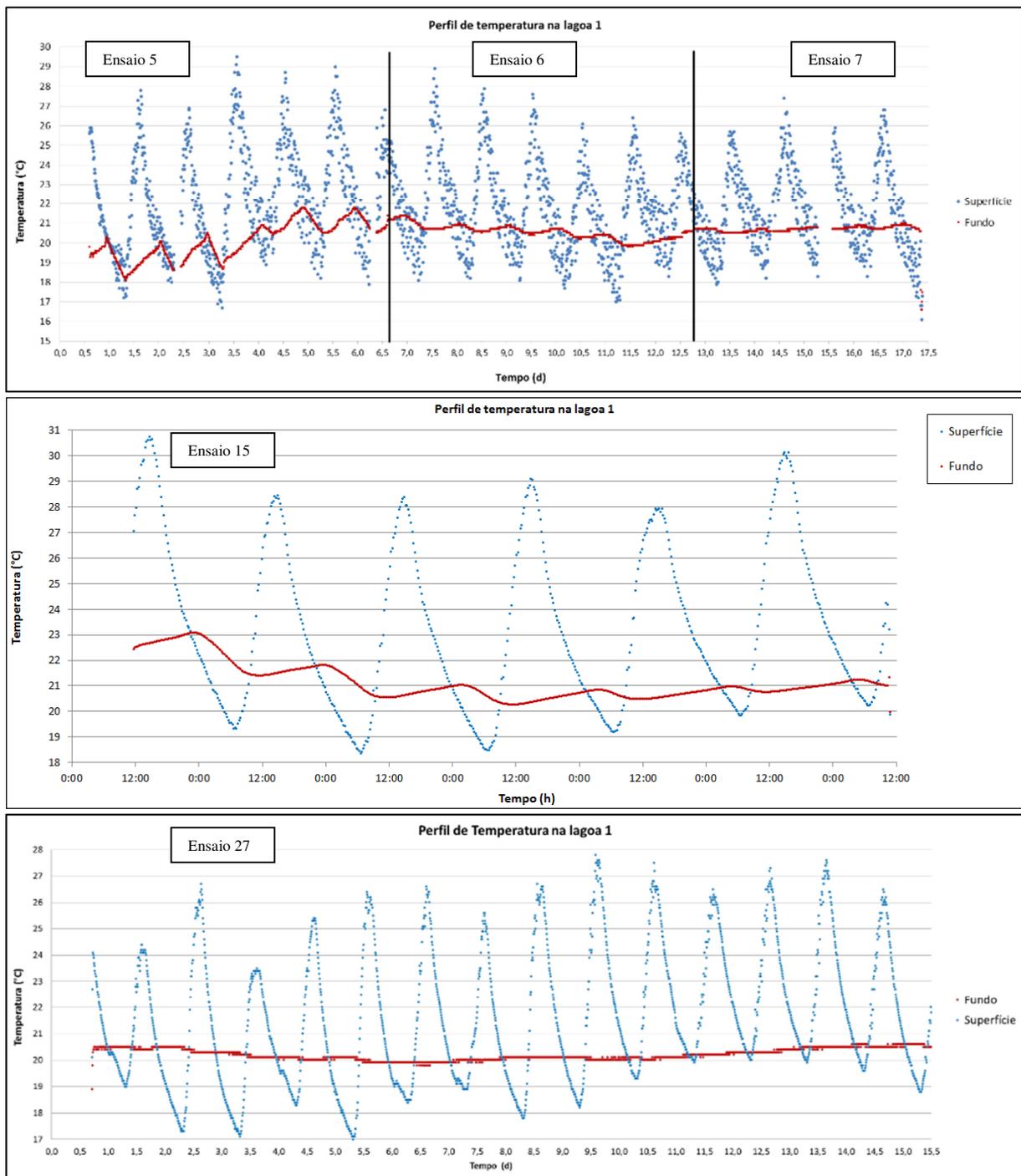
estratificação e quando em mistura vertical (respectivamente as linhas azuis e vermelhas na FIG. 5.14a). Nota-se claramente a distinção do perfil térmico entre esses dois períodos. A FIG. 5.14b apresenta o perfil de OD para esses mesmos períodos, corroborando novamente a ocorrência da mistura entre as camadas líquidas quando da desestratificação.



**FIGURA 5.14:** Perfil vertical médio de (a) temperatura e (b) oxigênio dissolvido em períodos de estratificação e mistura vertical na lagoa 2 - ensaios 11, 12, 13 e 14 na fase 2 de operação.

#### 5.1.3.5 Ocorrências de gradientes térmicos negativos

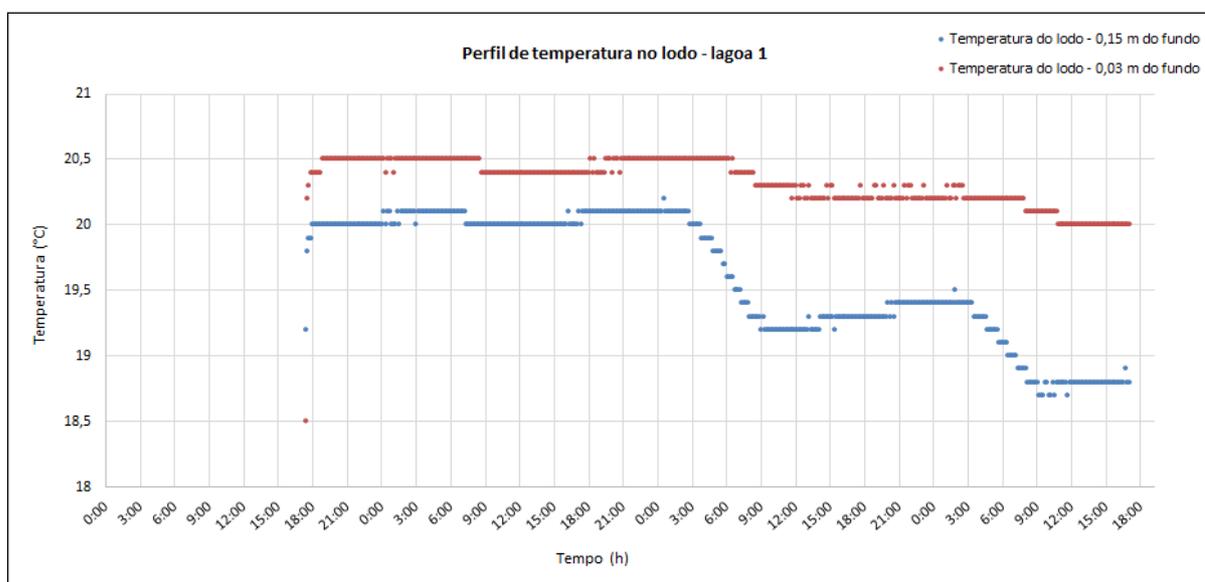
Os gradientes negativos que podem ser observados na FIG. 5.15 foram obtidos principalmente nos ensaios de n° 2, 3, 5, 6, 7, 15 e 27, realizados na lagoa 1, com lodo acumulado e com a sonda de fundo imersa nele. Durante esses ensaios foram registradas temperaturas de fundo maiores que da superfície no período noturno, após a desestratificação, indicando que o lodo tem papel fundamental no balanço térmico das lagoas; provavelmente acumulando calor durante o dia e passando a fornecer calor à massa fluida durante a noite. A FIG. 5.16 ilustra esse comportamento apresentando exemplos típicos de ensaios quando a sonda de fundo estava imersa no lodo. Os resultados correspondem aos ensaios de n° 15 (com as sondas posicionadas no centro da lagoa) e de n° 5, 6, 7 e 27 (com as sondas posicionadas em regiões próximas à saída da lagoa). O valor zero no eixo das abcissas corresponde a 00:00h de cada dia de início correspondente. Os dados sugerem pouca variação da temperatura em um ponto dentro do lodo na lagoa.



**FIGURA 5.15:** Perfil de temperatura (superfície e fundo) na lagoa 1 durante os ensaios n° 5, 6, 7, 15 e 27, todos com a sonda de fundo imersa no lodo. H = 0,80 m.

Não foram encontrados registros na literatura de estudos sobre a influência do lodo nas condições de estratificação e desestratificação. Entretanto, Shilton (2005) menciona que dois estudos separados, não publicados, realizados na Nova Zelândia, sugeriram que a camada de lodo frequentemente apresenta temperaturas maiores que a camada de fluido acima dela; tal como nos eventos de gradientes negativos encontrados neste estudo. Segundo o autor, é possível que, nestes casos, a camada de lodo (mais quente e menos densa devido a presença de

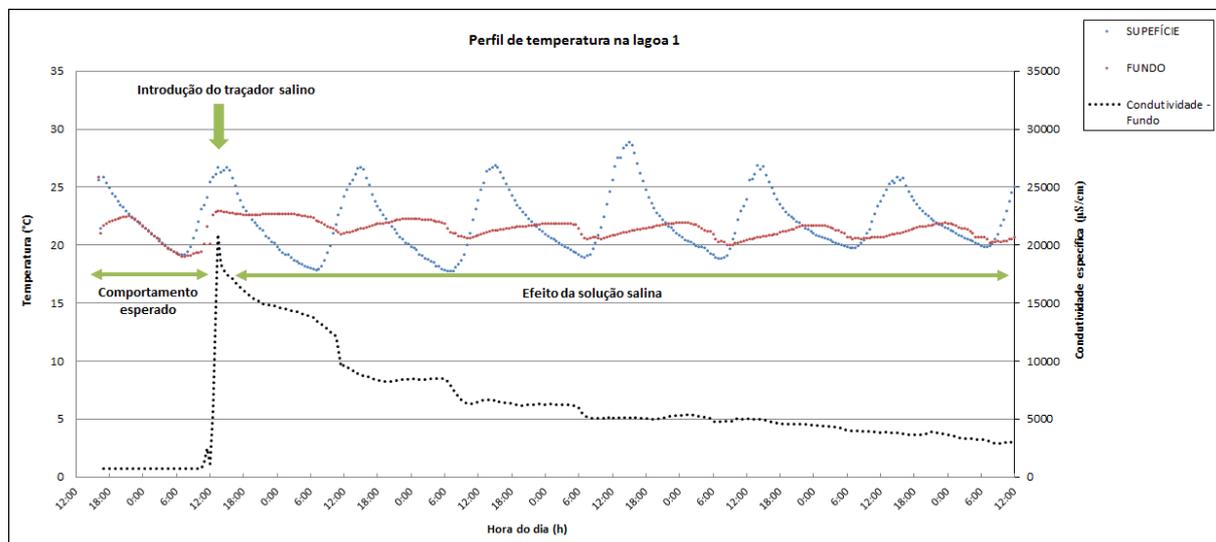
gases) venha a ascender na lagoa provocando a mistura vertical, ao invés do resfriamento das camadas superiores. A fim de verificar esta hipótese, testes foram realizados neste trabalho com duas sondas completamente imersas no lodo da lagoa 1, em diferentes profundidades. A FIG. 5.16 apresenta o resultado do teste realizado do dia 31/07/15 ao dia 03/08/15, com uma sonda a 0,03 m do fundo (mais profunda, com marcadores vermelhos) e outra a 0,15 m do fundo (marcadores azuis). Não foi observado neste ensaio nenhum comportamento que indicasse movimentação vertical das camadas no lodo, como a equalização da temperatura nos dois pontos. O monitoramento revelou que as camadas mais profundas do lodo apresentam maior temperatura que as camadas mais superficiais, mas ainda assim o lodo permanece estável com gradientes térmicos negativos. Neste caso, tal fenômeno ocorre muito provavelmente devido à concentração de sólidos, que tende a aumentar ao longo da profundidade, aumentando também a densidade e possibilitando a manutenção de maiores temperaturas no fundo.



**FIGURA 5.16:** Perfil de temperatura do lodo na lagoa 1, com as sondas em diferentes profundidades.

Gradientes térmicos negativos também ocorreram quando o monitoramento da temperatura coincidia com períodos de ensaios com traçador salino (cloreto de sódio) na mesma lagoa. Nesses casos, a solução do traçador era responsável por aumentar a densidade das camadas de fundo, impedindo a mistura com as camadas superiores, permitindo assim que as camadas de fundo apresentassem temperaturas maiores que na superfície. A FIG. 5.17 ilustra esse efeito com os dados do ensaio 3, no qual se observa um período de estratificação e outro de mistura vertical antes do lançamento da solução salina (comportamento esperado) e então a ocorrência de gradientes térmicos negativos após o lançamento, com mudança completa do perfil térmico.

Nesse ensaio, a condutividade na lagoa chegou a atingir patamares da ordem de 20000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Nota-se também que esses gradientes negativos, proporcionais à amplitude térmica, reduziram gradativamente em magnitude à medida que a concentração do traçador (indicada pela condutividade elétrica, em pontos pretos) ia diminuindo.



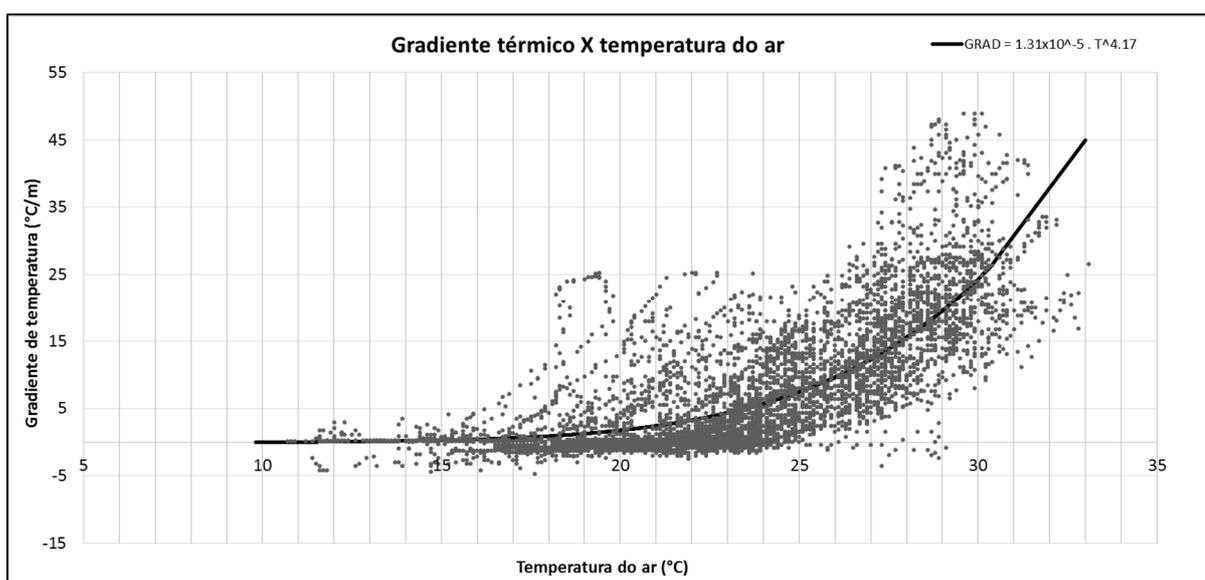
**FIGURA 5.17:** Perfil de temperatura (superfície e fundo) e condutividade (fundo) na lagoa 1 durante o ensaio n° 3 (fase 2), com realização de ensaio de traçador. H=0,80m

A influência do traçador salino no perfil térmico da lagoa também pode ser percebida FIG 5.8, na qual pode ser notada a perturbação causada pela introdução de traçador no início do ensaio 14 (inversão momentânea do perfil térmico). Este fato chama a atenção para a necessidade de cuidados na interpretação dos dados de perfil térmico quando o teste ocorre simultaneamente ao de um traçador salino, já que os resultados podem mostrar um perfil que não ocorre naturalmente ou interromper o ciclo. A recíproca também deve ser considerada, visto que as medições do traçador na superfície revelaram oscilações na concentração em ciclos diários, acompanhando as variações térmicas. Assim, dados de traçador salinos devem ser analisados considerando o fenômeno de estratificação e desestratificação térmica, já que o perfil térmico influencia na concentração de traçador a ser registrada. Do mesmo modo, é de se esperar que a presença de um gradiente vertical de concentração de sólidos, devido a turbidez, algas, lodo ou demais partículas em suspensão, podem constituir fatores intervenientes de grande relevância para o balanço térmico nas lagoas.

#### 5.1.3.6 Efeito das condições ambientais no perfil térmico das lagoas

Testes estatísticos - correlação de Spearman e Pearson a 99% de confiança - demonstraram correlação significativa entre o gradiente térmico e a temperatura do ar no local, mas não entre

o gradiente térmico e a velocidade do vento. A FIG. 5.18 apresenta o gráfico de dispersão entre temperatura do ar e gradiente térmico, considerando todos os eventos em que os dados da estação meteorológica (temperatura do ar) e os dados de temperatura nas lagoas foram registrados exatamente ao mesmo tempo ( $n = 9016$ ), bem como o ajuste de uma equação do tipo  $Y=A.X^B$ . Considerando o conjunto de todos os dados isolados (não agrupados por estações sazonais), nota-se associação entre gradientes mais elevados e os dias mais quentes, bem como eventos de mistura nas lagoas associados ao resfriamento do ar. A correlação entre as variáveis foi significativa, positiva, com  $p$ -valor  $< 0,01$ . O coeficiente de correlação de Spearman ( $r_s$ ) foi de 0,7557. Ressalta-se que os dados de vento foram registrados na estação meteorológica e não imediatamente acima do espelho d'água.

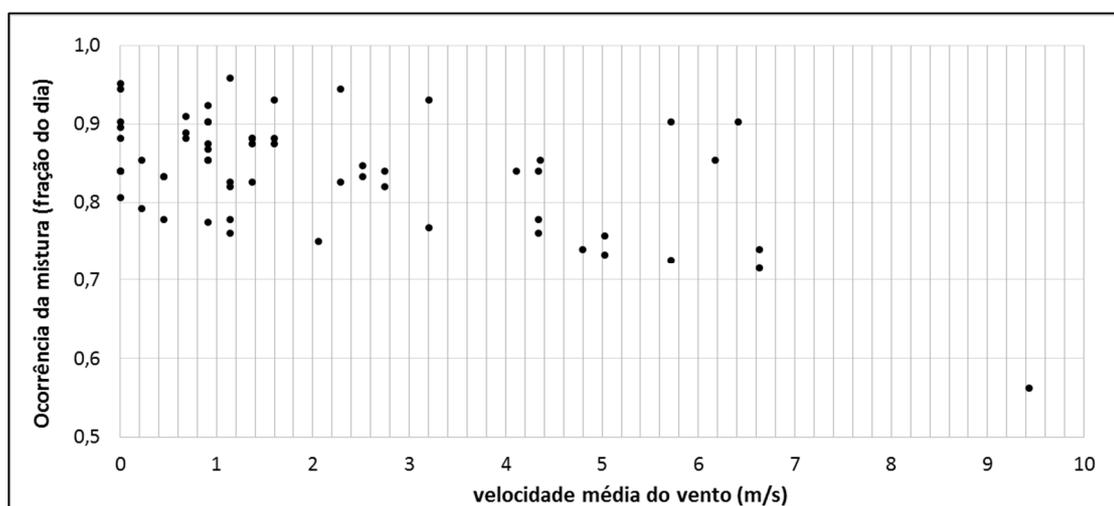


**FIGURA 5.18:** Gráfico de dispersão entre temperatura do ar e gradiente térmico observado nas lagoas, com ajuste de equação preditiva.

Para obtenção do melhor ajuste dos coeficientes do modelo, utilizou-se método iterativo com auxílio da ferramenta solver do Microsoft Excel®, a partir da qual foi encontrado o valor dos coeficientes “A” e “B” que minimizava a raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE) entre os gradientes de temperatura previstos pelo modelo e os gradientes observados, na faixa de temperatura do ar entre a mínima observada ( $9,8^{\circ}\text{C}$ ) e a máxima ( $33^{\circ}\text{C}$ ). A equação resultante para obtenção do gradiente térmico na lagoa (GRAD, em  $^{\circ}\text{C}/\text{m}$ ) em função da temperatura do ar (T, em  $^{\circ}\text{C}$ ) está apresentada a seguir, bem como o valor de  $R^2$  obtido do ajuste. O erro mínimo atingido após as iterações foi de  $6^{\circ}\text{C}/\text{m}$ .

$$GRAD = 1.31 \times 10^{-5} \cdot T^{4.17} \quad (R^2 = 0,64) \quad (5.4)$$

Apesar de as variáveis gradiente térmico e velocidade do vento não estarem relacionadas ao nível de significância adotado nos testes estatísticos, a quebra da estratificação parece ocorrer mais cedo em um dia quando em condições de ventos mais fortes. Ao se comparar o momento da ocorrência da mistura (atribuído aqui como a fração do dia, de 0 a 1, em que o gradiente térmico passa a ser menor que  $0,6^{\circ}\text{C}/\text{m}$ ) com a respectiva velocidade média do vento na última hora (média de todos os dados registrados), observou-se, apesar da grande dispersão dos dados, correlação negativa significativa entre as duas variáveis ao nível de confiança de 99%, tanto no teste de correlação de Pearson (p-valor = 0,0001;  $r = -0,4647$ ) quanto no teste de correlação de Spearman (p-valor = 0,0097;  $r_s = -0,3211$ ), sugerindo que, apesar de não ser o fator determinante, o vento contribui com a ocorrência da mistura, já que ventos mais fortes parecem estar associados aos eventos de desestratificação que ocorreram mais cedo no dia (FIG. 5.19).



**FIGURA 5.19:** Gráfico de dispersão entre o momento da ocorrência da mistura (fração do dia em que o gradiente térmico passa a ser menor que  $0,6^{\circ}\text{C}/\text{m}$ ) e a velocidade média do vento registrada na última hora.

Tal como nos resultados deste trabalho, Abis e Mara (2006) concluíram que o principal fator para a quebra da estratificação em lagoas de estabilização experimentais no Reino Unido foi a queda da temperatura do ar, afirmando que nem o fluxo de entrada nem a velocidade do vento tiveram impacto significativo no perfil térmico. Atribuíram este fato à pequena área das lagoas ( $33,6 \text{ m}^2$ ,  $40,6 \text{ m}^2$  e  $39,5 \text{ m}^2$ ).

#### 5.1.3.7 Síntese conclusiva / pontos mais relevantes

Foi possível observar com os dados apresentados que, de forma geral, há eventos periódicos diários de estratificação térmica seguidos de desestratificação e mistura vertical, em ambas as lagoas e fases de operação, independentemente do local de monitoramento no plano horizontal.

A mistura vertical foi confirmada a partir de dados de qualidade da água monitorados ao mesmo tempo. Os dados sugerem que, quanto maior a profundidade de operação, maior o tempo em que as lagoas podem permanecer estratificadas, mas a mistura/desestratificação não deixa de ocorrer. Gradientes de temperatura situados até na faixa dos 49 °C/m foram encontrados durante os períodos de estratificação, sugerindo que mesmo em lagoas rasas é comum o acontecimento desse fenômeno, inclusive com gradientes bastante elevados.

Durante alguns ensaios foram registradas temperaturas de fundo na lagoa maiores que na superfície (no período noturno, após a desestratificação), resultando em gradientes térmicos negativos. Esses gradientes negativos observados neste estudo apontam a camada de lodo como fator crucial ao balanço térmico de lagoas, devendo ser considerada em modelos matemáticos e computacionais que levem em consideração essa variável. Além disso, o monitoramento no perfil do lodo revelou que as camadas mais profundas apresentam maior temperatura que as camadas mais superficiais, aparentemente sem provocar movimentação vertical com ascensão do material sedimentado. A partir de tais constatações, é possível imaginar cenários em que a camada do lodo poderia ser utilizada como ferramenta de projeto para evitar a estratificação térmica, via associação, por exemplo, com outros materiais e procedimentos operacionais para aproveitamento do calor acumulado com vistas a provocar a convecção forçada em momento de estratificação. Gradientes negativos obtidos em ensaios sem a presença do lodo evidenciaram a grande interferência de ensaios com traçadores salinos no perfil térmico da lagoa, e também a recíproca, alertando para a necessidade de cuidados na interpretação dos dados desses testes quando ocorrem simultaneamente.

Quanto à desestratificação térmica (ou mistura vertical), os dados sugerem que este evento está muito mais relacionado ao resfriamento da temperatura do ar que à ação do vento. Entretanto, apesar de não serem determinantes, ventos mais fortes parecem contribuir com a antecipação dessa mistura. A turbulência causada pelo fluido na região de entrada da lagoa também não foi capaz de evitar a estratificação. Considerando a precisão das medições de temperatura, é possível afirmar que o gradiente limite para quebra da estratificação foi menor que 0,01° C/m para as condições deste estudo.

Em termos de qualidade da água, sabe-se que a estratificação térmica pode ser prejudicial, quando se considera a redução do TDH real por ocorrência do curto-circuito hidráulico. Por sua vez, a mistura vertical pode proporcionar melhor aproveitamento do volume da lagoa, bem

como pode promover a oxigenação de uma maior parcela da massa líquida (tal como observado neste trabalho) e melhor distribuição de compostos químicos. No aspecto de remoção de patógenos, pode contribuir com a maior exposição de microorganismos às camadas mais superficiais da lagoa (para exposição aos raios solares) e no contato desses microorganismos com o oxigênio. Quanto à suspeita de que a mistura vertical pode provocar ressuspensão de sólidos (o que pode provocar deterioração da qualidade do efluente), é possível que não ocorra sistematicamente. Neste trabalho, o monitoramento da temperatura em duas profundidades na camada de lodo não sugeriu movimentação durante os períodos de mistura vertical.

## **5.2 Ensaios hidrodinâmicos de campo**

### **5.2.1 Análises uni e bidimensionais de fluxo**

#### **5.2.1.1 Ensaios com *drogues***

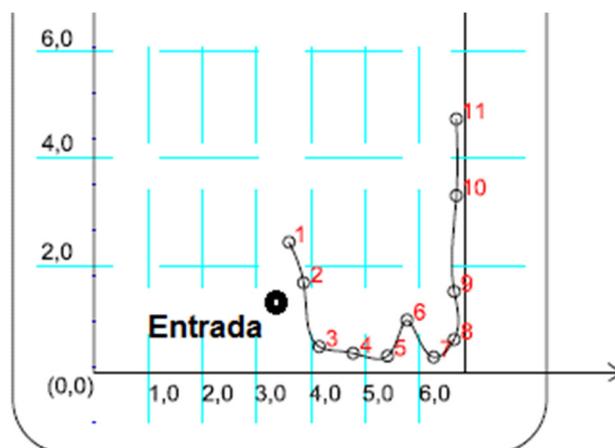
Os *drogues* se confirmaram como método satisfatório para obtenção de informações bidimensionais úteis a respeito do fluxo em lagoas. As trajetórias registradas com os *drogues* manuais (sem GPS) revelaram tendências de comportamento do fluxo, bem como permitiram a obtenção de vetores de velocidade nas lagoas. As trajetórias registradas com a variação do *drogue* que continha um GPS embutido foram validadas após exportação dos dados para o *software* Google Earth®, a partir da verificação de pontos de referência, tais como locais de preparação do dispositivo e pontos de lançamento. Alguns dos ensaios com o *drogue* com GPS tiveram pouca precisão, provavelmente pela fraca recepção de satélites.

Como muitas das trajetórias se repetem em termos de tendência, somente os principais resultados com os *drogues* são apresentados aqui.

#### **Lagoa 1**

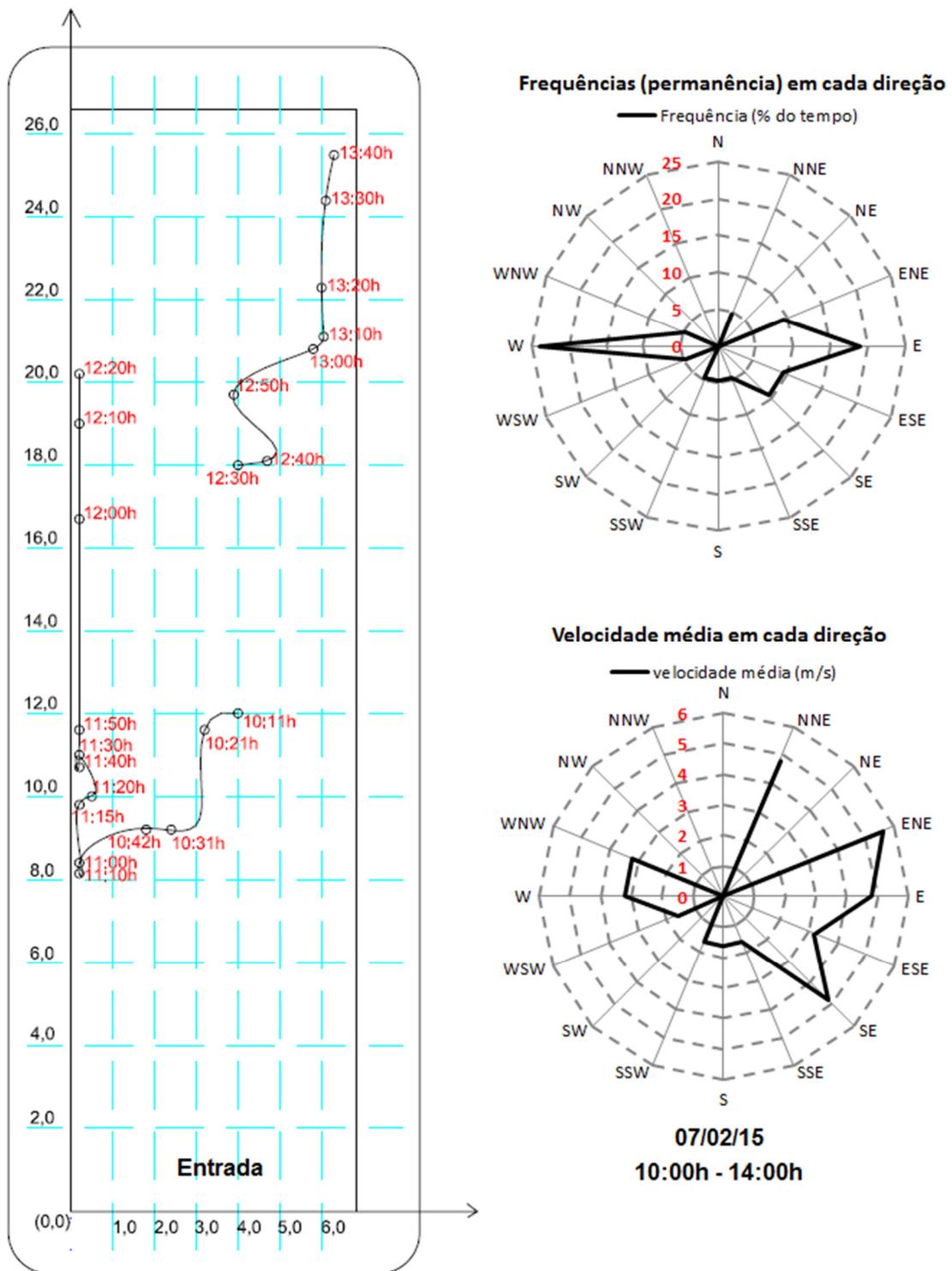
A FIG. 5.20 ilustra a trajetória executada pelo *drogue* vertical n° 3 (centro do atuador a 0,24 m de profundidade) na lagoa 1 no ensaio do dia 21/04/14, com início às 15h. O *drogue* foi lançado a cerca de 1m depois do dispositivo de entrada. Neste teste os horários em cada ponto não foram registrados, apenas sua localização, apresentada na figura em sequência numérica. A estação meteorológica ainda não estava operando neste período, mas registrou-se, após medições com anemômetro manual e observação de uma biruta situada próximo ao centro

experimental, que o vento soprava no sentido oeste da lagoa (inclusive, mesmo sentido predominante). Nota-se neste teste que o *drogue* revelou uma linha de fluxo que partiu em contrafluxo desde o ponto de lançamento até próximo ao talude de entrada, quando passou a seguir pela lateral direita da lagoa (lateral leste) em direção à saída.



**FIGURA 5.20:** Representação gráfica em sequência numérica da trajetória executada pelo *drogue* vertical n° 3 (centro do atuador a 0,24 m de profundidade) na lagoa 1 - teste do dia 21/04/14 no CePTS UFMG/COPASA.

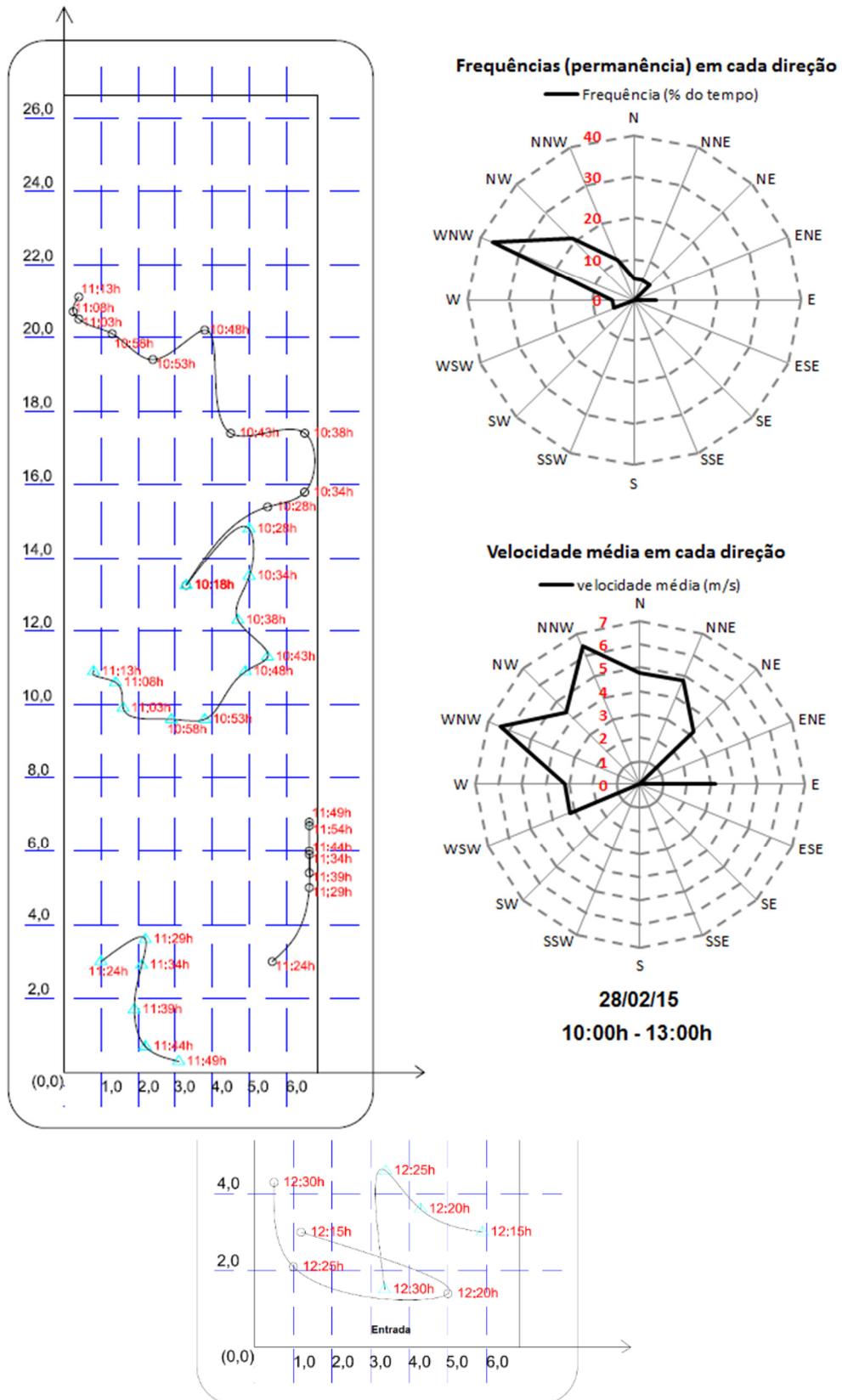
A FIG. 5.21 ilustra duas trajetórias executadas pelo *drogue* vertical n° 1 (centro do atuador a 0,16m de profundidade) na lagoa 1 em ensaios realizados no dia 07/02/15. O *drogue* foi lançado em dois pontos na linha central longitudinal da lagoa, primeiro a aproximadamente 12m do seu comprimento (às 10:11h) e em seguida coletado para lançamento a aproximadamente 18m do seu comprimento (às 12:30h). Neste teste os horários em cada ponto foram registrados e apresentados na figura. A estação meteorológica registrou ventos predominantes no sentido oeste até aproximadamente 12:00h e depois ventos predominantes na direção leste após este horário. O anemograma para todo o período está apresentado na figura. A trajetória do *drogue* lançado a 12m do comprimento revelou uma linha de fluxo que partiu em contrafluxo no sentido sudoeste até o talude oeste da lagoa, quando passou a seguir em direção à saída em movimento retilíneo com velocidade aproximada de  $4 \times 10^{-3}$  m/s. A trajetória do *drogue* lançado a 18m do comprimento revelou uma linha de fluxo que partiu em sentido nordeste até o talude leste da lagoa, quando passou a seguir em direção à saída com velocidade aproximada de  $2 \times 10^{-3}$  m/s. Estes movimentos podem ter sido resultado do efeito combinado do vento em cada sentido com o próprio fluxo médio na lagoa, já que a trajetória sudoeste coincidiu com os ventos predominantes a oeste e a trajetória nordeste coincidiu com os ventos predominantes a leste.



**FIGURA 5.21:** Representação gráfica das trajetórias executadas pelo *drogue* vertical n° 1 (centro do atuador a 0,16 m de profundidade) na lagoa 1 e anemograma para o período - teste do dia 07/02/15 no CePTS UFMG/COPASA.

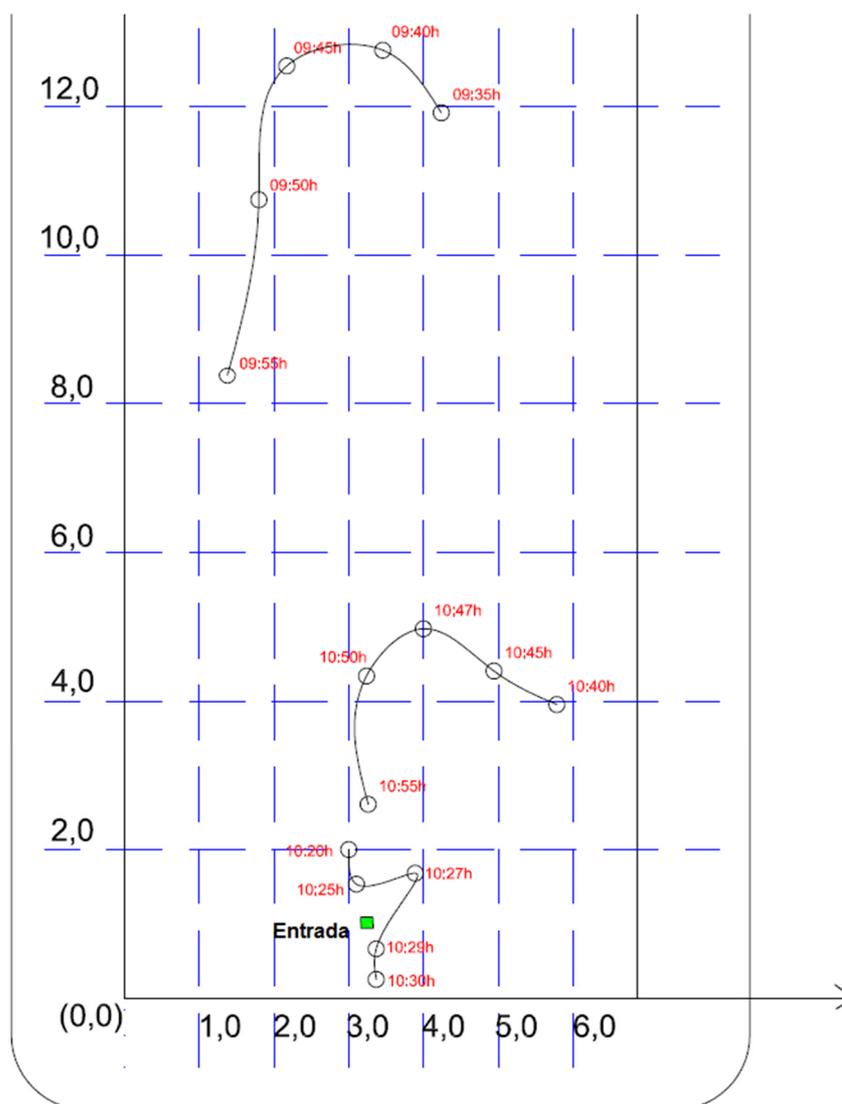
A FIG. 5.22 ilustra trajetórias executadas pelos *drogues* verticais n° 1 (pontos da trajetória marcados por círculos pretos; centro do atuador corresponde a 0,16m de profundidade) e n° 2 (pontos marcados por triângulos azuis; centro do atuador corresponde a 0,23m de

profundidade), na lagoa 1 em ensaios realizados no dia 28/02/15. Os *drogues* foram lançados ao mesmo tempo no ponto central da lagoa e individualmente em pontos próximos à entrada. Neste teste os horários em cada ponto foram registrados e apresentados na figura. A estação meteorológica registrou ventos predominantes no sentido oes-noroeste, com velocidades na faixa de 5 a 6 m/s. O anemograma para todo o período da campanha de monitoramento está apresentado na figura. Os *drogues* lançados ao mesmo tempo no centro da lagoa começaram a trajetória em um mesmo sentido (nordeste, mesmo dos ventos para o horário das 10:20h Às 10:40h), mas depois tomaram destinos opostos com tendência comum a oeste, sendo um na direção da saída e outro na direção da entrada da lagoa (ventos agora a oeste), sugerindo que estratos diferentes do fluido na lagoa apresentam vetores de velocidade também em sentidos opostos. Após cerca de 10:50h, os *drogues* registraram trajetórias semelhantes e de acordo com o vento, que soprava a oes-noroeste. As trajetórias dos *drogues* lançados mais próximo à entrada aparentemente sofreram menor influência do vento, que soprava predominantemente no sentido oes-noroeste. Os *drogues* nessa região revelaram uma tendência de seguir em direção à entrada (sentido contrário do teórico) quando mais afastados dos taludes laterais e uma tendência de seguir em direção à saída quando mais próximos aos taludes laterais. O *drogue* n° 1 na lateral direita da lagoa, lançado às 11:24h apresentou velocidade aproximada de  $2 \times 10^{-3}$  m/s quando chegou junto ao talude e seguiu em direção à saída. Os *drogues* lançados ao mesmo tempo em laterais opostas da lagoa às 12:15h, afastados cerca de 1m dos taludes, próximo à entrada, revelaram trajetórias inicialmente antagônicas e com tendência a se afastarem do talude. O *drogue* n° 2 chegou a ficar em frente ao dispositivo e entrada e seguir na direção dele, estacionando permanentemente (provavelmente preso ao lodo). O *drogue* n° 1 não ficou preso no banco de lodo e teve a tendência final de seguir pelo talude da esquerda em direção à saída.



**FIGURA 5.22:** Representação gráfica das trajetórias executadas pelos *drogues* verticais n° 1 (círculos pretos) e n° 2 (triângulos azuis) na lagoa 1 e anemograma para o período (centro do atuador a 0,16 e 0,23m de profundidade, respectivamente) - teste do dia 28/02/15 no CePTS UFMG/COPASA.

A FIG. 5.23 ilustra trajetórias executadas pelo *drogue* vertical nº 1 (centro do atuador a 0,16m de profundidade) na lagoa 1 em ensaios realizados no dia 13/04/16. O *drogue* foi lançado primeiramente em um ponto central da lagoa, em seguida em um ponto em frente ao dispositivo de entrada e por último em um ponto distanciado 1m da lateral direita (leste) da lagoa, também próximo à entrada. Nestes ensaios os horários em cada ponto também foram registrados e apresentados na figura. Houve falha no registro de dados da estação meteorológica neste período, por motivo ainda não conhecido. A trajetória do *drogue* lançado na região central revelou uma linha de fluxo que inicialmente teve a tendência de seguir em noroeste, mas logo em seguida partiu em contrafluxo no sentido da entrada e se aproximando do talude oeste. A trajetória do *drogue* lançado em frente ao dispositivo de entrada revelou uma linha de fluxo também no sentido sul, contrário ao da saída, chegando a passar em frente ao jato de entrada e ser impulsionado por ele em direção ao talude sul, onde permaneceu provavelmente preso ao lodo de fundo. A trajetória do *drogue* lançado a 1m da lateral direita (leste) da lagoa, também na região da entrada, revelou uma linha de fluxo que teve a tendência de se afastar do talude e logo em seguida partiu também no sentido do dispositivo de entrada.



**FIGURA 5.23:** Representação gráfica das trajetórias executadas pelo *drogue* vertical n° 1 (centro do atuador a 0,16 m de profundidade) na lagoa 1 - teste do dia 13/04/16 no CePTS UFMG/COPASA.

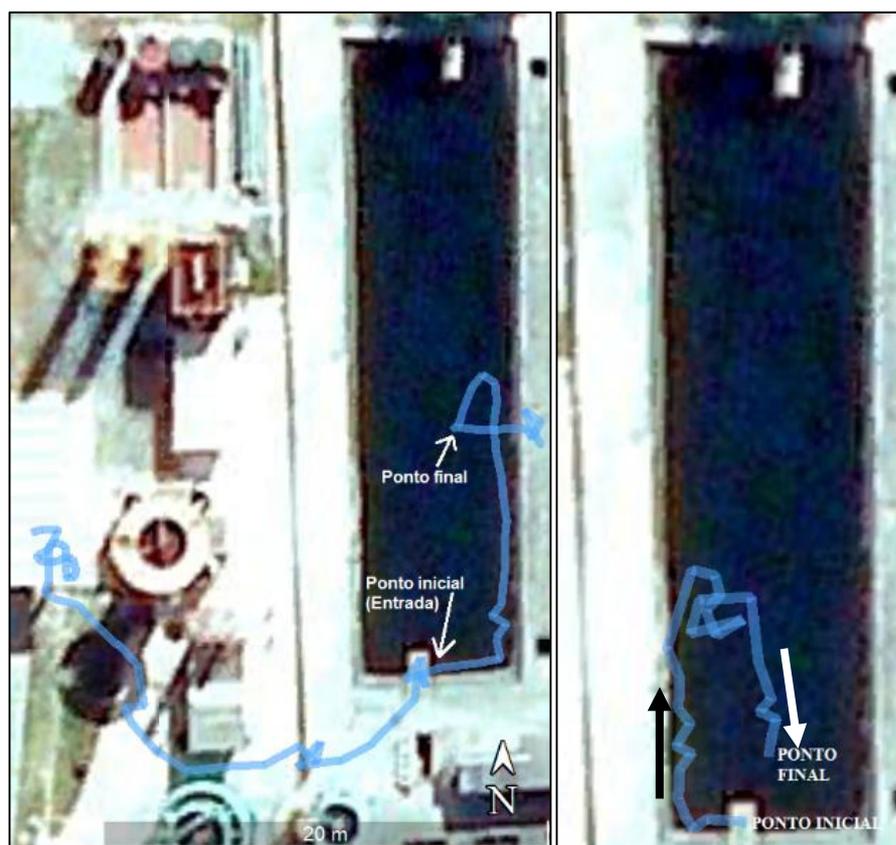
Medições pontuais com o *drogue* vertical n° 3 (centro do atuador a 0,24 m de profundidade) posicionado exatamente em frente ao jato de entrada da lagoa 1 durante toda a fase 2 resultaram repetidamente em velocidades de entrada aferidas na faixa de  $10^{-2}$  m/s. A média obtida nos ensaios foi de  $3,5 \times 10^{-2}$  m/s (o *drogue* percorreu 0,6m em linha reta na frente do jato de entrada em um tempo médio de 17s).

A FIG. 5.24 apresenta trajetórias executadas pelo *drogue* com GPS na lagoa 1, com centro do atuador ajustado para 0,15m de profundidade, em ensaios realizados também no dia 13/04/16. Nos exemplos apresentados na figura, o GPS apresentou boa recepção de sinal e precisão. Apesar de menos evidente, é possível observar a mesma tendência de seguir em direção à saída

quando mais próximos aos taludes laterais, tal como observado nas trajetórias dos demais *drogues*, além da tendência de circulação em direção ao meio após percorrer alguns metros pelas laterais. Quando os *drogues* estavam mais próximos da linha central, a tendência observada foi de partir em direção à entrada (sentido contrário ao teórico); comportamento também observado em trajetórias com os demais *drogues*.

Entretanto, parte dos resultados com o GPS apresentaram trajetórias deslocadas da lagoa, possivelmente pela baixa qualidade de recepção do sinal dos satélites nos dias dos ensaios. A FIG. 5.25 consiste em um exemplo no qual a trajetória registrada ficou deslocada para a esquerda e um pouco para cima, tomando-se por referência o ponto de lançamento real.

Por serem as lagoas em estudo unidades de pequena área, mesmo um pequeno deslocamento da trajetória registrada pode comprometer a análise do fluxo. Em lagoas maiores, pequenos deslocamentos podem ser menos significativos, viabilizando a utilização deste método.



**FIGURA 5.24:** Trajetórias executadas pelo *drogue* com GPS na lagoa 1 - teste do dia 13/04/16 no CePTS UFMG/COPASA.



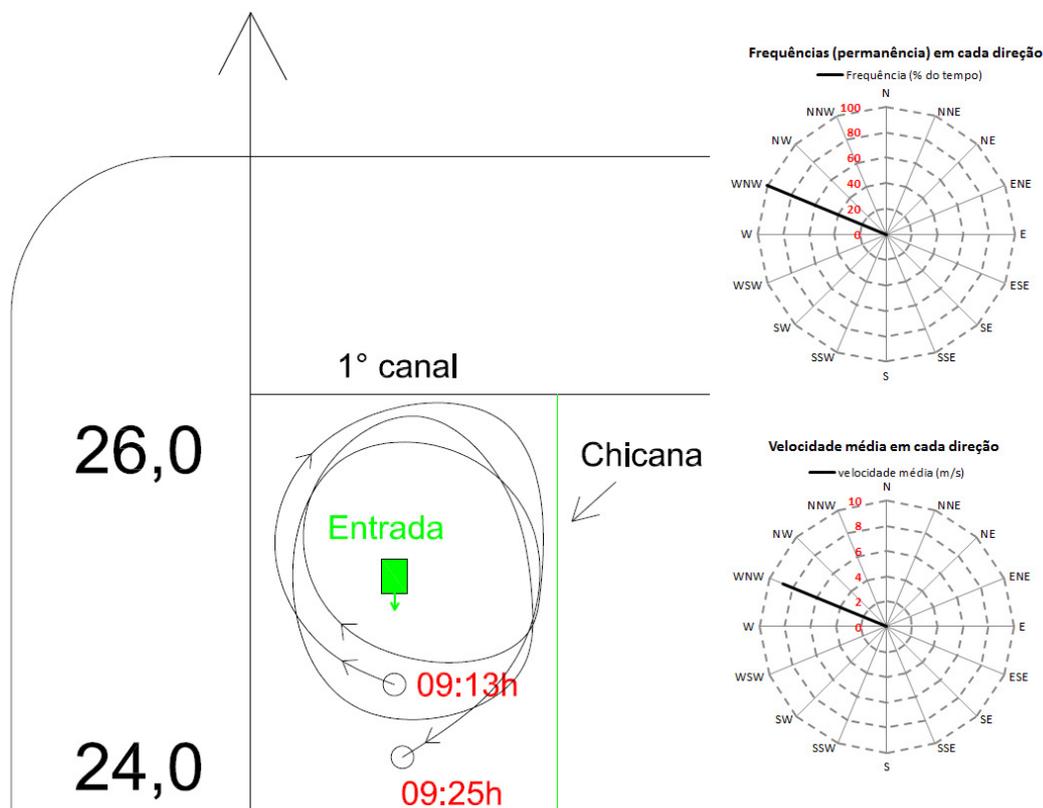
**FIGURA 5.25:** Trajetória executada pelo *drogue* com GPS na lagoa 1 - teste do dia 16/07/14 no CePTS UFMG/COPASA.

### Lagoa 2

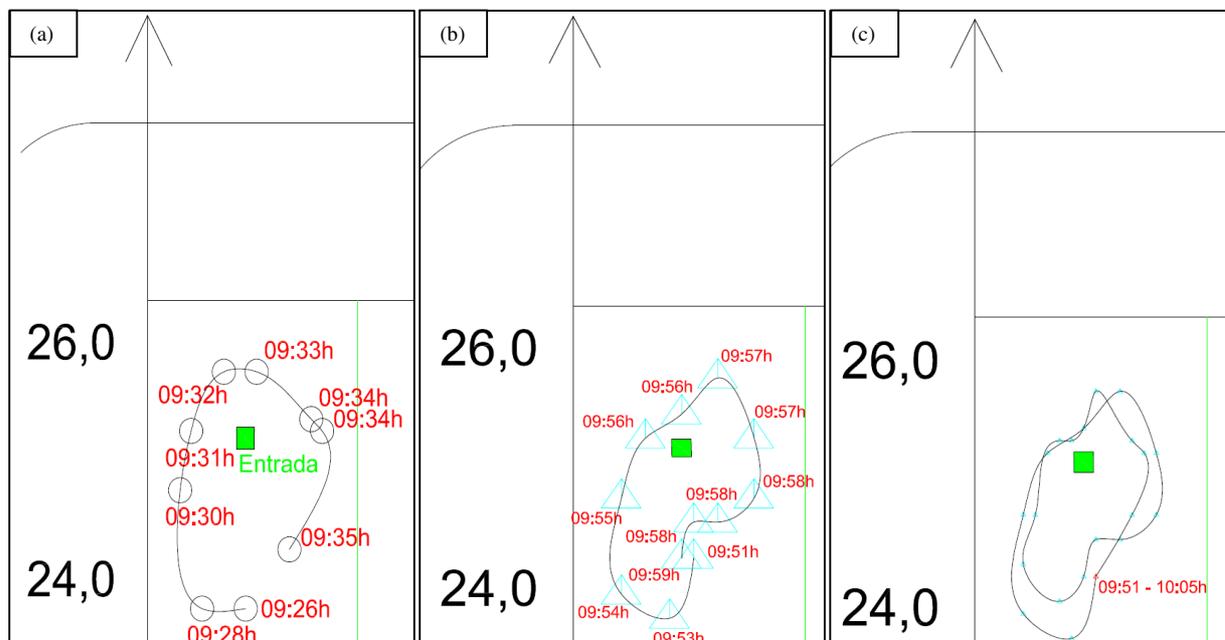
As FIG. 5.26 e 5.27 ilustram trajetórias executadas pelos *drogues* verticais n° 1 e 2 (pontos da trajetória marcados por círculos pretos; centro do atuador corresponde a 0,16m e 0,23m de profundidade, respectivamente) e n° 3 (pontos marcados por triângulos azuis; centro do atuador corresponde a 0,24m de profundidade), na lagoa 2 em ensaios realizados no dia 04/04/15. Os *drogues* foram lançados em frente ao dispositivo de entrada na lagoa e em pontos ao longo dos canais. Nesta campanha os horários em cada ponto foram registrados e apresentados nas figuras. A estação meteorológica registrou apenas dados das 10:00h às 11:00h, mas evidenciou ventos constantes em uma única direção (sentido oes-noroeste), com velocidade média de 8,9 m/s. O anemograma para este período está apresentado na FIG. 5.26.

Os *drogues* lançados na região de entrada da lagoa, em frente ao jato de entrada revelaram a mesma trajetória seguida pelo fluxo, independente do plano correspondente do atuador, que consistia em um movimento elíptico ou circular em sentido horário ao redor do dispositivo de entrada, mesmo estando o jato de entrada direcionado no sentido de desenvolvimento do canal e os *drogues* posicionados em frente deste. Este comportamento provavelmente ocorre pela disposição do dispositivo de entrada (um pouco afastado do talude e com jato direcionado no sentido do canal), que provoca turbulência à frente e uma zona de subpressão atrás do jato, responsável pelos vetores de velocidade do fluido ao redor apontados para esta direção, forçando a recirculação (já que o sentido do escoamento é sempre de um ponto com maior

pressão para um ponto com menor pressão). Cada trajetória ao redor da entrada foi percorrida entre 4 a 9 minutos.

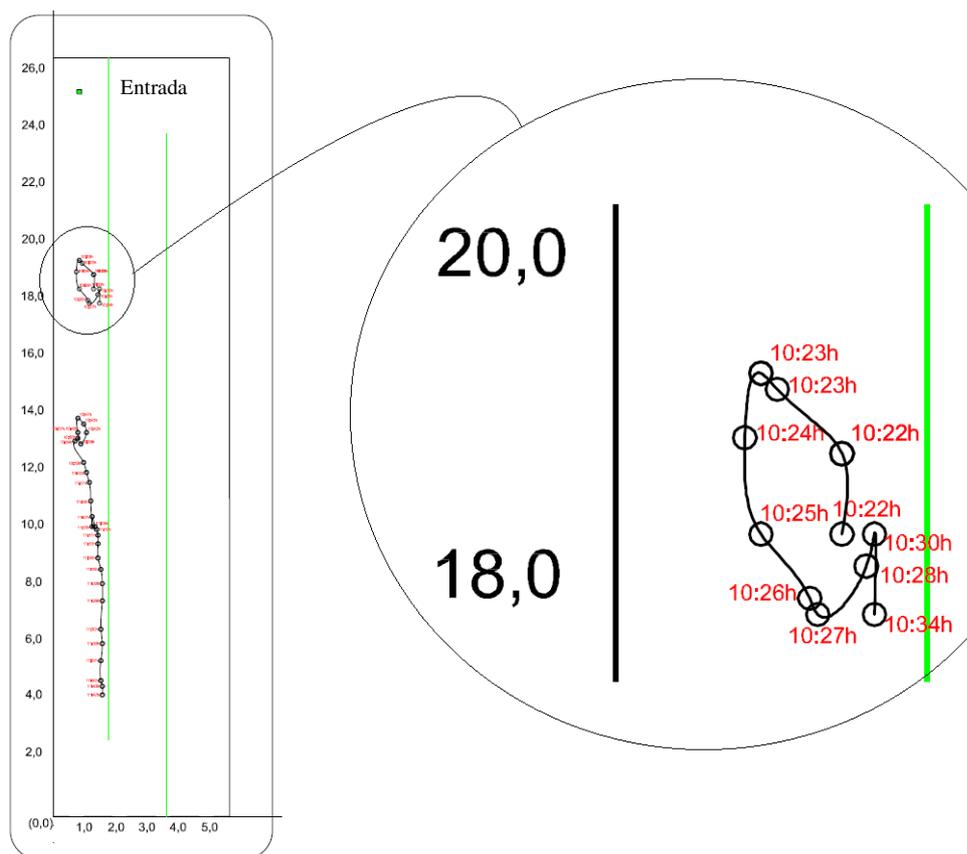


**FIGURA 5.26:** Representação gráfica da trajetória executada pelo *drogue* vertical n° 2 (centro do atuador a 0,23m de profundidade) na região de entrada do primeiro canal da lagoa 2 chicaneada - teste do dia 04/04/15 no CePTS UFMG/COPASA.

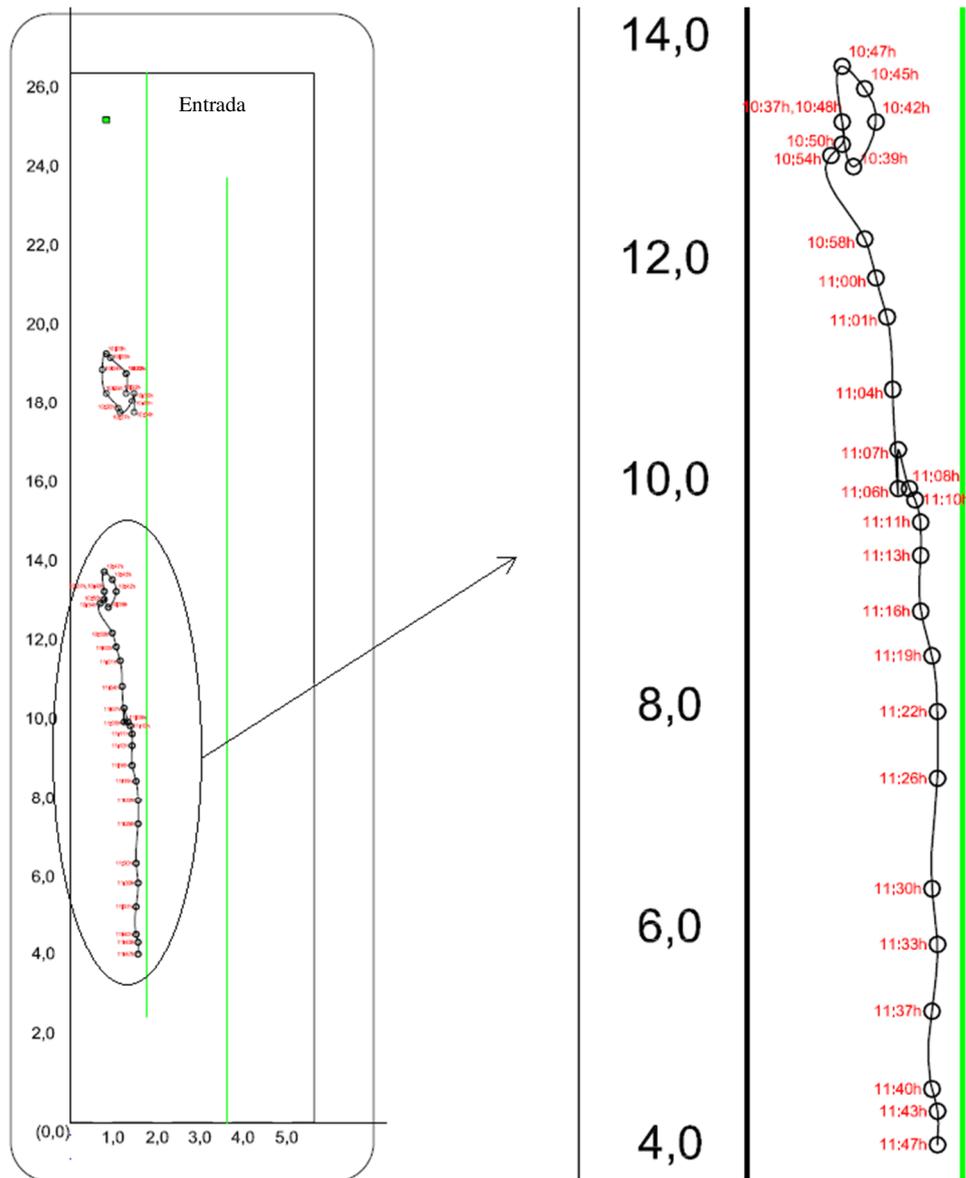


**FIGURA 5.27:** Representação gráfica das trajetórias executadas (a) pelo *drogue* vertical n° 1 (centro do atuador a 0,16m de profundidade), (b) e (c) pelo *drogue* vertical n° 3 (centro do atuador a 0,24m de profundidade), na região de entrada do primeiro canal da lagoa 2 chicaneada - teste do dia 04/04/15 no CePTS UFMG/COPASA.

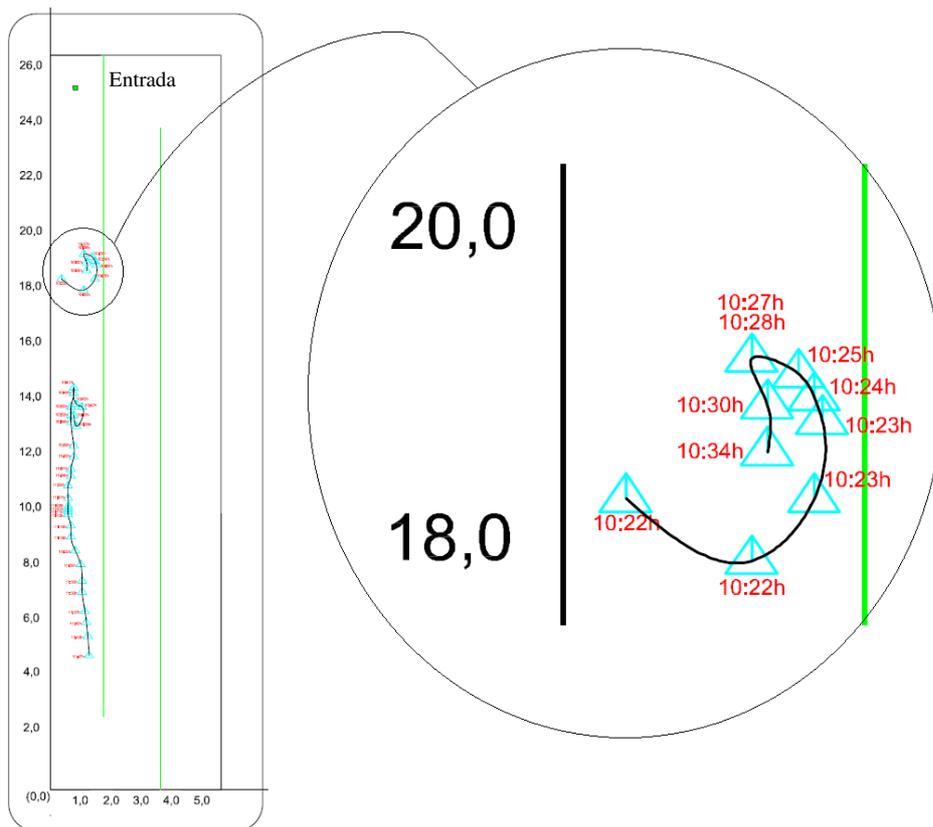
Os *drogues* lançados ao longo dos canais (FIG. 5.28 a 5.32), evidenciaram trajetórias de recirculação no sentido anti-horário seguidas de trajetórias aproximadamente retilíneas ao longo do canal, na direção esperado do fluxo, para ambos os *drogues*. As trajetórias retilíneas sugerem uma velocidade no primeiro canal de cerca de  $3 \times 10^{-3}$  m/s para o *drogue* n° 1 e de cerca de  $2 \times 10^{-3}$  m/s para o *drogue* n° 3.



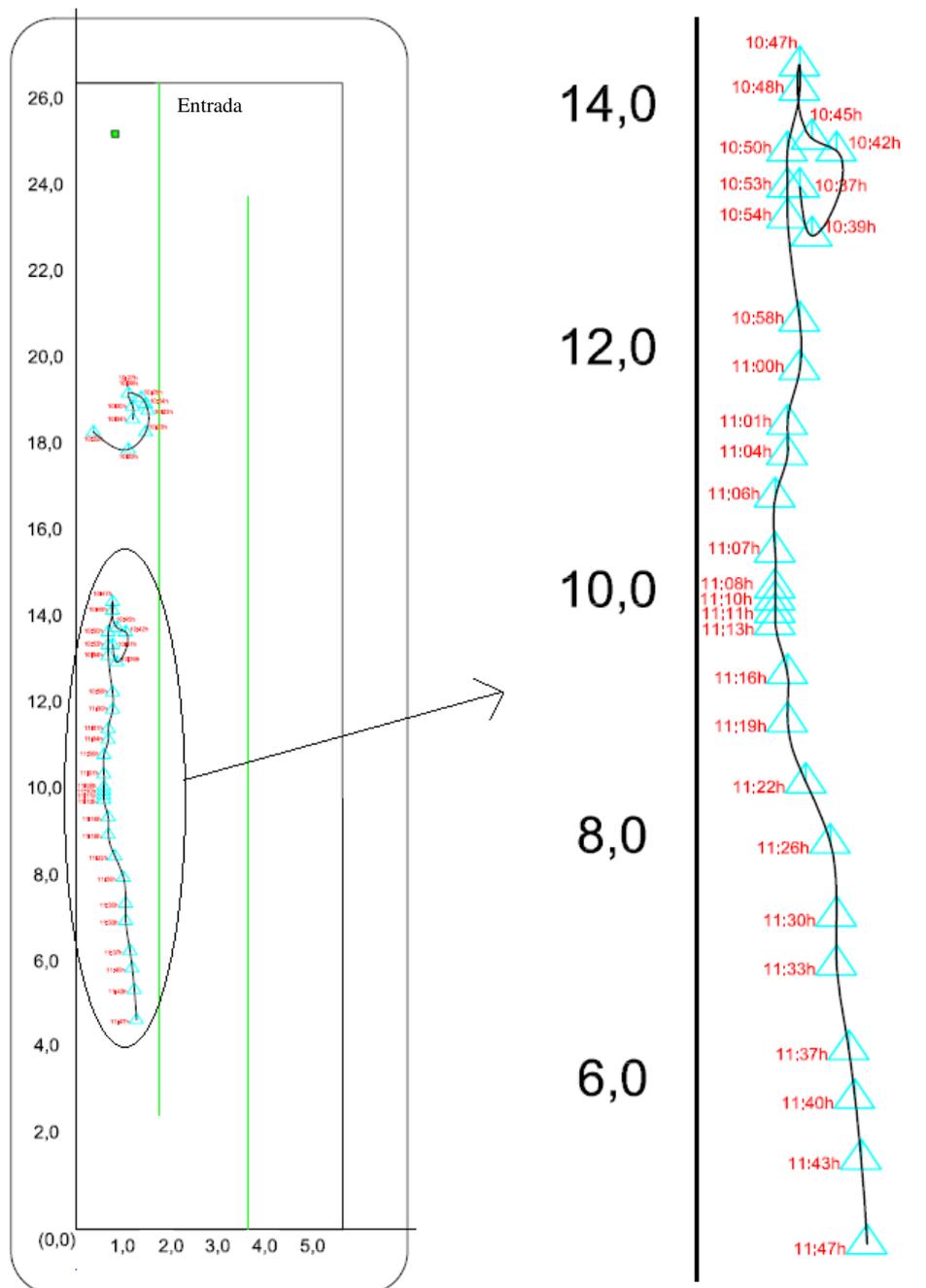
**FIGURA 5.28:** Representação gráfica das trajetórias executadas pelo *drogue* vertical n° 1 no primeiro canal da lagoa 2 (centro do atuador a 0,16 m de profundidade). Detalhe da trajetória de recirculação - teste do dia 04/04/15 no CePTS UFMG/COPASA.



**FIGURA 5.29:** Representação gráfica das trajetórias executadas pelo *drogue* vertical n° 1 no primeiro canal da lagoa 2 (centro do atuador a 0,16 m de profundidade). Detalhe da trajetória de recirculação seguida por trajetória mais retilínea - teste do dia 04/04/15 no CePTS UFMG/COPASA.

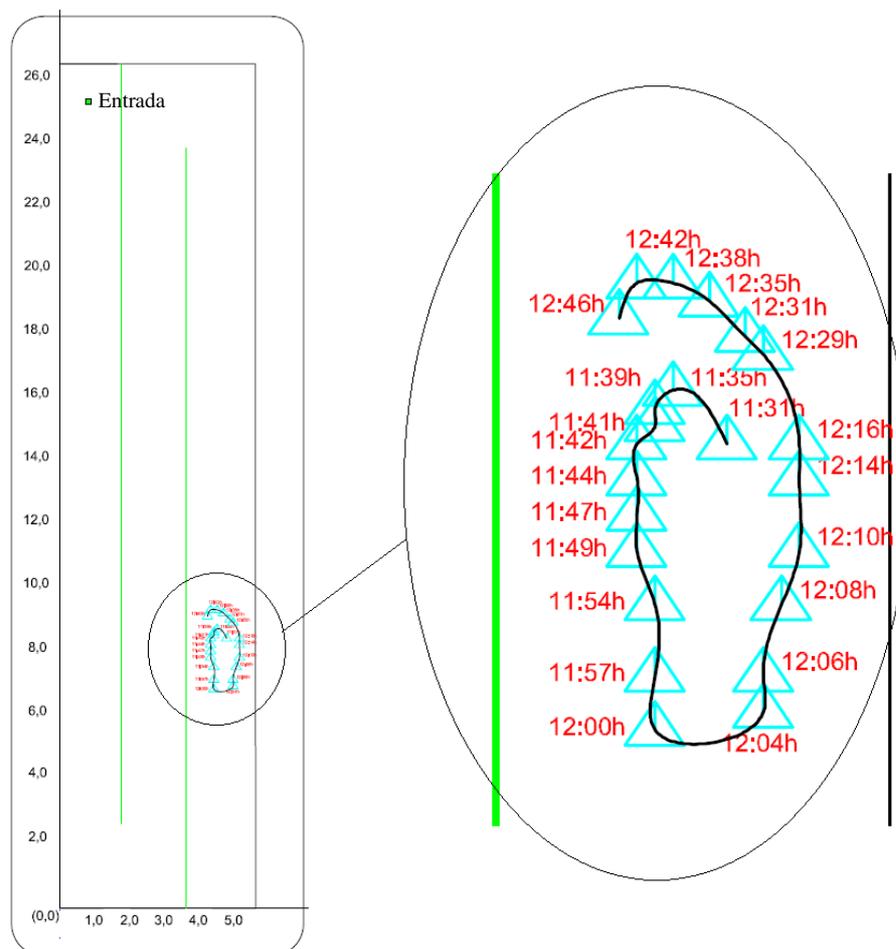


**FIGURA 5.30:** Representação gráfica das trajetórias executadas pelo *drogue* vertical n° 3 no primeiro canal da lagoa 2 (centro do atuador a 0,24 m de profundidade). Detalhe da trajetória de recirculação - teste do dia 04/04/15 no CePTS UFMG/COPASA.



**FIGURA 5.31:** Representação gráfica das trajetórias executadas pelo *drogue* vertical n° 3 no primeiro canal da lagoa 2 (centro do atuador a 0,24 m de profundidade). Detalhe da trajetória de recirculação seguida por trajetória mais retilínea - teste do dia 04/04/15 no CePTS UFMG/COPASA.

Da mesma forma, o ensaio realizado no terceiro canal no dia 11/04/15 com o drogue n° 3 (FIG. 5.32), também evidenciou trajetória de recirculação no sentido anti-horário. Não havia dados da estação meteorológica disponíveis para o dia.



**FIGURA 5.32:** Representação gráfica da trajetória executada pelo *drogue* vertical n° 3 no terceiro canal da lagoa 2 (centro do atuador a 0,24 de profundidade) - teste do dia 11/04/15 no CePTS UFMG/COPASA.

Principalmente devido à pequena largura das chicanas, os resultados dos ensaios com o *drogue* com GPS na lagoa 2 não foram satisfatórios, de forma que não foi possível perceber padrões nas trajetórias obtidas, com muitas delas deslocadas do local em que os dispositivos realmente estavam. Não foram realizados ensaios com os *drogues* na fase 1 de operação.

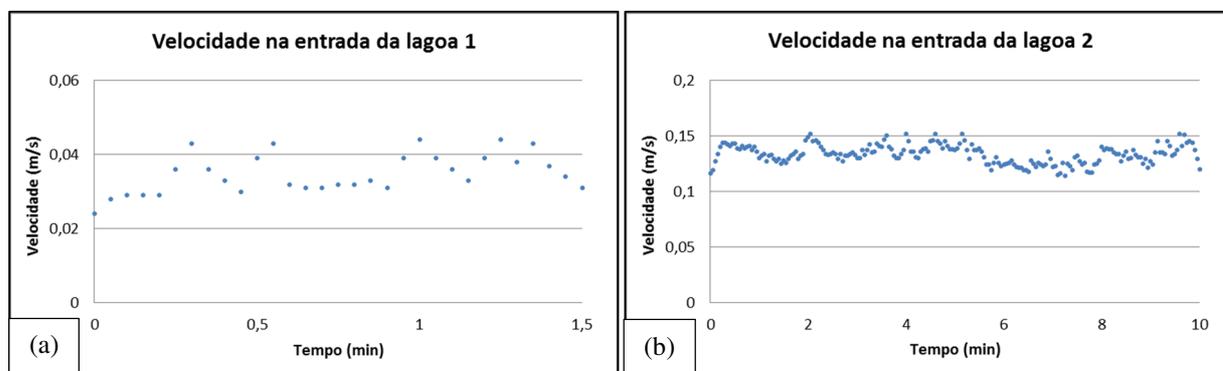
#### 5.2.1.2 Medições pontuais de velocidade com uso de molinetes e medidor acústico (ADV)

Devido às baixíssimas velocidades de escoamento que predominam nas lagoas, os resultados obtidos com os molinetes hidráulicos desencorajam o uso da técnica para avaliações mais gerais nesses sistemas, mesmo com equipamentos mais precisos. Do total de pontos monitorados, com ambos os molinetes utilizados, apenas próximo aos dispositivos de entrada houve registro de velocidades acima de zero.

O molinete *Flow Probe 3.7'-6' Swivel Head®*, da *Global Water*, com faixa nominal de medição da velocidade de 0,1 a 6,1 m/s ( $\pm 00,03\text{m/s}$ ), foi capaz de registrar apenas a velocidade

de 0,1 m/s a 0,05m do ponto de entrada do fluxo na lagoa 1, na sua direção principal, e a mesma velocidade de 0,1 m/s a 0,05m do ponto de entrada do fluxo na lagoa 2 chicaneada, também na sua direção principal. Na ocasião, as lagoas estavam operando com uma vazão de 24 m<sup>3</sup>/d. Nos demais pontos as hélices do equipamento não giravam e as velocidades obtidas foram nulas, em qualquer direção.

O molinete *Flow Rate Sensor Go!®Link*, com faixa de medição de 0 a 4,0 m/s (precisão de 0,0012 m/s), foi capaz de registrar apenas a velocidade média de  $3,5 \times 10^{-2}$  m/s em um ponto a 0,1m do jato de entrada na lagoa 1 (medições a cada 3 segundos, por 1,5 minutos), exatamente o mesmo valor médio obtido com os ensaios pontuais com o *drogue* n° 3, que percorreu 0,6m em linha reta na frente do jato de entrada a partir deste ponto em um tempo médio de 17s (10 repetições) e próximo à velocidade média obtida com os registros do ADV, de 0,038 m/s. Foi obtida também a velocidade média de 0,13 m/s a 5 cm do ponto de entrada do fluxo na lagoa 2 chicaneada (medições a cada 3 segundos, por 10 minutos), na sua direção principal. Na ocasião, as lagoas estavam operando com uma vazão de 30 m<sup>3</sup>/d. A FIG. 5.33 apresenta os registros das velocidades ao longo do tempo de medição na entrada das duas lagoas. Nos demais pontos as hélices do equipamento também não giravam e as velocidades obtidas foram nulas, em qualquer direção.



**FIGURA 5.33:** Medições de velocidade com o molinete *Flow Rate Sensor Go!®Link* na entrada das lagoas durante a fase 2: **(a)** velocidades registradas a 10 cm da entrada da lagoa 1 e **(b)** velocidades registradas a 5 cm da entrada da lagoa 2

De fato, é importante a observação de que as velocidades teóricas esperadas na maior parte das lagoas (ordem de  $10^{-3} - 10^{-2}$ ) já e situam próximas ao limite inferior da faixa de medição dos equipamentos, ou até abaixo dele, o que compromete a obtenção dos dados ou incorre em erros de medição também maiores.

Já o medidor acústico ADV mostrou ser capaz de captar as baixas velocidades comumente encontradas em lagoas. Além do módulo das velocidades, foi fornecida também em cada ponto a direção e o sentido das linhas de fluxo, por meio do ângulo registrado tomando por base uma linha de referência. Grande interferência foi observada nas medições na lagoa 1 devido a presença do próprio pesquisador na lagoa, próximo ao local de medição (não foi possível executar as medições totalmente fora da lagoa). O lodo acumulado também foi um fator limitante das medições nessa lagoa. Na lagoa 2 com chicanas foi possível buscar menor interferência por meio da execução de medições em um canal estando o pesquisador no canal adjacente.

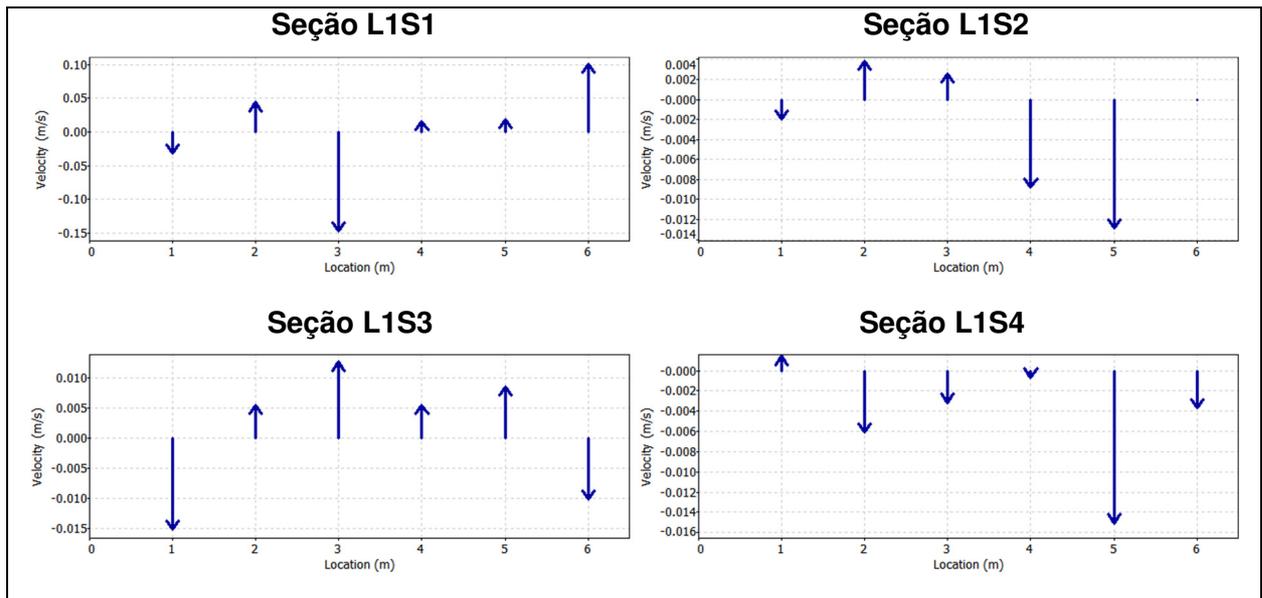
A TAB. 5.7 apresenta as velocidades médias obtidas em cada ponto e o ângulo formado (entre parênteses), para cada campanha de monitoramento na lagoa 1. O valor do ângulo é positivo quando contabilizado no sentido horário, considerando como referência (ângulo zero) o sentido entrada para saída, e negativo quando contabilizado no sentido anti-horário. Logo, ângulos positivos registram vetores que apontam para a direita na lagoa e ângulos negativos registram vetores que apontam para a esquerda. Ademais, por este mesmo critério, valores do ângulo menores que  $90^\circ$ , em módulo, indicam que o vetor está na mesma direção da referência (da entrada para a saída) e valores do ângulo maiores que  $90^\circ$ , em módulo, indicam que o vetor está na direção contrária.

As FIG. 5.34 e 5.35 ilustram graficamente os vetores de velocidade de acordo com a magnitude aferida (comprimento da seta no eixo y) em cada um dos seis pontos (“Location” 1, 2, 3..., no eixo x), de cada seção de medição, para cada campanha de monitoramento. As setas apontadas para baixo dizem respeito àquelas com ângulo negativo (sentido anti-horário).

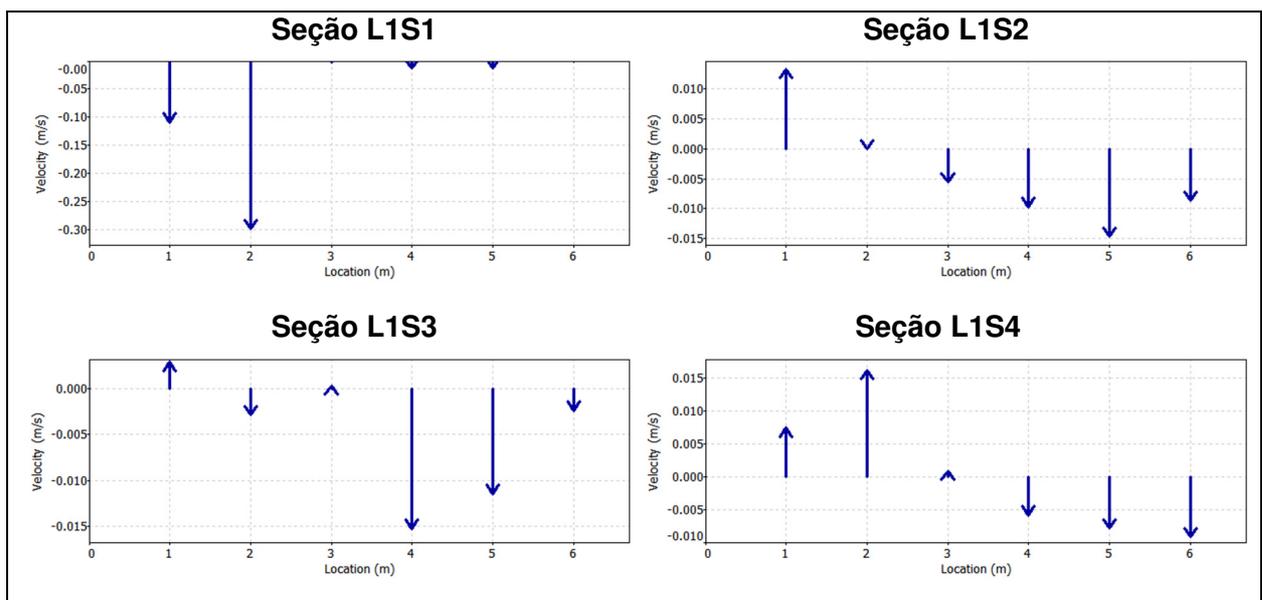
**TABELA 5.7** – Velocidade média em cada ponto de medição e em cada campanha de monitoramento com o ADV *FlowTracker* – Lagoa 1 - CePTS UFMG/COPASA

Ponto	Altura (m)*	Velocidade (m/s) (ângulo)	
		09/10/15	13/04/16
<u>Entrada</u>	0,65	-	-
<u>Seção L1S1</u>			
P1	0,41	0,0319 (132°)	0,1093 (138°)
P2	0,46	0,0444 (-24°)	0,2981 (166°)
P3	0,46	0,1479 (-167°)	0,0018 (110°)
P4	0,46	0,0165 (-2°)	0,0135 (-179°)
P5	0,46	0,0190 (39°)	0,0124 (-146°)
P6	0,27	0,1018 (-19°)	0,0011 (-175°)
<u>Seção L1S2</u>			
P1	0,43	0,0020 (-114°)	0,0133 (-30°)
P2	0,46	0,0039 (49°)	0,0001 (-96°)
P3	0,46	0,0026 (74°)	0,0056 (-120°)
P4	0,46	0,0088 (117°)	0,0097 (-155°)
P5	0,46	0,0129 (144°)	0,0147 (-177°)
P6	0,28	0,0000 (90°)	0,0087 (177°)
<u>Seção L1S3</u>			
P1	0,39	0,0151 (154°)	0,0029 (-59°)
P2	0,46	0,0056 (-46°)	0,0029 (-137°)
P3	0,46	0,0127 (-5°)	0,0003 (-73)
P4	0,46	0,0056 (-22°)	0,0153 (-159°)
P5	0,46	0,0086 (34°)	0,0115 (-162°)
P6	0,22	0,0101 (174°)	0,0024 (-146°)
<u>Seção L1S4</u>			
P1	0,41	0,0015 (43°)	0,0074 (17°)
P2	0,46	0,0061 (115°)	0,0162 (-38°)
P3	0,46	0,0032 (161°)	0,0009 (-84°)
P4	0,46	0,0007 (-110°)	0,0059 (-110°)
P5	0,46	0,0151 (-173°)	0,0079 (-132°)
P6	0,23	0,0037 (-177°)	0,0092 (-147°)

\*Altura de medição a partir do fundo



**FIGURA 5.34:** Representação gráfica da velocidade medida na lagoa 1 no CePTS UFMG/COPASA – 09/10/2015 em cada um dos pontos de cada seção de medição



**FIGURA 5.35:** Representação gráfica da velocidade medida na lagoa 1 no CePTS UFMG/COPASA – 13/04/2016 em cada um dos pontos de cada seção de medição

Analogamente, a TAB. 5.8 apresenta as velocidades médias obtidas em cada ponto e o ângulo formado (entre parênteses), para cada campanha de monitoramento na lagoa 2, fase 2 (com chicanas). Da mesma forma, o valor do ângulo é positivo quando contabilizado no sentido horário, considerando como referência (ângulo zero) o sentido entrada para saída, e negativo quando contabilizado no sentido anti-horário. As FIG. 5.36 e 5.37 ilustram graficamente os vetores de velocidade de acordo com a magnitude aferida (comprimento da seta no eixo y) em

cada um dos cinco pontos, de cada seção de medição, para cada campanha de monitoramento. As setas apontadas para baixo dizem respeito àquelas com ângulo negativo (sentido anti-horário).

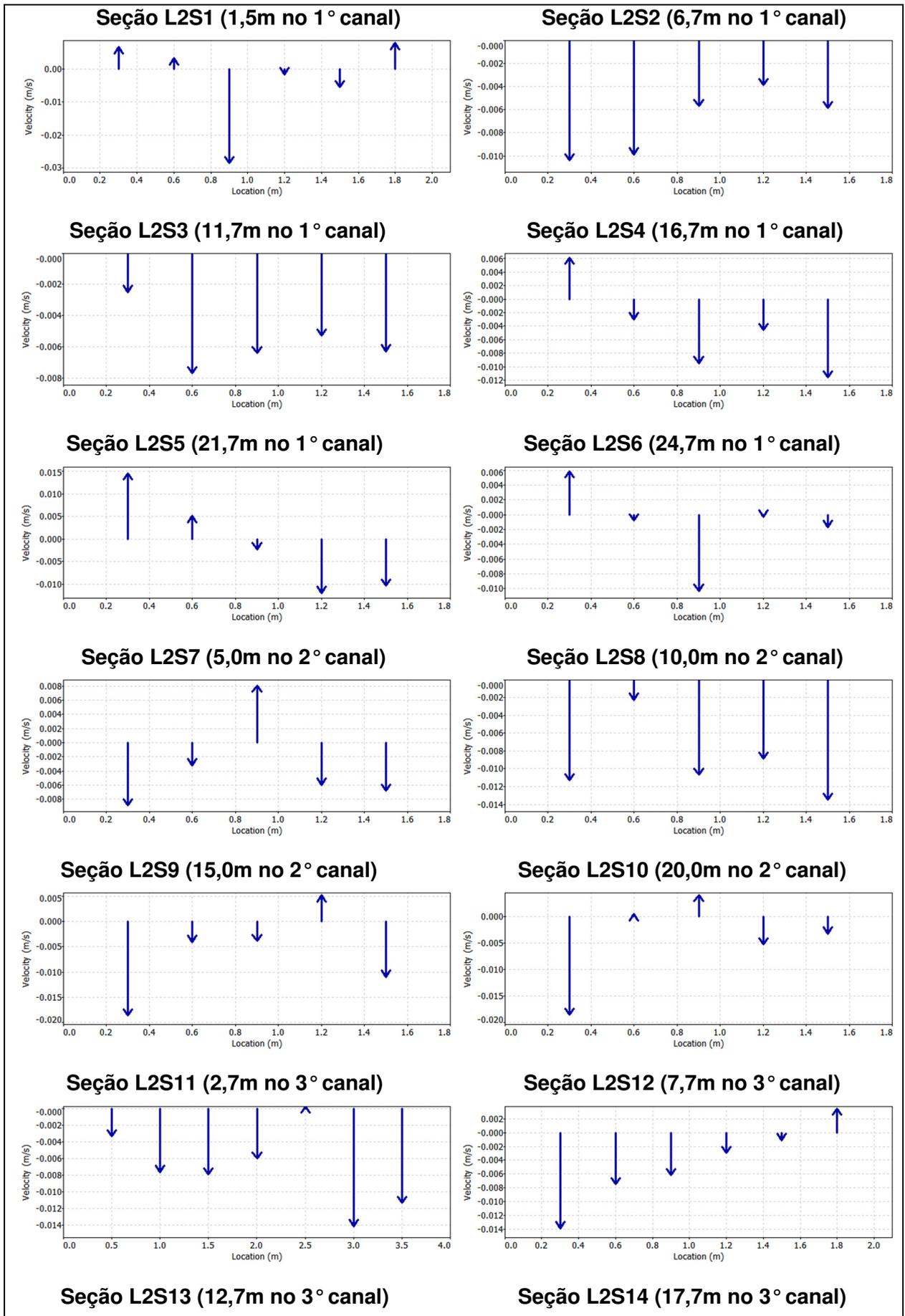
**TABELA 5.8** - Velocidade média em cada ponto de medição e em cada campanha de monitoramento com o ADV *FlowTracker* – Lagoa 2, com chicanas - CePTS UFMG/COPASA

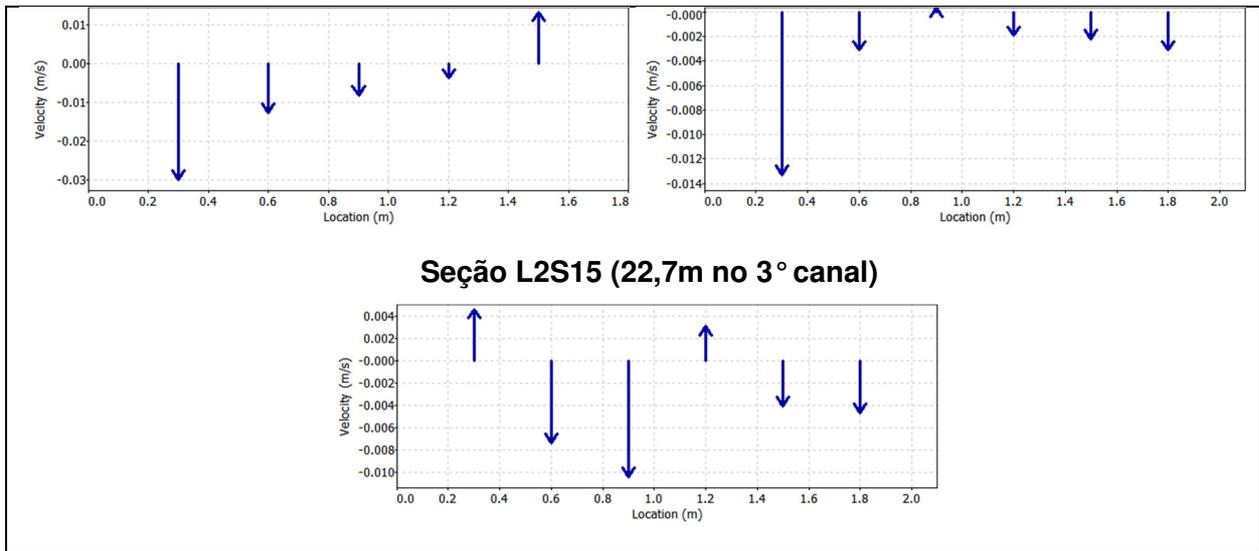
Ponto	Altura(m)*	Velocidade (m/s) (ângulo)	
		06/10/15	14/04/16
<u>Entrada</u>	0,44	-	-
<u>Seção L2S1 (1,5m no 1° canal)</u>			
P1	0,25	0,0067 (54°)	-
P2	0,25	0,0034 (69°)	-
P3	0,25	0,0285 (179°)	-
P4	0,25	0,0016 (101°)	-
P5	0,25	0,0055 (176°)	-
<u>Seção L2S2 (6,7m no 1° canal)</u>			
P1	0,29	0,0104 (-178°)	-
P2	0,29	0,0099 (141°)	-
P3	0,29	0,0057 (-156°)	-
P4	0,29	0,0039 (-128°)	-
P5	0,29	0,0059 (-156°)	-
<u>Seção L2S3 (11,7m no 1° canal)</u>			
P1	0,29	0,0025 (-137°)	0,0095 (-157°)
P2	0,29	0,0077 (142°)	0,0024 (-114°)
P3	0,29	0,0064 (153°)	0,0002 (-92°)
P4	0,29	0,0053 (-178°)	0,0026 (128°)
P5	0,29	0,0063 (150°)	0,0046 (168°)
<u>Seção L2S4 (16,7m no 1° canal)</u>			
P1	0,29	0,0062 (14°)	0,0002 (-124°)
P2	0,29	0,0030 (-169°)	0,0164 (27°)
P3	0,29	0,0095 (179°)	0,0169 (21°)
P4	0,29	0,0046 (130°)	0,0133 (20°)
P5	0,29	0,0116 (-161°)	0,0046 (34°)
<u>Seção L2S5 (21,7m no 1° canal)</u>			
P1	0,25	0,0146 (0°)	0,0135 (159°)
P2	0,25	0,0052 (-56°)	0,0148 (154°)
P3	0,25	0,0023 (-105°)	0,0098 (16°)
P4	0,25	0,0120 (-140°)	0,0028 (-51°)
P5	0,25	0,0104 (-129°)	0,0047 (-43°)
<u>Seção L2S6 (24,7m no 1° canal)</u>			
P1	0,26	0,0059 (-48°)	0,0115 (170°)
P2	0,26	0,0008 (-139°)	0,0042 (149°)
P3	0,26	0,0103 (-135°)	0,0072 (-133°)
P4	0,26	0,0003 (-94°)	0,0021 (-72°)
P5	0,26	0,0017 (-111°)	0,0025 (-24°)
<u>Seção L2S7 (5,0m no 2° canal)</u>			
P1	0,26	0,0089 (-178°)	-
P2	0,26	0,0032 (178°)	-
P3	0,26	0,0081 (32°)	-
P4	0,26	0,0060 (176°)	-
P5	0,26	0,0068 (-168°)	-
<u>Seção L2S8 (10,0m no 2° canal)</u>			
P1	0,28	0,0113 (178°)	0,0081 (-176°)
P2	0,28	0,0023 (138°)	0,0014 (-117°)
P3	0,28	0,0107 (-141°)	0,0003 (-82°)

P4	0,28	0,0089 (-156°)	0,0045 (110°)
P5	0,28	0,0135 (177°)	0,0020 (116°)
<u>Seção L2S9 (15,0m no 2° canal)</u>			
P1	0,29	0,0186 (-177°)	0,0086 (175°)
P2	0,29	0,0041 (-140°)	0,0057 (173°)
P3	0,29	0,0039 (-155°)	0,0062 (-26°)
P4	0,29	0,0052 (-19°)	0,0087 (17°)
P5	0,29	0,0110 (-167°)	0,0044 (35°)
<u>Seção L2S10 (20,0m no 2° canal)</u>			
P1	0,30	0,0186 (-178°)	0,0045 (54°)
P2	0,30	0,0005 (-86°)	0,0140 (10°)
P3	0,30	0,0041 (-60°)	0,0042 (10°)
P4	0,30	0,0053 (176°)	0,0018 (27°)
P5	0,30	0,0033 (-126°)	0,0024 (-126°)
<u>Seção L2S11 (2,7m no 3° canal)**</u>			
P1	0,26	0,0033 (171°)	-
P2	0,26	0,0076 (153°)	-
P3	0,26	0,0079 (-167°)	-
P4	0,26	0,0060 (-179°)	-
P5	0,26	0,0003 (87°)	-
P6	0,26	0,0141 (154°)	-
P7	0,26	0,0113 (173°)	-
<u>Seção L2S12 (7,7m no 3° canal)</u>			
P1	0,29	0,0139 (-139°)	0,0158 (3°)
P2	0,29	0,0075 (-163°)	0,0113 (4°)
P3	0,29	0,0062 (-157°)	0,0059 (32°)
P4	0,29	0,0030 (-122°)	0,0086 (-22°)
P5	0,29	0,0011 (-98°)	0,0009 (59°)
P6	0,29	0,0035 (-16°)	0,0038 (150°)
<u>Seção L2S13 (12,7m no 3° canal)</u>			
P1	0,28	0,0300 (-160°)	0,0061 (-37°)
P2	0,28	0,0127 (-178°)	0,0082 (32°)
P3	0,28	0,0082 (-145°)	0,0171 (-31°)
P4	0,28	0,0038 (153°)	0,0094 (-52°)
P5	0,28	0,0134 (16°)	0,0147 (-45°)
P6	0,28	-	0,0033 (-10°)
<u>Seção L2S14 (17,7m no 3° canal)</u>			
P1	0,28	0,0133 (176°)	0,0035 (52°)
P2	0,28	0,0031 (178°)	0,0100 (12°)
P3	0,28	0,0004 (84°)	0,0082 (36°)
P4	0,28	0,0019 (-100°)	0,0067 (-60°)
P5	0,28	0,0022 (-114°)	0,0008 (-120°)
P6	0,28	0,0031 (-120°)	0,0001 (-100°)
<u>Seção L2S15 (22,7m no 3° canal)</u>			
P1	0,26	0,0046 (28°)	0,0158 (178°)
P2	0,26	0,0074 (173°)	0,0113 (5°)
P3	0,26	0,0104 (175°)	0,0059 (11°)
P4	0,26	0,0031 (-33°)	0,0086 (48°)
P5	0,26	0,0041 (-161°)	0,0009 (20°)
P6	0,26	0,0047 (-136°)	0,0038 (-178°)

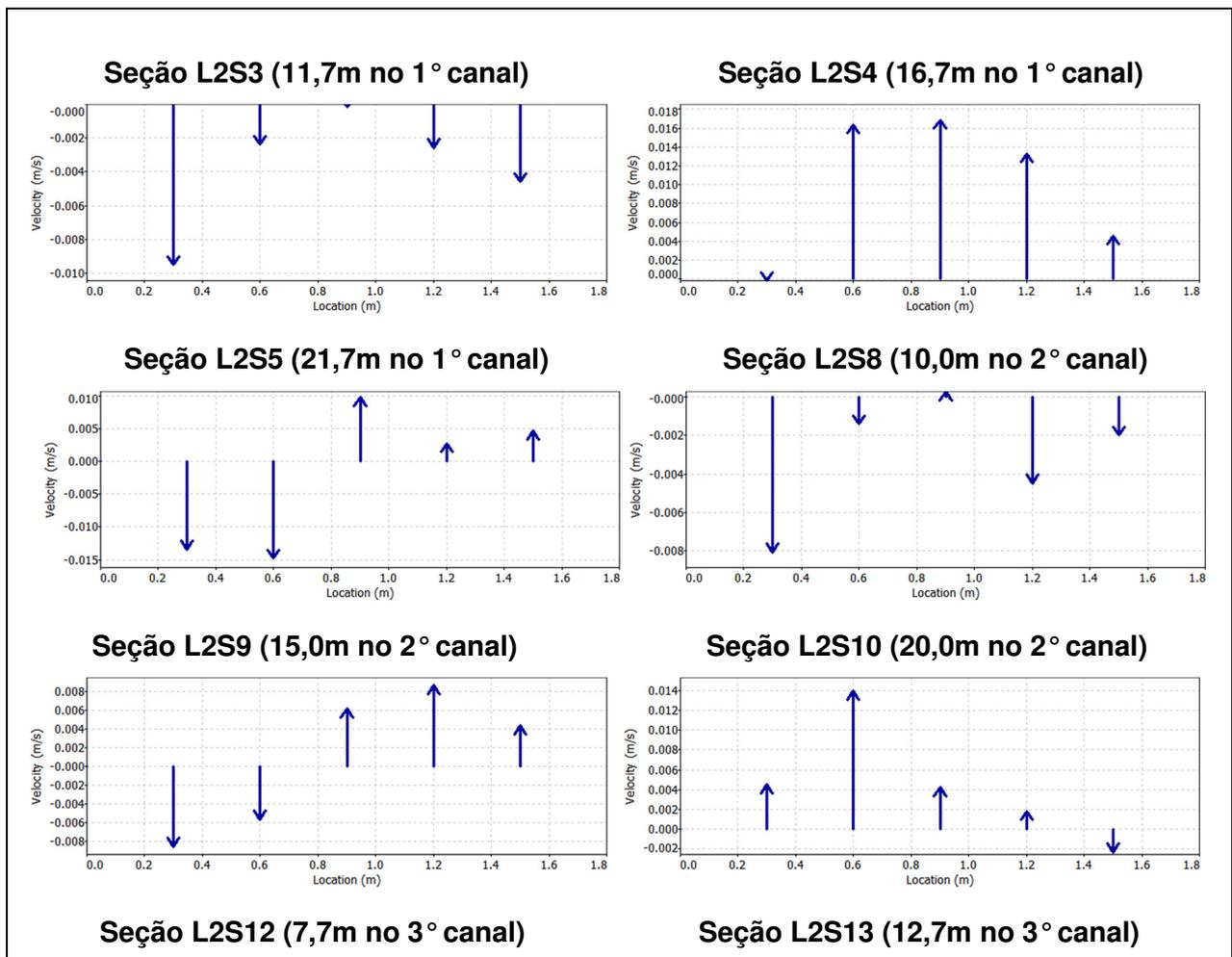
\*Altura de medição a partir do fundo; \*\*A distância entre os pontos em uma mesma seção é de 0,3m para todas as seções, exceto a L2S11, que é de 0,5m

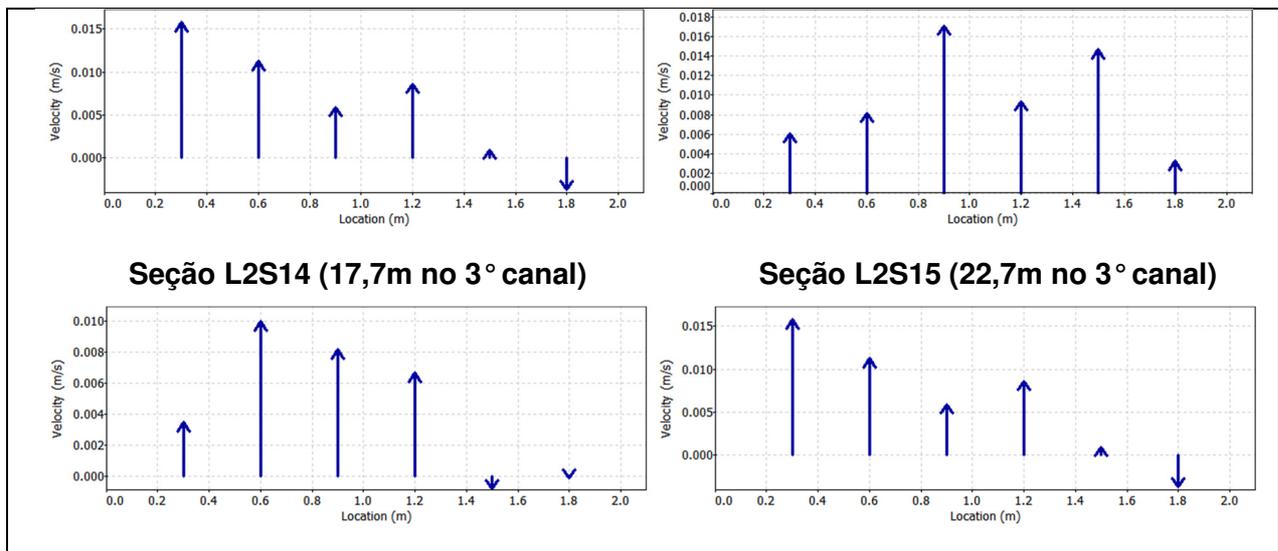
- Não realizado ou dado descartado por imprecisão o equipamento





**FIGURA 5.36:** Representação gráfica da velocidade medida na lagoa 2, com chicanas, no CePTS UFMG/COPASA, em cada um dos pontos de cada seção de medição - 06/10/2015



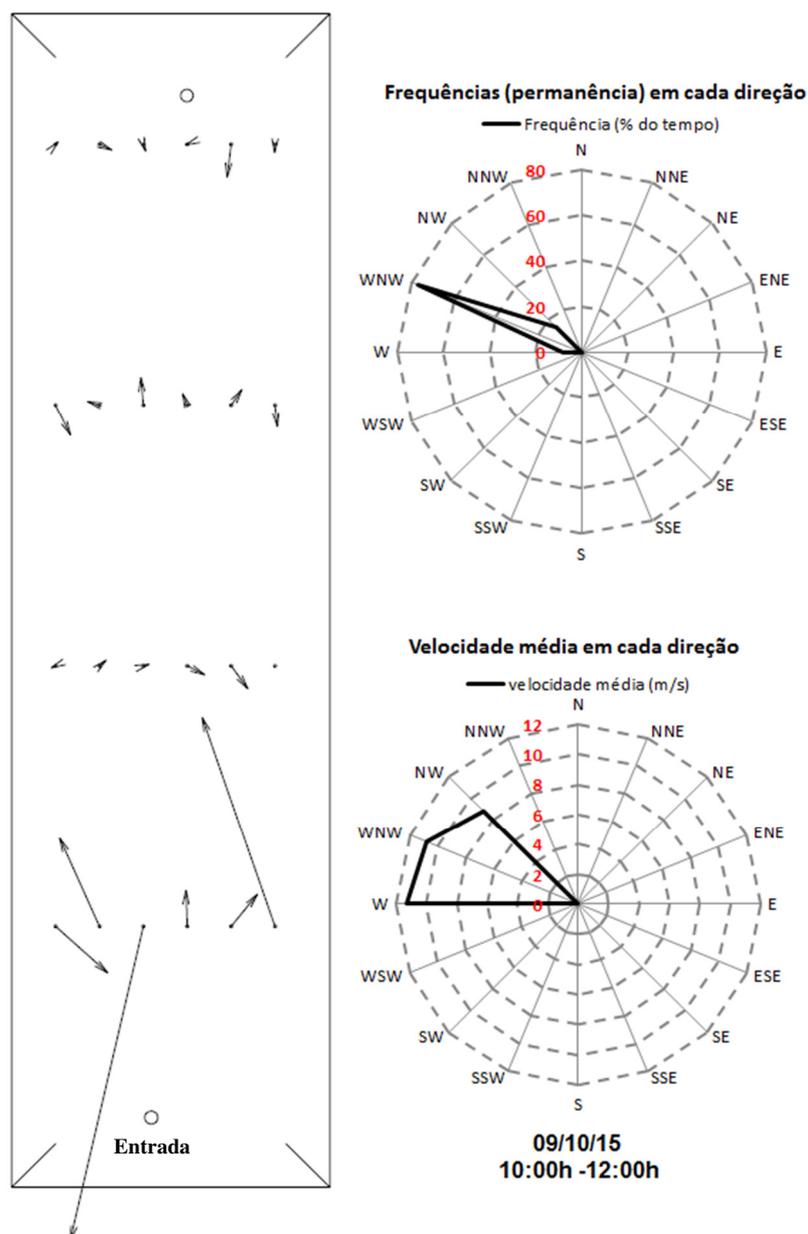


**FIGURA 5.37:** Representação gráfica da velocidade medida na lagoa 2, com chicanas, no CePTS UFMG/COPASA, em cada um dos pontos de cada seção de medição - 14/04/2016

As velocidades aferidas estiveram na faixa de  $10^{-4}$  a  $10^{-1}$  m/s. Notam-se maiores módulos da velocidade nos planos mais próximos à entrada, o que era de se esperar, bem como maiores valores para a lagoa 2, na qual, inclusive, se observa que boa parte dos vetores aponta em sentido contrário ao esperado para o fluxo (sentido teórico; o que não necessariamente ocorre, de acordo com os dados do modelo CFD).

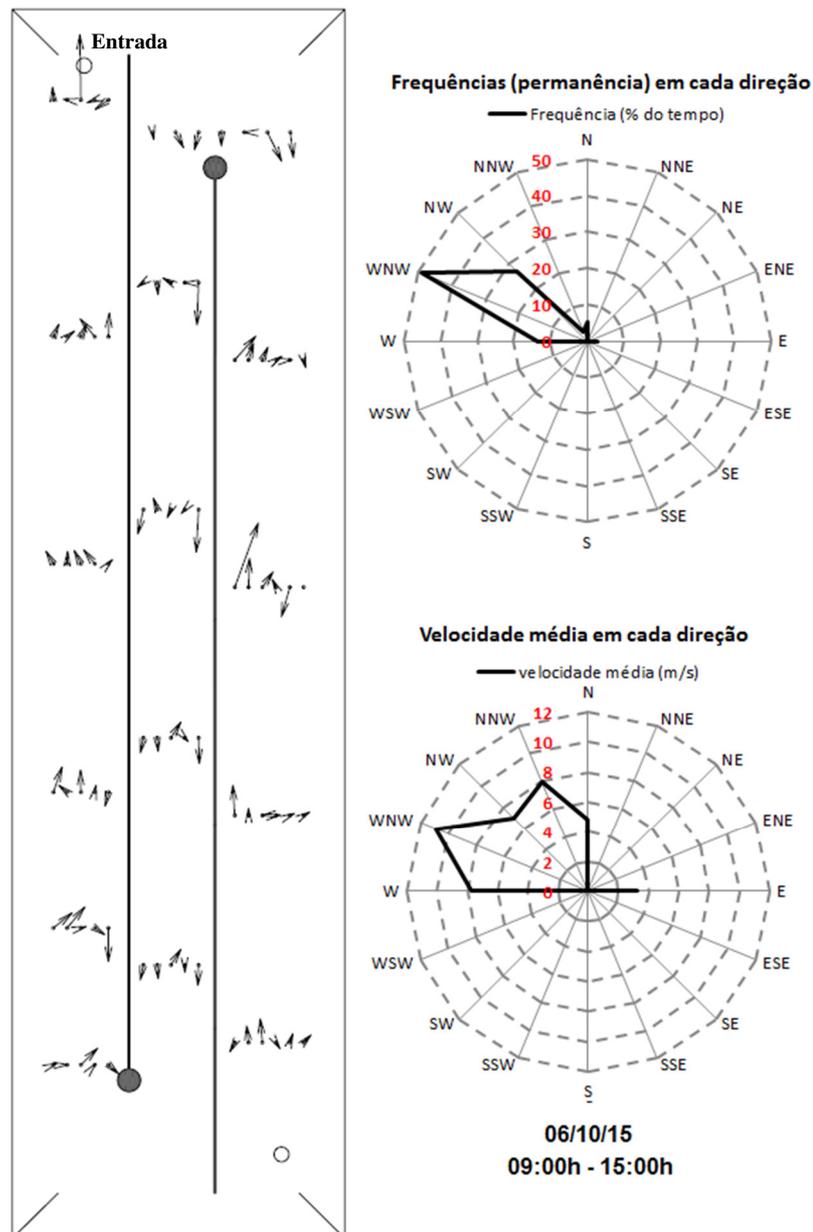
Os dados não destacam um comportamento global típico e constante dos vetores de velocidade em um plano ou em uma seção transversal. Não se observa, por exemplo, uma tendência de direção predominante ou de maior velocidade mais próximo às margens ou no centro, nem mesmo uma tendência de seguir o fluxo conforme a configuração geométrica da lagoa, reforçando a hipótese de que os vetores de velocidade são influenciados por diversos fatores atuando em conjunto (como o vento, movimentação vertical, recirculações, retromisturas), e não apenas ditados pelo fluxo teórico (o esperado a partir da configuração definida em projeto). Tendo em vista as baixas velocidades do fluxo nas lagoas, também há de se registrar a provável influência de perturbações no fluxo causadas pela presença dos pesquisadores nas lagoas e pelo próprio manuseio do equipamento, mesmo com todos os cuidados tomados para minimizá-las. Apesar de tais considerações, é possível observar tendências locais ou restritas ao dia da campanha, que podem ser mais facilmente visualizadas pela disposição dos vetores em planta, apresentados a seguir.

A Figura 5.38 apresenta os vetores de velocidade em planta na lagoa 1 em uma campanha de monitoramento. O tamanho da seta é proporcional ao módulo da velocidade, e o sentido da seta definido pelo ângulo aferido. Adicionalmente, na mesma figura, estão apresentados os anemogramas evidenciando as direções predominantes do vento (em termos de porcentagem de permanência no tempo) e as velocidades médias específicas para o período de tempo compreendido no monitoramento.



**FIGURA 5.38:** Representação gráfica dos vetores de velocidade na lagoa 1, no CePTS UFMG/COPASA, em cada um dos pontos de cada seção de medição, bem como as condições do vento durante o monitoramento - 09/10/2015

Os vetores de velocidade em planta e os anemogramas correspondente à campanha na lagoa 2, fase 2, estão apresentados nas FIG. 5.39.



**FIGURA 5.39:** Representação gráfica dos vetores de velocidade na lagoa 2, fase 2, no CePTS UFMG/COPASA, em cada um dos pontos de cada seção de medição, bem como as condições do vento durante o monitoramento - 06/10/2015

Apesar de os testes com ADV não terem evidenciado padrão hidrodinâmico, podem ser vistas nas figuras características de fluxo reveladas no modelo CFD e com os demais testes de campo, tais como as tendências de recirculação e vetores em contra-fluxo em ambas as lagoas.

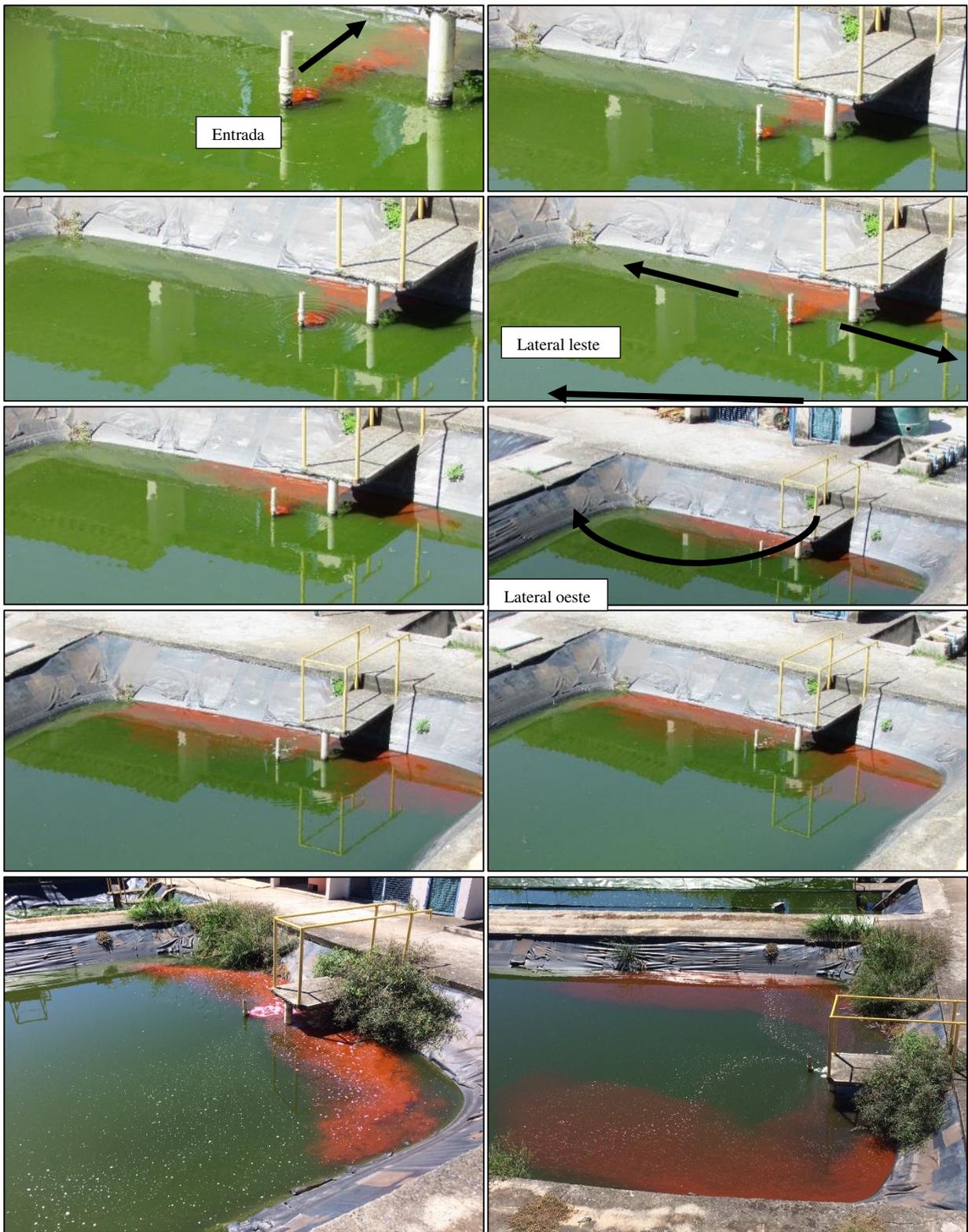
Na lagoa 2 percebeu-se vetores de velocidade menos dispersos. Apesar da não eliminação das prováveis interferências ocasionadas pelo próprio manuseio do equipamento também nessa lagoa (assim como na L1), provavelmente uma menor interferência foi conseguida por terem

sido as medições realizadas em um canal estando os pesquisadores em canal adjacente (o que não foi possível na lagoa 1).

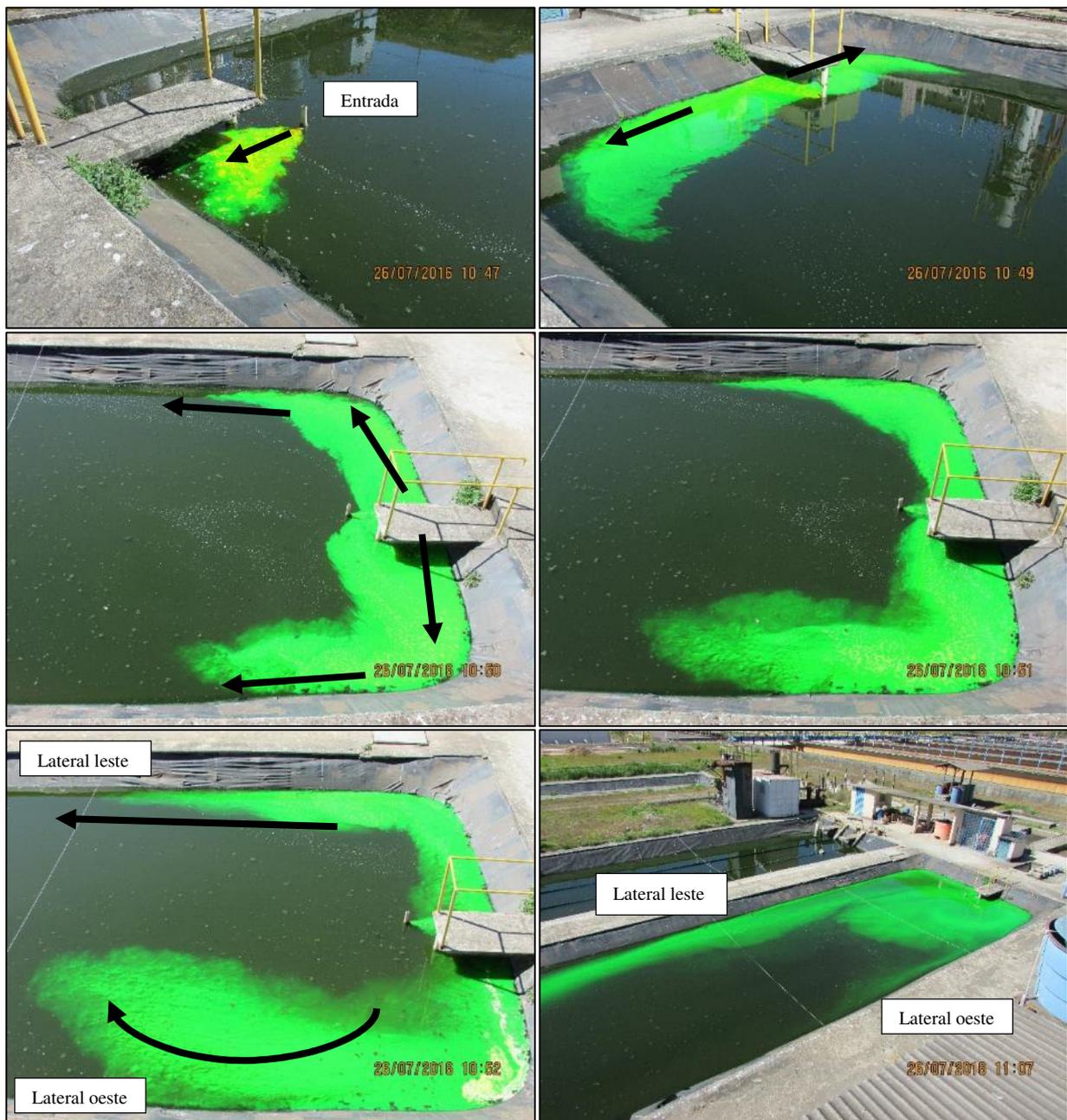
#### 5.2.1.3 Ensaio com corantes

Tanto o corante líquido para tintas e roupas (tipo Xadrez®) como Rodamina e a Uranina foram visíveis na superfície das lagoas após o lançamento. Entretanto, devido à maior disponibilidade para os testes e maior rendimento (maior poder de tingimento), os corantes fluorescentes Rodamina e a Uranina foram mais amplamente utilizados. Passado um dia dos testes com os corantes, as lagoas sofriram mudança completa da coloração (mistura do corante em todo o volume), perdendo a cor visível do corante após cerca de uma semana.

Os corantes lançados na entrada da lagoa 1 revelaram que o fluxo de entrada da lagoa é dividido após encontrar o talude (o que era de se esperar, já que a tubulação é direcionada no sentido contrário ao da saída), seguindo posteriormente no sentido da saída por cada uma das laterais da lagoa, aparentemente com maior parcela, e mais veloz, seguindo pela lateral direita da lagoa (leste) até praticamente a metade do comprimento da lagoa, quando foi percebida uma tendência mais acentuada da pluma se curvar para o interior da lagoa e partir em contrafluxo. A pluma que segue pela lateral esquerda da lagoa (oeste) apresentou a tendência de se dispersar para o meio da lagoa antes da pluma leste, em região mais próxima à entrada. Na tentativa de ilustrar este comportamento observado em campo, as FIG. 5.40 e 5.41 apresentam alguns registros fotográficos em sequência temporal (da esquerda para a direita) dos testes com Rodamina e Uranina, respectivamente, com setas indicando o movimento observado. Em campo, notou-se maior visibilidade da Uranina que da Rodamina, apesar de ambos os corantes terem evidenciado o mesmo comportamento.



**FIGURA 5.40:** Registros fotográficos em sequência temporal da aplicação do corante Rodamina na entrada da lagoa 1 - CePTS UFMG/COPASA



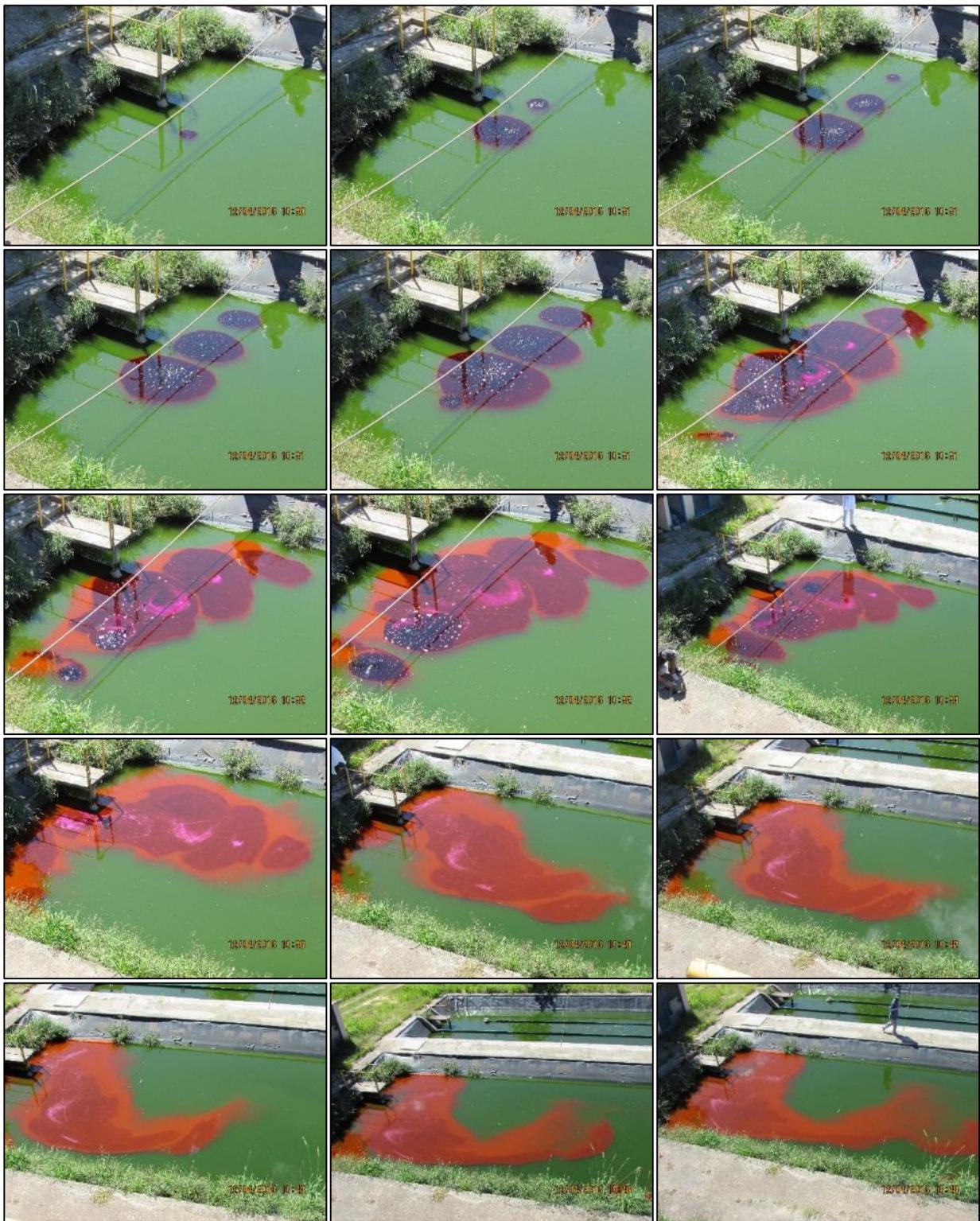
**FIGURA 5.41:** Registros fotográficos em seqüência temporal da aplicação do corante Uranina na entrada da lagoa 1, com destaque ao avanço do fluxo pelas laterais da lagoa - CePTS UFMG/COPASA

Notou-se que na lagoa 1 há também uma tendência de maior mistura no primeiro terço da lagoa, a partir das parcelas de fluido das correntes laterais que apresentavam tendência de se dispersar para o meio, independentemente da tendência principal dos dois jatos de seguir junto aos taludes. A FIG. 5.42 ilustra melhor esta tendência.



**FIGURA 5.42:** Registro fotográfico da aplicação do corante Uranina na entrada da lagoa 1, com destaque à zona de mistura no primeiro terço da lagoa - CePTS UFMG/COPASA

Quando lançado em 5 pontos distanciados em 1 metro uns dos outros em uma seção próxima à saída da lagoa 1, o corante revelou uma tendência de circulação do fluxo em sentido horário e depois em direção à saída, bem como a tendência de boa parte da pluma seguir em contrafluxo, principalmente uma parcela oriunda da lateral oeste da lagoa. A FIG. 5.43 apresenta alguns registros fotográficos em sequência temporal (da esquerda para a direita), na tentativa de ilustrar este comportamento observado em campo.



**FIGURA 5.43:** Registros fotográficos em sequência temporal da aplicação de corante em pontos próximos à saída da lagoa 1 - CePTS UFMG/COPASA

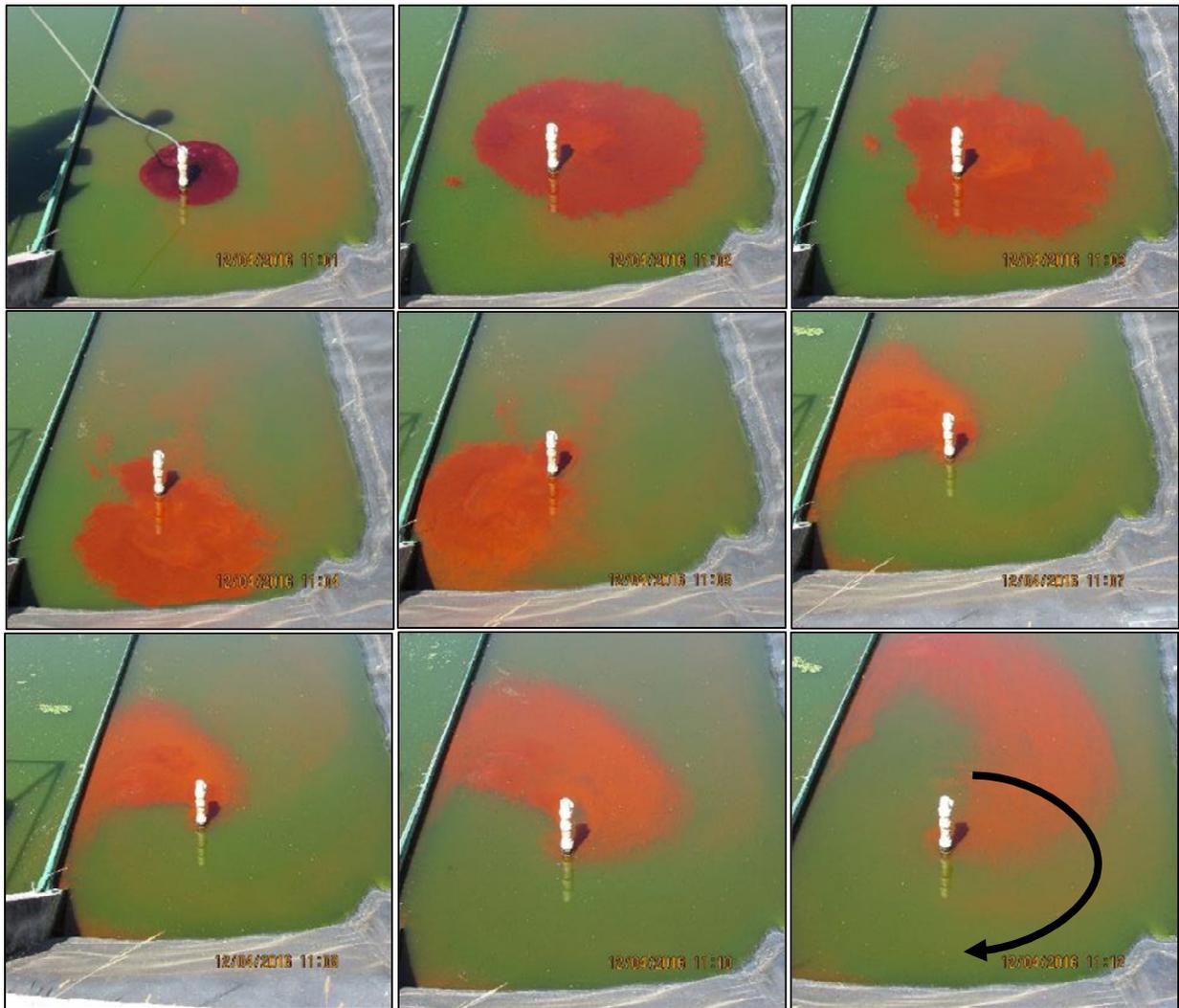
A pluma do corante no meio da lagoa 1 teve a tendência predominante de seguir em contrafluxo, na direção da entrada, conforme ilustrado na FIG. 5.44 (a seta indica o sentido

observado). Isto pode ser observado também na figura pela coloração da pluma, que se torna mais intensa no sentido da entrada.



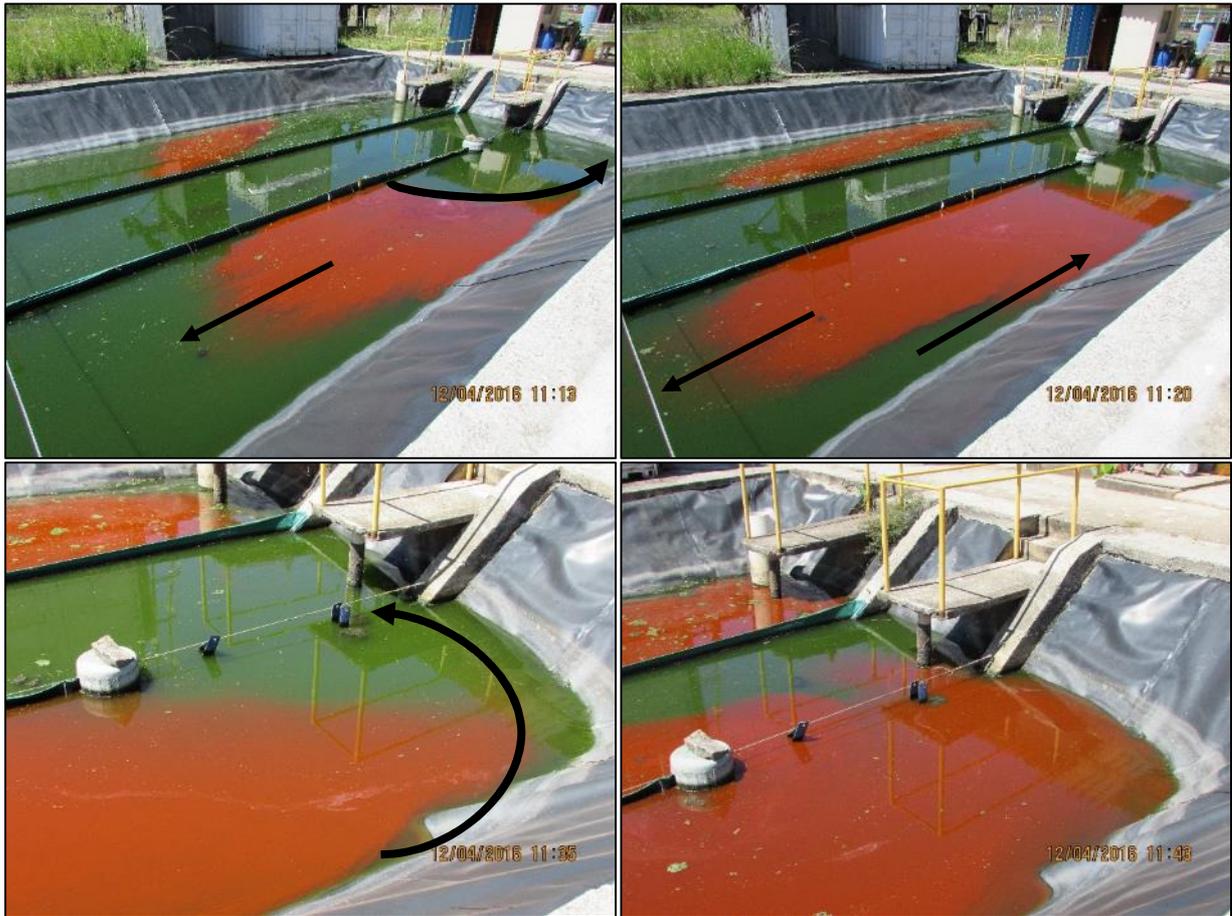
**FIGURA 5.44:** Registro fotográfico da aplicação de corante em ponto central da lagoa 1 - CePTS UFMG/COPASA

O corante lançado na tubulação de entrada da lagoa 2 (fase 2, com chicanas) revelou que o fluxo nesta região tende a percorrer uma trajetória circular, em sentido horário, ao redor do dispositivo de entrada, conforme até outrora evidenciado pelos *drogues* lançados na mesma região. Em seguida, uma parcela da pluma com tendência a seguir o sentido do fluxo pôde ser observada. A FIG. 5.45 apresenta alguns registros fotográficos em sequência temporal (da esquerda para a direita), na tentativa de ilustrar este comportamento observado em campo.



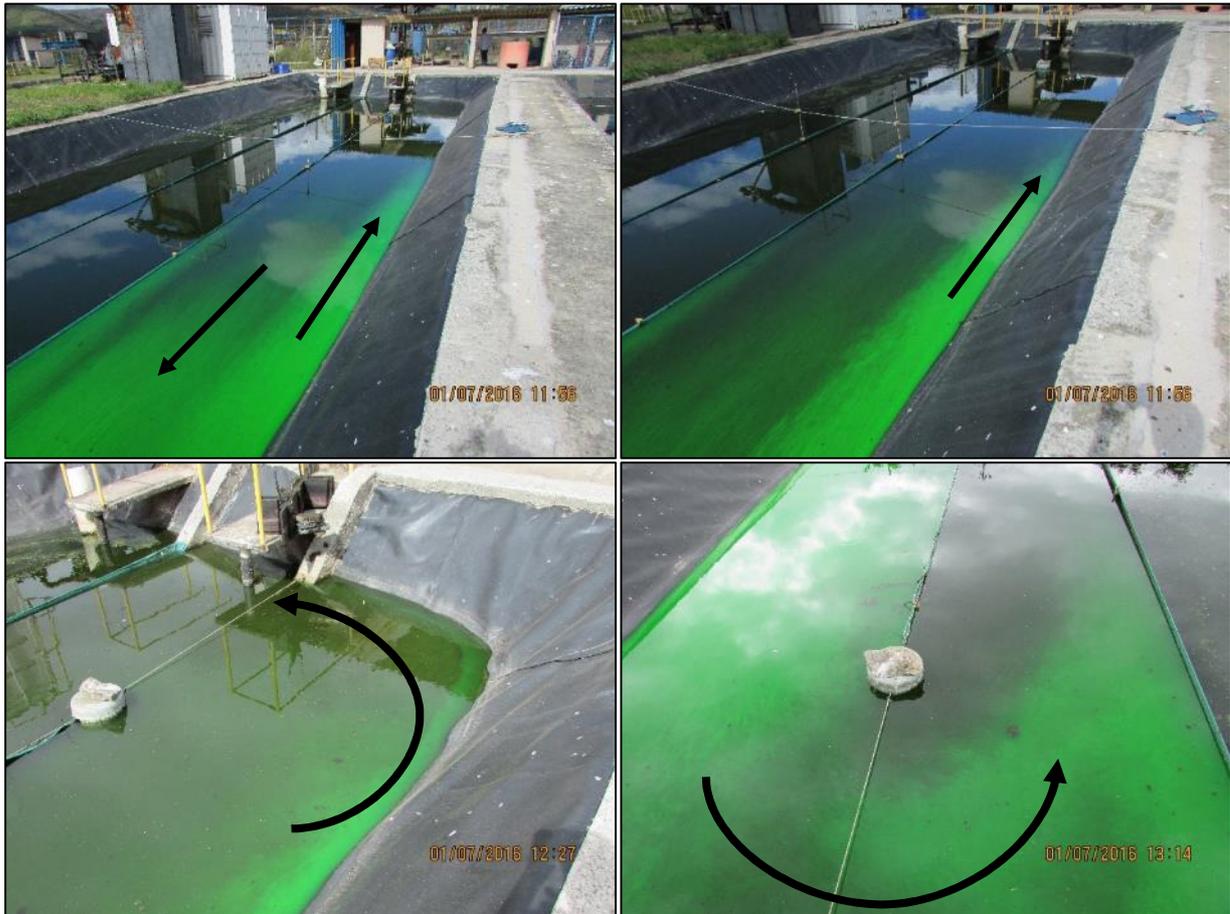
**FIGURA 5.45:** Registros fotográficos em seqüência temporal da aplicação de corante na entrada da lagoa 2, fase 2 - CePTS UFMG/COPASA

Nas passagens de um canal para o outro na lagoa 2 (com chicanas), o corante tendeu a sofrer uma mistura após executar uma curva aberta no final do canal, indicando que nas curvas das chicanas também ocorrem vórtices de recirculação do fluido. Depois da curva, notou-se uma tendência de a pluma seguir mais próxima à parede da chicana, provocando pequenas zonas de estagnação. A FIG. 5.46 apresenta, em seqüência temporal, da esquerda para a direita, o movimento de plumas de rodamina no 1º canal, com as setas indicando as tendências percebidas em campo. Ao longo de todos os canais houve a tendência de parte da pluma também seguir em contrafluxo, e não somente no sentido contrário ao teoricamente esperado para o fluxo principal. É possível perceber esta tendência nos dois primeiros registros da FIG 5.46, nos quais se vê o evidente avanço de parte da pluma em sentido contrário enquanto a outra parcela segue para a curva da chicana. Vetores de velocidade em contrafluxo também foram observados nos testes com o ADV.



**FIGURA 5.46:** Registro fotográfico em sequência temporal da aplicação de corante em uma das curvas das chicanas - CePTS UFMG/COPASA. Fenômenos observados em campo indicados nas figuras

A tendência de a pluma seguir mais próxima à parede do talude e executar uma curva aberta nas curvas das chicanas ficou mais claramente evidenciada nos testes com a uranina. A FIG. 5.47 apresenta, em sequência temporal, da esquerda para a direita, o movimento de plumas de uranina no 1º canal, com as setas indicando as tendências percebidas em campo. Também com a uranina foi observada a tendência de parte da pluma também seguir em contrafluxo, e não somente no sentido contrário ao teoricamente esperado para o fluxo principal.



**FIGURA 5.47:** Registro fotográfico em sequência temporal da aplicação de corante na lagoa 2 no CePTS UFMG/COPASA (a) e (b) tendências de seguir junto ao talude e parcelas de contrafluxo no 1° canal; (c) e (d) curva da primeira chicana. Fenômenos observados em campo indicados por setas nas figuras.

#### 5.2.1.4 Síntese conclusiva / pontos mais relevantes

Os resultados reforçam a grande aplicabilidade dos *drogues* como ferramenta para estudos hidrodinâmicos em lagoas. Os ensaios sugeriram que as trajetórias sofrem um efeito combinado do vento em cada sentido com o próprio fluxo médio na lagoa, entretanto, as trajetórias dos *drogues* lançados mais próximo à entrada aparentemente sofreram menor influência do vento. Na lagoa 1, em geral, os *drogues* revelaram uma tendência de seguir em direção à entrada (sentido contrário ao teoricamente esperado) quando inicialmente mais afastados dos taludes laterais e uma tendência de seguir pelas duas laterais em direção à saída quando mais próximos aos taludes. Este comportamento é causado pela disposição do jato de entrada, projetado no sentido contrário da saída, virado para o talude sul, que provoca o surgimento de duas frentes de fluido que percorrem as laterais da lagoa em direção à saída (norte) e uma massa de fluido que retorna pelo meio da lagoa no sentido contrário. O mesmo comportamento foi observado nos testes com corante e ADV. Na lagoa 2 com chicanas, os *drogues* revelaram claramente a

tendência geral do movimento elíptico/circular em sentido horário ao redor do dispositivo de entrada, que também foi observada nos testes com o corante e ADV. Este comportamento provavelmente ocorre pela disposição do dispositivo de entrada, que fica um pouco afastado do talude e com jato direcionado no sentido do canal, provocando turbulência à frente e uma zona de subpressão atrás do dispositivo, responsável pelos vetores de velocidade apontados para esta direção. Células de recirculação foram também evidenciadas ao longo dos três canais formados pelas chicanas. Velocidades médias nas lagoas puderam ser calculadas pelas trajetórias dos *drogues* e estiveram mais concentradas na faixa de  $10^{-4}$  -  $10^{-3}$  m/s.

Os resultados obtidos com os molinetes hidráulicos desencorajam o uso da técnica para medições de velocidade nas lagoas. Mesmo o equipamento mais preciso utilizado (faixa de medição de 0 a 4,0 m/s, com precisão de 0,0012 m/s) não apresentou resultados satisfatórios, na medida em que apenas velocidades na região de entrada foram captadas, mesmo tendo os equipamentos, considerando tal precisão, a capacidade teórica de registrar velocidades menores que podem ser encontradas nas lagoas.

O medidor acústico ADV mostrou ser capaz de captar as baixas velocidades comumente encontradas em lagoas. Além do módulo das velocidades, foi possível obter também em cada ponto a direção e o sentido das linhas de fluxo, por meio do ângulo registrado tomando por base uma linha de referência. Grande interferência foi observada nas medições na lagoa 1 devido a presença do próprio pesquisador na lagoa, próximo ao local de medição, provocando perturbação do fluxo no local. O lodo acumulado também foi um fator limitante das medições. Portanto, deve-se planejar com cautela os experimentos com o ADV, preferencialmente prevendo métodos para medição de menor interferência (o que não foi completamente possível nesta pesquisa). De modo geral, os resultados demonstraram as linhas de recirculação na lagoa e padrões médio de fluxo.

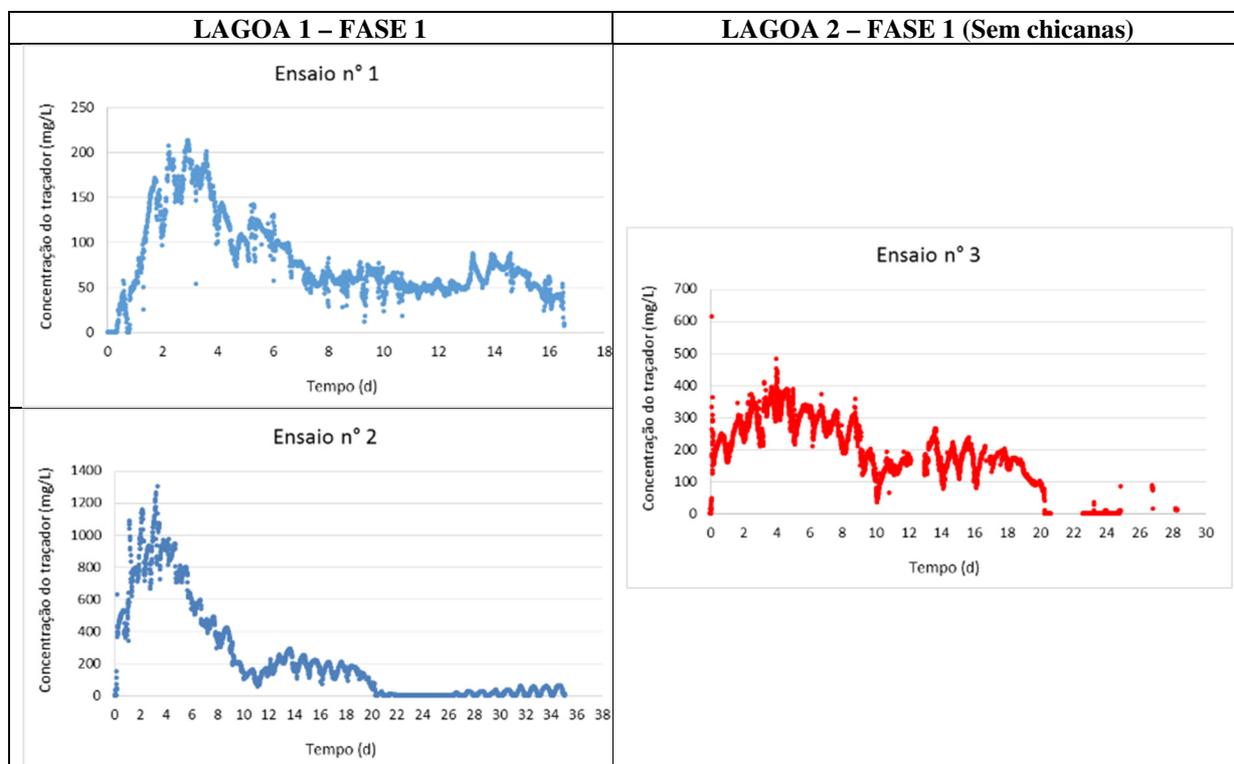
Tanto o corante líquido para tintas e roupas como os corantes fluorescentes Rodamina e a Uranina foram visíveis na superfície das lagoas após o lançamento. Entretanto, os corantes fluorescentes apresentaram maior rendimento e maior poder de tingimento. Passado um dia dos testes com os corantes fluorescentes, as lagoas sofriram mudança completa da coloração (mistura do corante em todo o volume), perdendo a cor visível do corante após cerca de uma semana. Em campo, notou-se maior visibilidade da Uranina que da Rodamina. De forma geral, os corantes se mostraram extremamente úteis na avaliação hidrodinâmica visual de lagoas (ao

menos de lagoas de porte semelhante às da presente pesquisa), e revelaram tendências de fluxo observadas também a partir dos outros métodos aplicados no presente estudo.

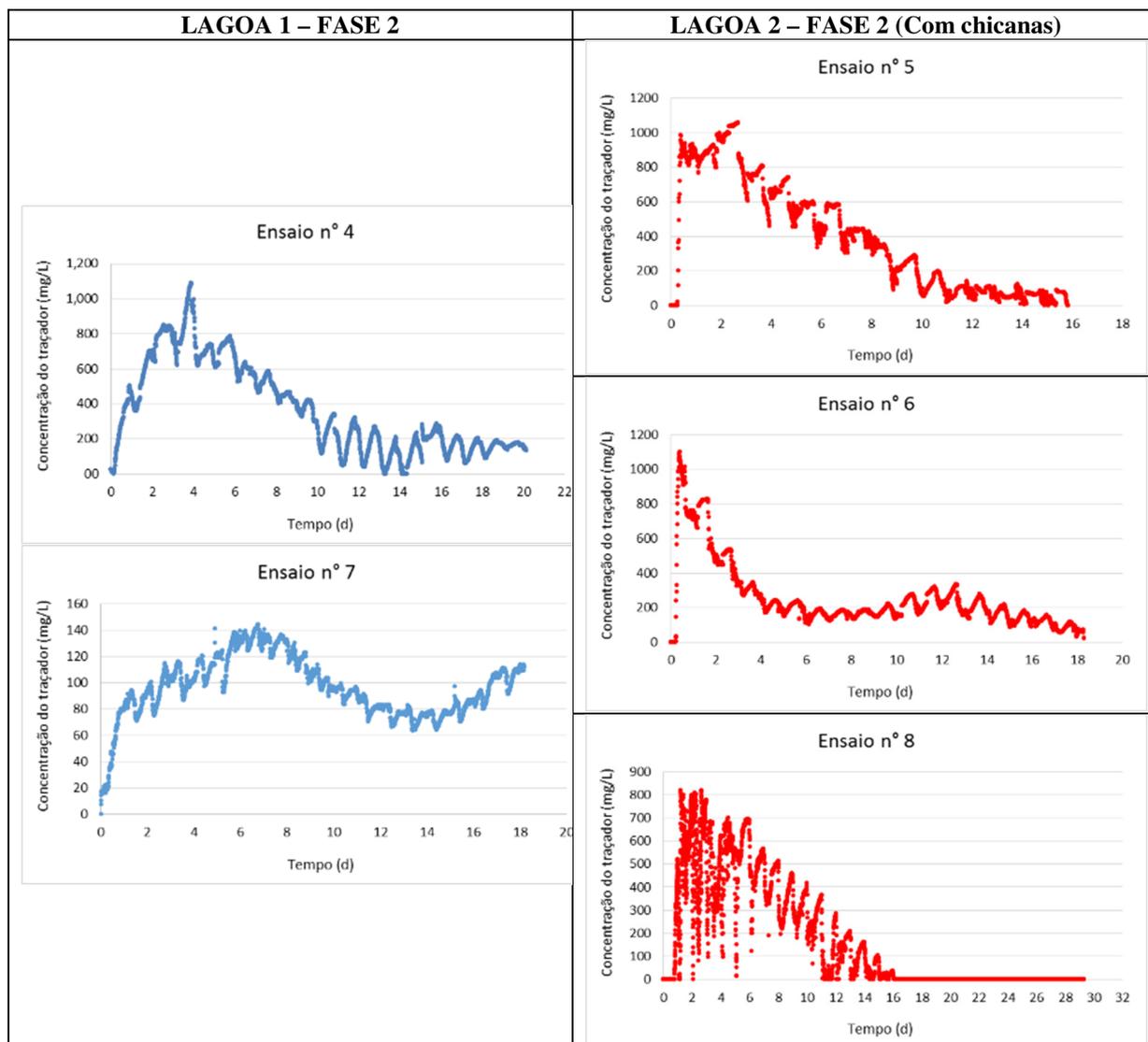
## 5.2.2 Ensaios com traçadores

### 5.2.2.1 Traçador salino - parâmetros hidráulicos

As figuras abaixo apresentam gráficos com os dados de concentração do traçador salino ao longo do tempo de duração de cada ensaio nas lagoas. A FIG. 5.48 apresenta os ensaios realizados durante a fase 1 e a FIG. 5.49 os ensaios durante a fase 2. Nessas mesmas figuras, a coluna da esquerda diz respeito a ensaios realizados na lagoa 1 (marcadores azuis) enquanto a coluna da direita diz respeito a ensaios realizados na lagoa 2 (marcadores vermelhos).



**FIGURA 5.48:** Curvas concentração do traçador salino versus tempo obtidas nos ensaios realizados durante a fase 1 de operação. CePTS UFMG/COPASA



**FIGURA 5.49:** Curvas concentração de traçador salino versus tempo obtidas nos ensaios realizados durante a fase 2 de operação. CePTS UFMG/COPASA.

O tempo zero nos gráficos corresponde ao início da introdução do traçador. Os testes tiveram duração de 16 a 35 dias, superando consideravelmente, em todos os casos, a recomendação genérica existente na literatura de que a duração do ensaio de traçador seja de 3 vezes o TDH teórico em cada unidade.

Sabe-se que os ensaios 4, 5, 7 e 8 sofreram interrupção de chegada do afluente por falta de energia no centro experimental. Na ocasião, a ETE Arrudas passava por obras de infraestrutura que exigiram intervenções nos sistemas implantados (principalmente elétrico), o que acabou por impactar o CePTS também. Nos demais ensaios não houve registros, apesar de ser bem provável o acontecimento (dada a grande frequência em que as interrupções vinham ocorrendo). No ensaio 4 a interrupção ocorreu por cerca de 28 horas, a partir das 05:00h do dia

02/05/14 (registros do operador da ETE). No ensaio 5 a interrupção ocorreu por 6 horas e 20 min, a partir das 06:50h do dia 18/07/14 (registros de uma sonda em atividade em outra pesquisa que ocorria no CePTS). No ensaio 7 a interrupção ocorreu por 15 horas e 45 minutos, a partir das 04:30h do dia 04/09/14 (informações da COPASA). No ensaio 8 também houve confirmação de intermitências pela COPASA e pelo operador do CePTS, mas por pequenos intervalos não registrados.

De uma forma geral, os formatos das curvas indicam tendência à mistura completa, até mesmo na lagoa com chicanas, onde havia a perspectiva de maior aproximação ao regime de fluxo em pistão.

As oscilações em padrão cíclico observadas em todas as curvas ocorreram diariamente e podem ser atribuídas aos eventos de estratificação, causando movimento para o fundo de parte da solução salina (mais densa), e desestratificação, com mistura vertical. Portanto, durante esses eventos, os sensores da superfície registram continuamente camadas do fluido mais concentradas e menos concentradas a cada ocorrência dos eventos térmicos. Tais assertivas são corroboradas pelos dados já apresentados do perfil térmico, que comprovam eventos diários de estratificação térmica e desestratificação nas lagoas. Não foram observados na literatura registros de ensaios com traçadores com essas oscilações explícitas, possivelmente devido às frequências de medição ou pelo perfil térmico das lagoas (não ocorrência de mistura vertical em ciclos diários, lagoas mais profundas etc.). Neste trabalho, as elevadas frequências do monitoramento (medições a cada 5 a 30 minutos) evidenciaram essas oscilações.

Os parâmetros hidráulicos obtidos nos ensaios estão apresentados na TAB. 5.9, agrupados por fase de operação.

**TABELA 5.9:** Parâmetros hidráulicos obtidos com a realização dos ensaios de traçador salino nas lagoas do CePTS UFMG/COPASA.

Ensaio n° (lagoa)	$t(d)$	$\overline{TDH_{\Delta c}}$ (d)	%R	$d$	$N$	$N_p$	$N_\gamma$	$\varphi$	$t_i$ (min)	$t_p$ (min)	$E_v$	$\Psi$	$\lambda$
<b>FASE 1:</b>													
1 (L1)	6,0/3,8*	7,0	33,6	0,29	2	2	2	0,05	450	4200	1,16	-0,16	0,48
2 (L1)	6,0/3,8*	6,5	47,8	0,72	2	2	2	0,01	98	4617	1,09	-0,58	0,53
3 (L2)	6,8	8,5	26,7	0,31	2	1	2	0,01	49	144	1,26	-0,26	0,01
<b>FASE 2:</b>													
4 (L1)	3,1/2,1*	7,1	92,7	0,37	2	2	2	0,00	0	5600	2,27	-1,27	1,25
5 (L2)	2,2	4,1	100,0	0,31	2	3	2	0,06	430	3885	1,85	-0,85	1,22
6 (L2)	2,1	6,2	89,0	0,73	1	1	1	0,11	320	575	2,98	-1,98	0,19
7 (L1)	3,5/2,3*	9,0	21,0	0,19	3	4	2	0,00	10	9720	2,59	-1,53	1,95
8 (L2)	1,8	5,2	100,0	0,30	2	1	2	0,02	1130	1730	2,95	-1,95	0,68

\* Excluindo-se o volume ocupado pelo lodo

Nota 1: Na fase 1 as lagoas operaram em paralelo (e L2 sem chicanas), e na fase 2 as lagoas operaram em série, com chicanas na L2

Nota 2:  $t(d)$  = TDH teórico, para as vazões teóricas de operação (d);  $\overline{TDH_{\Delta c}}$  = TDH médio real (d); %R = porcentagem de recuperação do traçador (%);  $d$  = número de dispersão (-);  $\varphi$  = índice de curto-circuito (-);  $N, N_p, N_\gamma$  = número de tanques em série (-);  $E_v$  = eficiência volumétrica;  $\Psi$  = fração de zonas mortas;  $\lambda$  = eficiência hidráulica

A TAB. 5.10 apresenta comparação entre os valores de  $d$  obtidos com os testes de campo e aqueles obtidos com equações empíricas da literatura registradas por Von Sperling (2002) e descritas no item 3.5.2.3.

**TABELA 5.10** – Números de dispersão ( $d$ ) obtidos para as lagoas com base em equações de literatura e comparação com os obtidos com as curvas de traçador salino.

Ensaio n° (lagoa)	Polprasert e Bhattacharai (1985)	Agunwamba <i>et</i> <i>al.</i> (1992)	Yanez (1993)	Nameche e Vasel (1998)	Von Sperling (1999)	Curva do traçador (este trabalho)
<b>FASE 1:</b>						
1 (L1)	0,042	0,155	0,220	0,308	0,233	<b>0,29</b>
2 (L1)	0,027	0,187	0,221	0,321	0,234	<b>0,72</b>
3 (L2)	0,040	0,161	0,223	0,335	0,236	<b>0,31</b>
<b>FASE 2:</b>						
4 (L1)	0,020	0,212	0,221	0,323	0,234	<b>0,37</b>
5 (L2)	0,001	0,033	0,024	0,045	0,025	<b>0,31</b>
6 (L2)	0,001	0,034	0,024	0,045	0,025	<b>0,73</b>
7 (L1)	0,022	0,203	0,221	0,323	0,234	<b>0,19</b>
8 (L2)	0,001	0,036	0,024	0,045	0,025	<b>0,30</b>

Os valores do número de dispersão  $d$  obtidos indicam elevada dispersão em ambas as lagoas e fases de operação, de acordo com a classificação de Metcalf e Eddy (2003) ( $d \geq 0,25$ ). Os índices de curto-circuito ( $\phi$ ) quase nulos e os reduzidos números equivalentes de tanques em série ( $N$ ) também indicam elevado grau de mistura nas duas lagoas. A antecipação do pico do traçador foi mais pronunciada na lagoa 2, resultando em valores de eficiência hidráulica  $\lambda$  substancialmente menores nesta unidade, o que também não era esperado. Tal resultado pode ser indicativo de curtos circuitos entre as chicanas, via passagem do fluido por baixo das chicanas ou próximo aos pontos de fixação das lonas na parede dos taludes (FIG. 5.50) em eventual aumento do nível na lagoa durante os testes, caminhos preferenciais causados por estratificação térmica ou até mesmo combinação desses dois fatores. A antecipação do pico também está relacionada à grande dispersão nas unidades. Praticamente todos os pesquisadores que utilizaram traçador no estudo da hidrodinâmica de lagoas observaram a existência de curto-circuito hidráulico. Nesse sentido, Shilton (2001) sugere que este comportamento é, na verdade, uma característica inerente a todos os sistemas de lagoa.



**FIGURA 5.50:** Detalhe do local de fixação de uma das chicanas da lagoa 2 no talude - CePTS UFMG/COPASA.

Outra observação importante é que os TDH médios resultaram superiores aos teóricos (em muitos casos em mais que o dobro), o que pode ter ocorrido devido às intermitências do afluente que ocorreram durante os ensaios e também à presença de zonas de estagnação, zonas

de troca lenta nas lagoas, sedimentação da solução salina (mais densa) e retenção do traçador no sistema com posterior liberação, causando, em ambos os casos, retardo na chegada de volume considerável do traçador à saída. Esses resultados também conduziram a valores de  $E_v$  superiores à unidade e, conseqüentemente, valores negativos para a fração de zonas mortas. A intermitência do efluente nos testes ou a eventual redução da vazão ao longo dos ensaios também podem ter contribuído com os valores de  $E_v$  superiores à unidade, visto que a TDH teórico comparado ( $\tau$ ) pode ter sido maior que o efetivamente utilizado. Já de acordo com Levenspiel (2000), o balanço de massa do traçador em reatores não permite que haja retardo da curva de distribuição dos tempos de residência (fazendo com que o TDH real resulte maior que o teórico), de forma que as únicas explicações possíveis são: medição incorreta das vazões; traçador não inerte (adsorveu nas superfícies) ou não atendimento da condição de reator fechado. As hipóteses de zonas de estagnação ou adsorção do traçador em superfícies (ex: lodo acumulado, biomassa) com posterior liberação parecem ser mais plausíveis para o caso.

Na lagoa 1 o número de dispersão  $d$  variou de 0,19 a 0,72. Se desconsiderado o valor consideravelmente elevado obtido no ensaio 2 (0,72), observa-se que os demais são bem próximos entre si, com média de 0,28.

Destacam-se também os elevados valores de  $d$  obtidos na lagoa 2, bem próximos aos obtidos na lagoa 1 e até mesmo superiores. Devido à presença das chicanas na lagoa 2 durante a fase 2, havia a perspectiva de maior aproximação ao regime idealizado de fluxo em pistão para esses ensaios, ou seja, baixos valores de  $d$ , o que não ocorreu. Desconsiderando o valor discrepante do número de dispersão obtido no ensaio 6, os demais valores de  $d$  para a lagoa 2 na fase 2 são praticamente idênticos, com média de 0,31, que corresponde ao mesmo valor encontrado na mesma lagoa durante a fase 1 de operação.

A TAB. 5.10 sugere que as previsões de Yanez (1993), Nameche e Vasel (1998) e Von Sperling (1999) são as que mais se aproximaram dos valores obtidos com os testes de campo na fase 1. Os resultados do modelo de Polprasert e Bhattarai (1985) foram o que mais se afastaram dos demais e dos dados de campo. Tal característica é especialmente observada nesse modelo em faixas mais elevadas de  $d$ , como é neste caso. Em relação a essas equações, importante destacar que são empíricas e geralmente utilizadas para prever o valor do número de dispersão  $d$  quando do projeto de futuras instalações (VON SPERLING, 2002). Ademais, suas

formulações não contemplam fatores de grande influência no comportamento hidrodinâmico das lagoas, como as condições de entrada e saída, estratificação térmica, ventos e turbulência.

Excluindo-se as comparações com o modelo de Polprasert e Bhattarai (1985), observa-se na TAB. 5.10, que a previsão dos valores do número de dispersão obtidos por meio das curvas de traçador na lagoa 1 foram ligeiramente superiores ou inferiores aos valores obtidos com as equações de literatura, a despeito do obtido no ensaio 2 (este muito superior). Entretanto, tais valores foram consideravelmente discrepantes no caso da lagoa 2 durante a fase 2 (com chicanas), visto que, de fato, não era esperada grande dispersão em tal cenário de operação. Neste último caso, todas as equações estimaram valores de  $d$  muito mais baixos.

No que diz respeito às variações observadas da porcentagem de recuperação do traçador (média de 36% na fase 1 e 81% na fase 2) e dos baixos valores encontrados (valores de até 21% foram encontrados), este parâmetro pode não ter grande influência nas determinações do TDH, tal como observaram Borges *et al.* (2009) e Williams e Nelson (2011) em traçadores em Sistemas Alagados Construídos de escoamento horizontal subsuperficial para tratamento de esgotos. Borges *et al.* (2009) compararam fluoresceína sódica e rodamina WT, chegando a respostas semelhantes utilizando ambos os traçadores, apesar de o último ter tido menor porcentagem de recuperação. Williams e Nelson (2011), avaliando brometo e rodamina WT, verificaram que as porcentagens de recuperação do traçador parecem não ser determinantes para a obtenção do TDH do sistema, inclusive proporcionando picos coincidentes. Os resultados do trabalho de Matos *et al.* (2015), utilizando sal de cozinha como traçador em sistemas alagados construídos situados no CePTS (mesmo local da presente pesquisa), também indicaram reduzida influência do percentual de recuperação na resposta das curvas de distribuição dos tempos de residência. A despeito de tais considerações, a formulação teórica para análise e obtenção do TDH tendo por base a curva de distribuição dos tempos de residência para os casos em questão tem por premissa a obediência ao balanço de massa do traçador no sistema, de forma que ensaios que resultem em percentual de recuperação substancialmente diferente de 100% devem ser cuidadosamente analisados (STAMOU e ADAMS, 1988; TEIXEIRA e SIQUEIRA, 2008).

#### 5.2.2.2 Considerações sobre o uso do traçador salino (cloreto de sódio)

Conforme já mencionado, as quantidades de sal de cozinha utilizadas nos testes foram definidas a partir de ensaios exploratórios, quando se chegou a uma quantidade mínima por lagoa (de acordo com o volume) capaz de superar razoavelmente o valor de background (3 a 4 vezes) e

não ultrapassar o limite de quantificação da sonda. Buscou-se diluir o traçador em volume mínimo de água que facilitasse a mistura e assegurasse a dissolução.

Ao se observar tais requisitos, chegou-se nas quantidades mínimas de 300 kg para a lagoa 1 e 150 kg para a lagoa 2, que diluídos em 1 m<sup>3</sup> e 0,5 m<sup>3</sup> de água, respectivamente, resultaram em concentrações de solução de traçador inferiores a 300 kg/m<sup>3</sup>, com folga no que diz respeito ao limite de solubilidade do NaCl em água à 20°C (de 360 kg/m<sup>3</sup>), para viabilizar a mistura. Nota-se então que, mesmo para um sistema de menor porte como este em estudo, as quantidades mínimas utilizadas do sal de cozinha são consideráveis e podem inviabilizar o transporte em veículo comum (passando a demandar veículo de carga), principalmente quando se considera que as estações de tratamento de esgoto comumente ficam situadas a longa distância dos centros urbanos e comerciais.

A etapa de homogeneização do traçador também exigiu bastante esforço. Cada ensaio demandou cerca de 6h para ser completamente concluído por 2 pessoas. A menos que a mistura seja mecânica, muita dificuldade também pode ser encontrada para movimentar a massa d'água manualmente. Em termos práticos, observou-se que a forma mais eficiente de preparo da solução (menor dificuldade de mistura manual) ocorre com o preenchimento inicial da metade do recipiente com água, depois adição da maior parte do sal com mistura instantânea até a saturação e então adição sequencial de água e novamente sal a cada vez que se observar saturação da solução.

Em termos de custos, estima-se que foram gastos cerca de R\$ 300,00/teste, valor que pode ser competitivo quando se compara com testes com os demais traçadores (aqueles com custos maiores associados aos equipamentos), principalmente em casos em que há previsão de repetições.

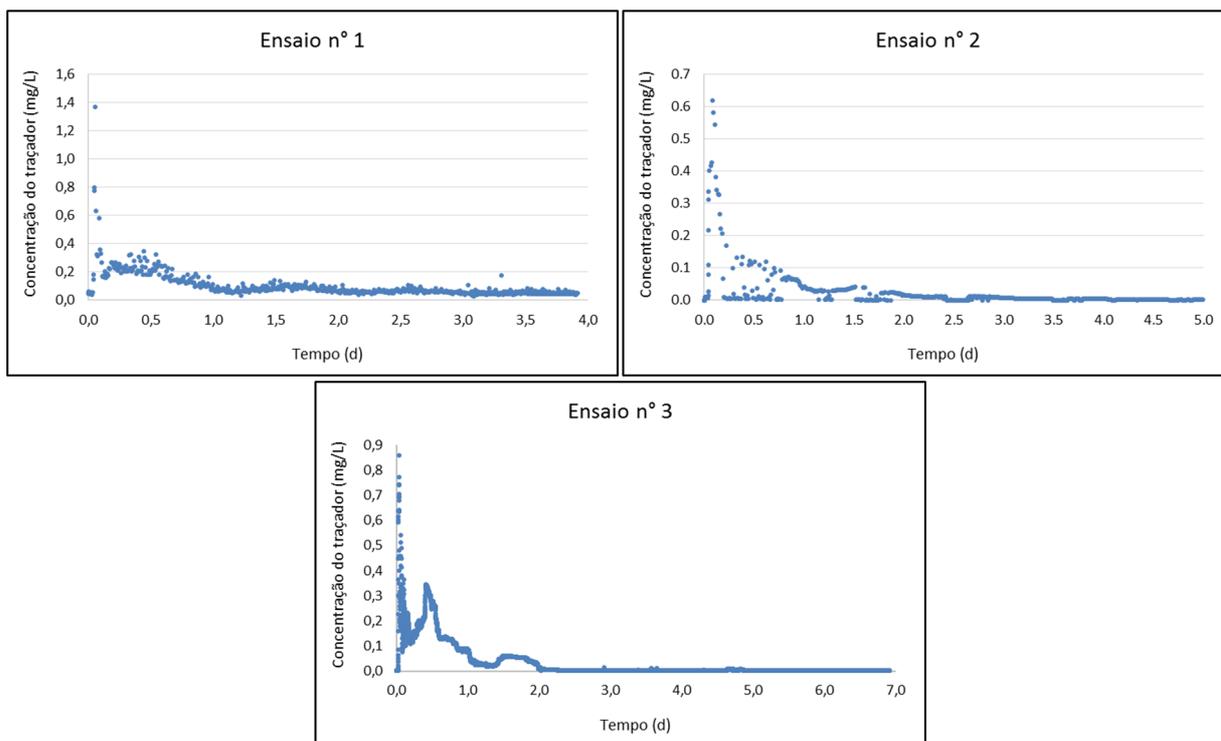
A concentração de sal no efluente pôde ser facilmente medida por um sensor de condutividade eléctrica, que foi capaz de proporcionar medições semi-contínuas ao longo do período de teste. Não há, portanto, necessidade de coleta de amostras e análises no laboratório, como é necessário no caso de outros traçadores.

Por fim, há de se considerar o fator densidade da solução, visto que a solução do traçador (mais densa) tende a ir para o fundo da lagoa e seguir em direção à saída sem mistura com as camadas superiores do líquido. Nas lagoas do presente estudo houve a desestratificação em

eventos diários, o que favoreceu a mistura e foi responsável pelos picos menores do traçador a cada dia. Entretanto, em lagoas mais profundas, a realização de testes com traçador salino em eventos de estratificação térmica mais duradouros pode sofrer influência do efeito da densidade da solução, eventualmente revelando um curto-circuito que pode não ocorrer na realidade. Neste sentido, recomenda-se o ajuste da densidade da solução via controle da concentração e temperatura da mistura ou realização dos ensaios preferencialmente em períodos nos quais seja observada a mistura vertical na lagoa. Recomenda-se também introduzir o mais lentamente possível a massa de traçador (e não de forma instantânea), para evitar a separação de fases devido ao fator densidade, mas sempre em período de tempo inferior a 2% do TDH das lagoas, para não descaracterizar a aplicação em pulso, conforme recomendações de Bracho *et al.* (2009).

#### 5.2.2.3 Traçador fluorescente – parâmetros hidráulicos

A FIG. 5.51 apresenta gráficos com os dados de concentração do traçador fluorescente (uranina) ao longo do tempo de duração de cada ensaio. Os testes com traçador fluorescente ocorreram apenas durante a fase 2, e somente resultados na lagoa 1 foram considerados razoáveis. Na lagoa 2, todos os testes realizados sofreram algum tipo de interferência externa que inviabilizou completamente os resultados, a exemplo de chuvas, que provocaram extravasamento na lagoa, entupimento do equipamento, falhas elétricas, interrupção no fornecimento de esgoto e defeito na bomba do Cepts.



**FIGURA 5.51:** Curvas concentração de traçador fluorescente versus tempo obtidas nos ensaios realizados na lagoa 1 durante a fase 2 de operação - CePTS UFMG/COPASA.

De uma forma geral, os formatos das curvas indicam tendência à mistura completa, com rápida chegada do traçador na saída e pico consideravelmente antecipado. Os parâmetros hidráulicos obtidos nos ensaios estão apresentados na TAB. 5.11.

**TABELA 5.11:** Parâmetros hidráulicos obtidos com a realização dos ensaios de traçador fluorescente (uranina) nas lagoas do CePTS UFMG/COPASA.

Ensaio n <sup>o</sup> (lagoa)	$t(d)$	$\overline{TDH}_{\Delta c}$ (d)	%R	$d$	$N$	$N_p$	$N_\gamma$	$\varphi$	$t_i$ (min)	$t_p$ (min)	$E_v$	$\Psi$	$\lambda$
<b>FASE 2:</b>													
<b>1 (L1)</b>	3,6/2,4*	1,5	68,5	0,77	1	1	1	0,00	0	81	0,45	0,55	0,02
<b>2 (L1)</b>	3,3/2,2*	0,8	31,9	0,90	1	1	1	0,00	15	124	0,23	0,77	0,03
<b>3 (L1)</b>	5,6/3,7*	0,7	30,6	0,89	2	1	1	0,00	33	57	0,12	0,88	0,01

\* Excluindo-se o volume ocupado pelo lodo

Nota:  $t(d)$  = TDH teórico (d);  $\overline{TDH}_{\Delta c}$  = TDH médio real (d); %R = porcentagem de recuperação do traçador (%);  $d$  = número de dispersão (-);  $\varphi$  = índice de curto-circuito (-);  $N, N_\gamma, N_p$  = número de tanques em série (-);  $E_v$  = eficiência volumétrica;  $\Psi$  = fração de zonas mortas;  $\lambda$  = eficiência hidráulica

A TAB. 5.12 apresenta comparação entre os valores de  $d$  obtidos com os testes de campo e aqueles obtidos com equações empíricas da literatura registradas por Von Sperling (2002) e descritas no item 3.5.2.3.

**TABELA 5.12** – Números de dispersão ( $d$ ) obtidos para as lagoas com base em equações de literatura e comparação com os obtidos com as curvas de traçador fluorescente.

Ensaio n° (lagoa)	Polprasert e Bhattarai (1985)	Agunwamba <i>et al.</i> (1992)	Yanez (1993)	Nameche e Vasel (1998)	Von Sperling (1999)	Curva do traçador (este trabalho)
<b>FASE 2:</b>						
<b>1 (L1)</b>	0,023	0,198	0,220	0,311	0,233	<b>0,77</b>
<b>2 (L1)</b>	0,023	0,199	0,220	0,311	0,233	<b>0,90</b>
<b>3 (L1)</b>	0,038	0,160	0,220	0,311	0,233	<b>0,90</b>

Os valores do número de dispersão  $d$  obtidos foram semelhantes nos três testes e indicam elevada dispersão, de acordo com a classificação de Metcalf e Eddy (2003) ( $d \geq 0,25$ ). Os índices de curto-circuito ( $\phi$ ) quase nulos e os reduzidos números equivalentes de tanques em série ( $N$ ) também indicam elevado grau de mistura. A antecipação do pico do traçador foi consideravelmente pronunciada, indicando curtos circuitos. Diferentemente dos resultados obtidos com o traçador salino, os TDH médios foram inferiores aos teóricos, o que era esperado em função das condições hidrodinâmicas observadas. Os números de dispersão “ $d$ ” obtidos foram superiores aos sugeridos pelas equações empíricas.

#### 5.2.2.4 Considerações sobre o uso do traçador fluorescente (uranina)

Para registro de considerações práticas a respeito do traçador fluorescente, notou-se a facilidade de execução dos testes, em função da reduzida massa requerida do traçador, bem como a facilidade de identificação visual do avanço da pluma; características ideais de um traçador para aplicação em lagoas. Entretanto, deve-se ter em mente as perdas possíveis deste traçador no teste, principalmente com a degradação pela luz solar, turbulência, salinidade e adsorção na matéria orgânica e lodo, e a possibilidade de variação da concentração com o pH. Neste último caso, há o atenuante de que maiores pH (tal como observado em lagoas) estão associados a maiores intensidades de fluorescência (SUHOGUSOFF *et al.*, 2005). Tal como nos ensaios com traçador salino, as perdas certamente contribuíram com os reduzidos percentuais de recuperação obtidos nos testes.

#### 5.2.2.5 Síntese conclusiva / pontos mais relevantes

Os testes com traçador salino sugerem uma tendência geral à mistura completa nos sistemas, até mesmo (e pronunciadamente) na lagoa com chicanas, onde havia a perspectiva de maior aproximação ao regime de fluxo em pistão. Além do elevado valor do número de dispersão, os índices de curto-circuito próximos de zero e o reduzido número equivalente de tanques em série

também indicam elevado grau de mistura nas duas lagoas. A considerável antecipação do pico do traçador na lagoa com chicanas pode ser indicativo de curtos circuitos entre as chicanas, via passagem do fluido por baixo dos defletores ou próximo aos pontos de fixação das lonas na parede dos taludes. Os tempos de detenção hidráulica reais médios resultaram superiores aos teóricos, o que pode ter ocorrido devido às intermitências do afluente que ocorreram durante os ensaios, alterações na vazão de entrada e também à presença de zonas de estagnação e zonas de troca lenta nas lagoas, causando retardo na chegada de volume considerável do traçador à saída. A duração dos testes (muito mais que 3 vezes o HRT teórico) e a lenta saída do traçador, com possibilidade de aparecimento posterior de outra parcela do fluido, sugerem que testes de traçador em condições semelhantes à deste estudo devem ser realizados por mais de 10 vezes o HRT teórico para obtenção de mais informações a respeito do comportamento hidrodinâmico da unidade em estudo.

Os principais resultados e percepções práticas quanto aos testes realizados com o sal de cozinha permitiram algumas considerações no que diz respeito ao uso do mesmo como traçador em sistemas de lagoas. Essas substâncias são mais baratas, acessíveis e simples de quantificar, mas as quantidades requeridas dificultam o transporte, o preparo da solução e o controle da homogeneidade da mistura, geralmente demandando elevado esforço e tempo em cada ensaio. Em lagoas maiores, a aplicação torna-se praticamente inviável quando são consideradas as quantidades necessárias de sal. A densidade da solução também pode resultar em respostas irreais nas lagoas, já que é difícil evitar o gradiente de concentração do traçador ao longo do perfil vertical, principalmente em lagoas com períodos mais duradouros de estratificação térmica (mais profundas).

A despeito de todos os cuidados que podem ser tomados, ressalta-se que as quantidades do traçador e os volumes da solução necessários quando se utiliza o sal de cozinha, bem como as vazões de aplicação resultantes (a fim de respeitar o tempo do pulso) e as questões de densidade, constituem fatores de elevado impacto e interferência nas condições hidrodinâmicas das lagoas; o que geralmente não é admitido para um traçador. Pode-se então considerar que o sal de cozinha não é um bom traçador para esses sistemas, podendo ser utilizado com mais sucesso em sistemas com menores TDH e em sistemas com meio poroso (a exemplo de *wetlands* construídos), visto que o fator densidade terá influência reduzida e a quantidade necessária do soluto será menor (em geral, a metade da requerida em lagoa com mesmas dimensões).

Somente resultados dos testes com traçador fluorescente na lagoa 1 foram considerados razoáveis. De uma forma geral, os formatos das curvas indicam tendência à mistura completa, com rápida chegada do traçador na saída e pico consideravelmente antecipado. Diferentemente dos testes com o traçador salino, os ensaios com traçador fluorescente forneceram valores semelhantes do número de dispersão da lagoa. Notou-se a facilidade de execução dos testes com o traçador fluorescente, entretanto, deve-se ter em mente as perdas possíveis deste traçador no teste.

### **5.3 Modelagem em CFD**

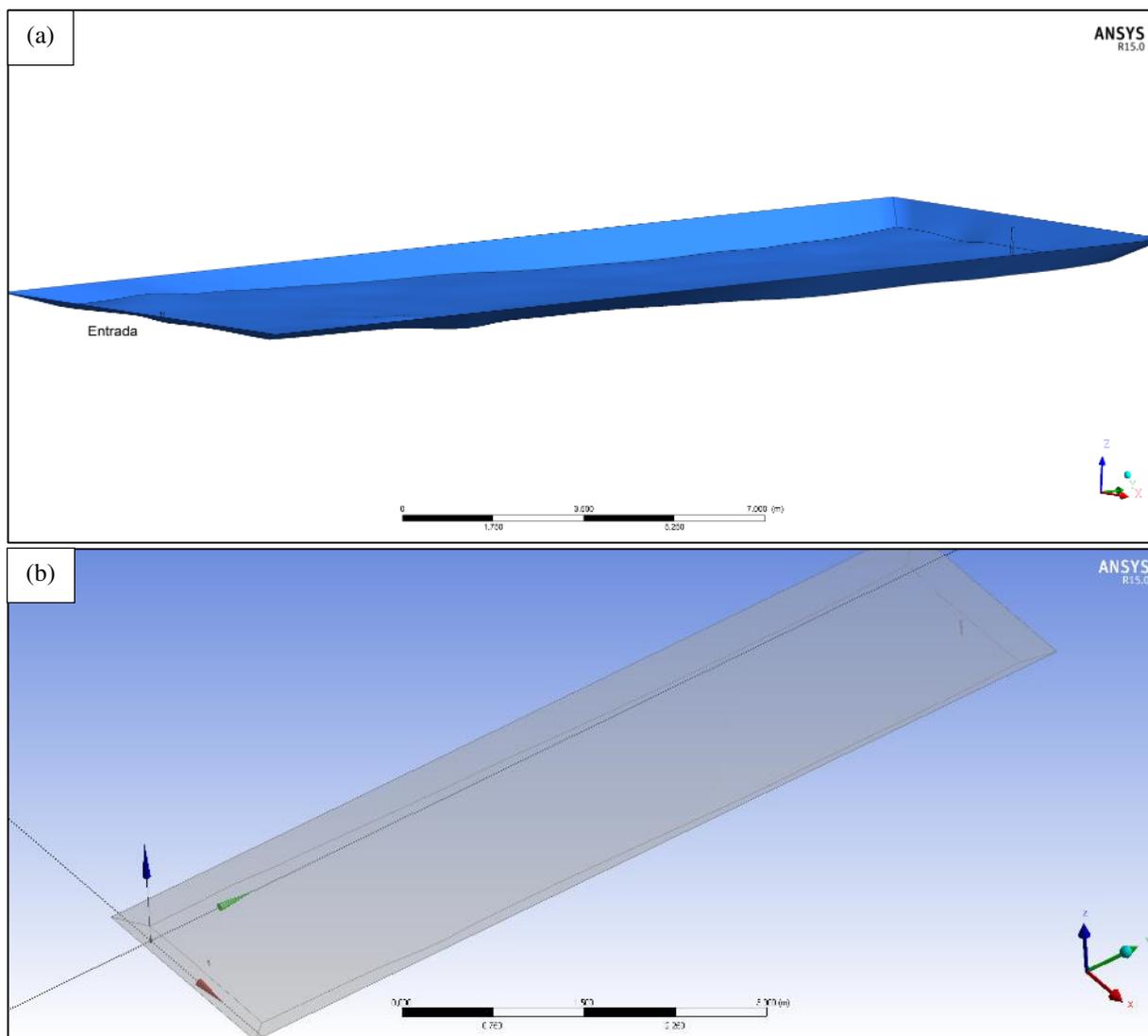
Os itens que seguem apresentam imagens e eventuais comentários das geometrias e malhas desenvolvidas (item 5.3.1), a partir das quais são apresentados os principais resultados de cada um dos cenários de estudo simulado (item 5.3.2).

#### **5.3.1 Geometrias e malhas**

##### **5.3.1.1 Lagoa 1 (lodo batimétrico)**

A FIG. 5.52 ilustra em perspectiva a geometria tridimensional da lagoa 1, desenvolvida a partir da exclusão do lodo acumulado do domínio da simulação, em conformidade com o levantamento batimétrico, mantendo-se apenas o volume ocupado pelo fluido. A configuração topográfica da interface do lodo com o fluido é inteiramente preservada neste modelo.

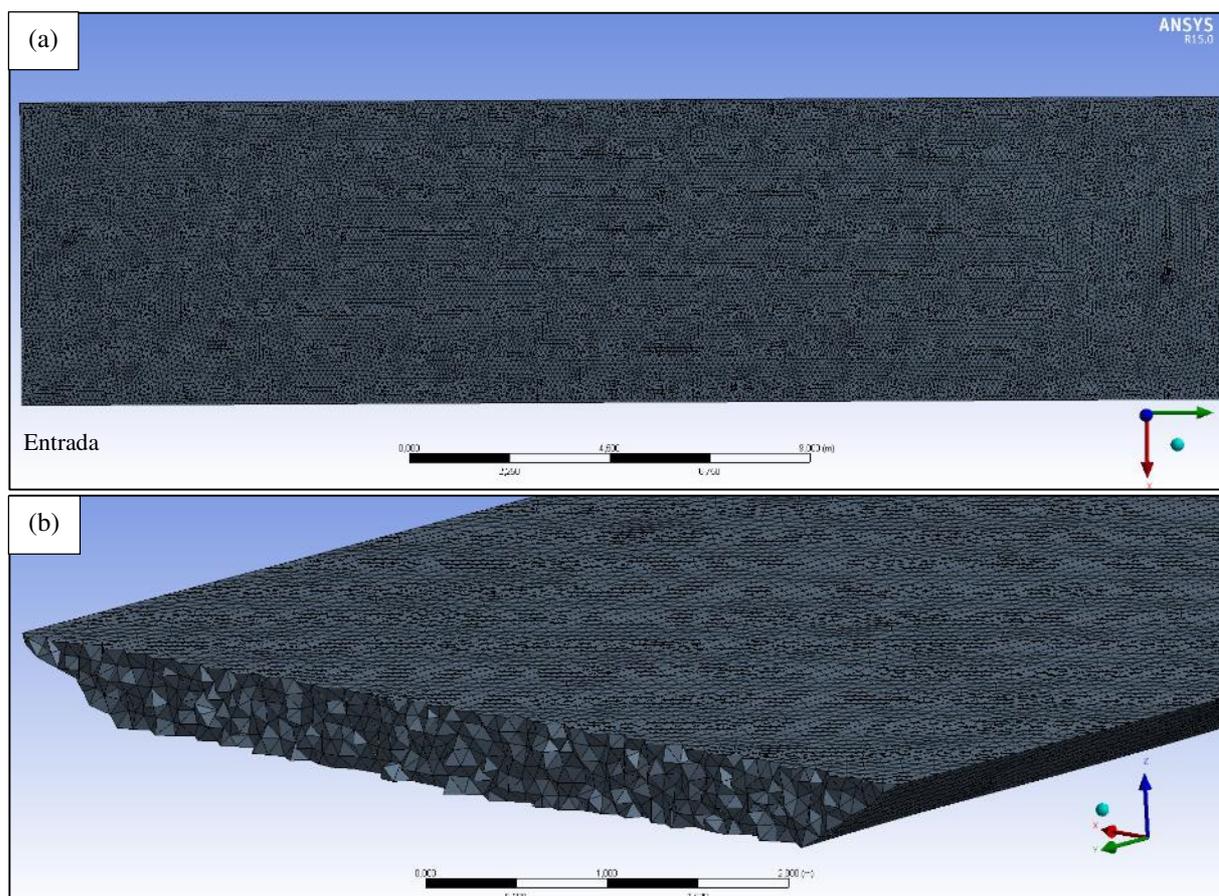
É possível notar menor profundidade do fluido (maior quantidade de lodo acumulado) mais próximo aos dispositivos de entrada e saída e maior profundidade do fluido (menor acúmulo de lodo) pouco depois do meio da lagoa, tal como apresentado no mapa batimétrico (FIG. 4.7).



**FIGURA 5.52:** (a) Vista e perspectiva da geometria da lagoa 1 no modelo em CFD, considerando a geometria do lodo conforme batimetria e (b) vista com relação aos eixos de referência na origem do sistema cartesiano.

A malha final obtida para este modelo está apresentada em vista superficial (plano XY) na FIG. 5.53a e em vista isométrica de um corte transversal, em um plano XZ que passa pelo meio da lagoa, na FIG. 5.53b. Notam-se na FIG. 5.53b os volumes tetraédricos formados e que o grau de refinamento da malha foi suficientemente preciso para distribuir múltiplos pontos de cálculo ao longo da pequena profundidade da lagoa (critério essencial para captar os fenômenos que afetam o comportamento hidrodinâmico no sentido da profundidade da lagoa, tais como recirculações e estratificação térmica), bem como permitir a consideração de condições de contorno em locais de pequena dimensão, tais como entradas e saídas (este último critério interferia na dimensão mínima da malha, principalmente). Na lagoa com lodo acumulado a dimensão máxima da malha teve de ser menor que nos demais modelos, de modo a permitir um refinamento vertical adequado nos locais com reduzida profundidade do fluido (maior lodo

acumulado), tal como na entrada. As principais características da malha estão destacadas na TAB. 5.13.



**FIGURA 5.53:** (a) Vista superficial no plano XY da malha da lagoa 1 – lodo batimétrico - no modelo em CFD e (b) Vista isométrica de corte transversal em um plano XZ que passa pelo meio da lagoa.

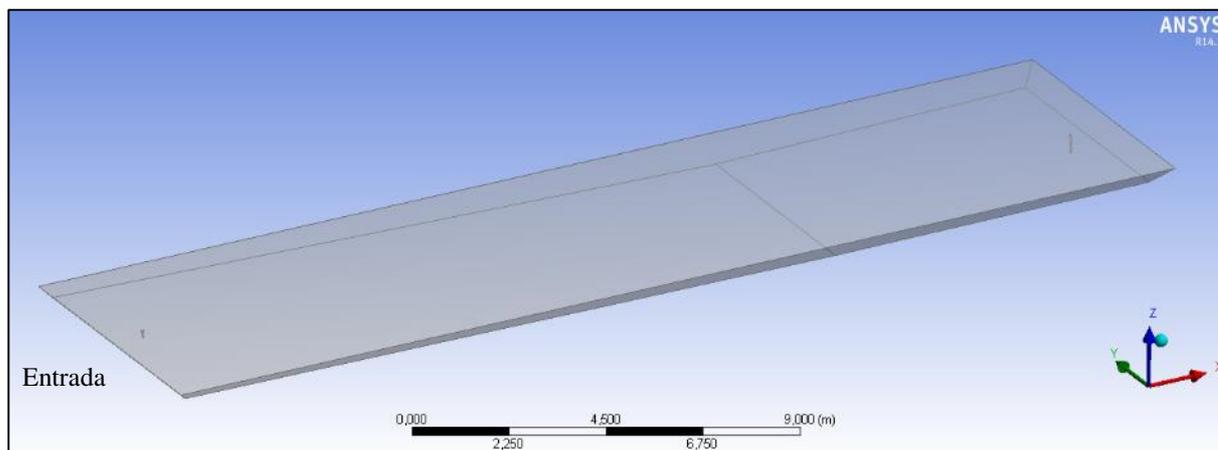
**TABELA 5.13** – Principais características da malha da lagoa 1 – lodo batimétrico - no modelo em CFD.

<b>Estatística</b>	
Número de nós	148368
Número de elementos	760643
Dimensão mínima	0,005 m
Dimensão máxima	0,10 m

### 5.3.1.2 Lagoa 1 (lodo geométrico)

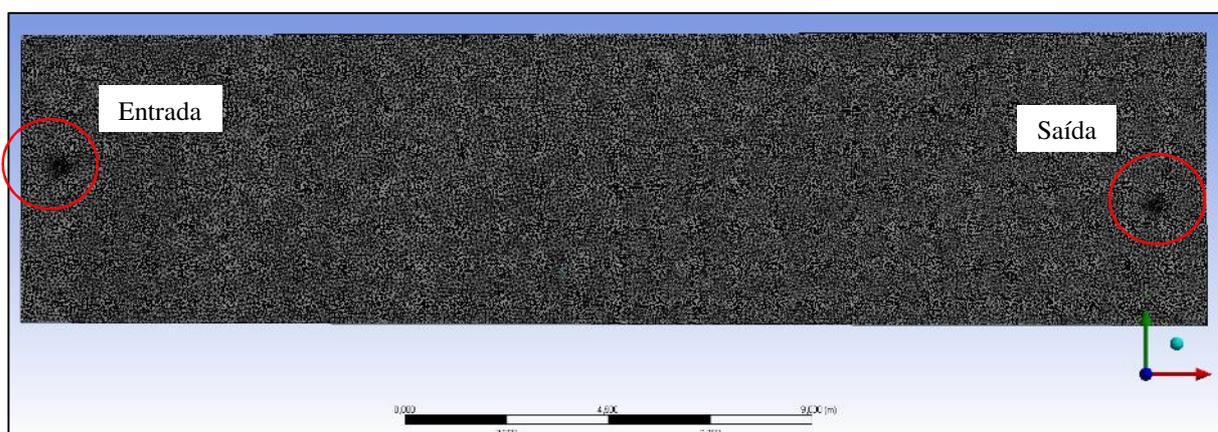
A FIG. 5.54 ilustra em perspectiva a geometria tridimensional da lagoa 1, fase 1, desenvolvida também a partir da exclusão do lodo acumulado do domínio da simulação, mantendo-se apenas o volume ocupado pelo fluido. Neste caso, o lodo foi considerado como de distribuição regular,

a partir de elementos geométricos mais simples que somaram o mesmo volume obtido no levantamento batimétrico e que apresentassem semelhança em relação à sua distribuição. Assim, é também possível notar menor profundidade do fluido (maior quantidade de lodo acumulado) mais próximo aos dispositivos de entrada e saída e maior profundidade do fluido (menor acúmulo de lodo) pouco depois do meio da lagoa.



**FIGURA 5.54:** Vista em perspectiva da geometria da lagoa 1 no modelo em CFD, considerando a geometria do lodo simplificada por formas geométricas.

Seguindo a mesma dimensão mínima do modelo anterior, a malha final deste modelo também ficou suficientemente refinada para distribuir diversos pontos de cálculo ao longo da menor dimensão da lagoa (profundidade). Da mesma forma, maior refinamento foi atribuído às regiões de entrada e saída, destacado na FIG. 5.55. As principais características da malha estão destacadas na TAB. 5.14.



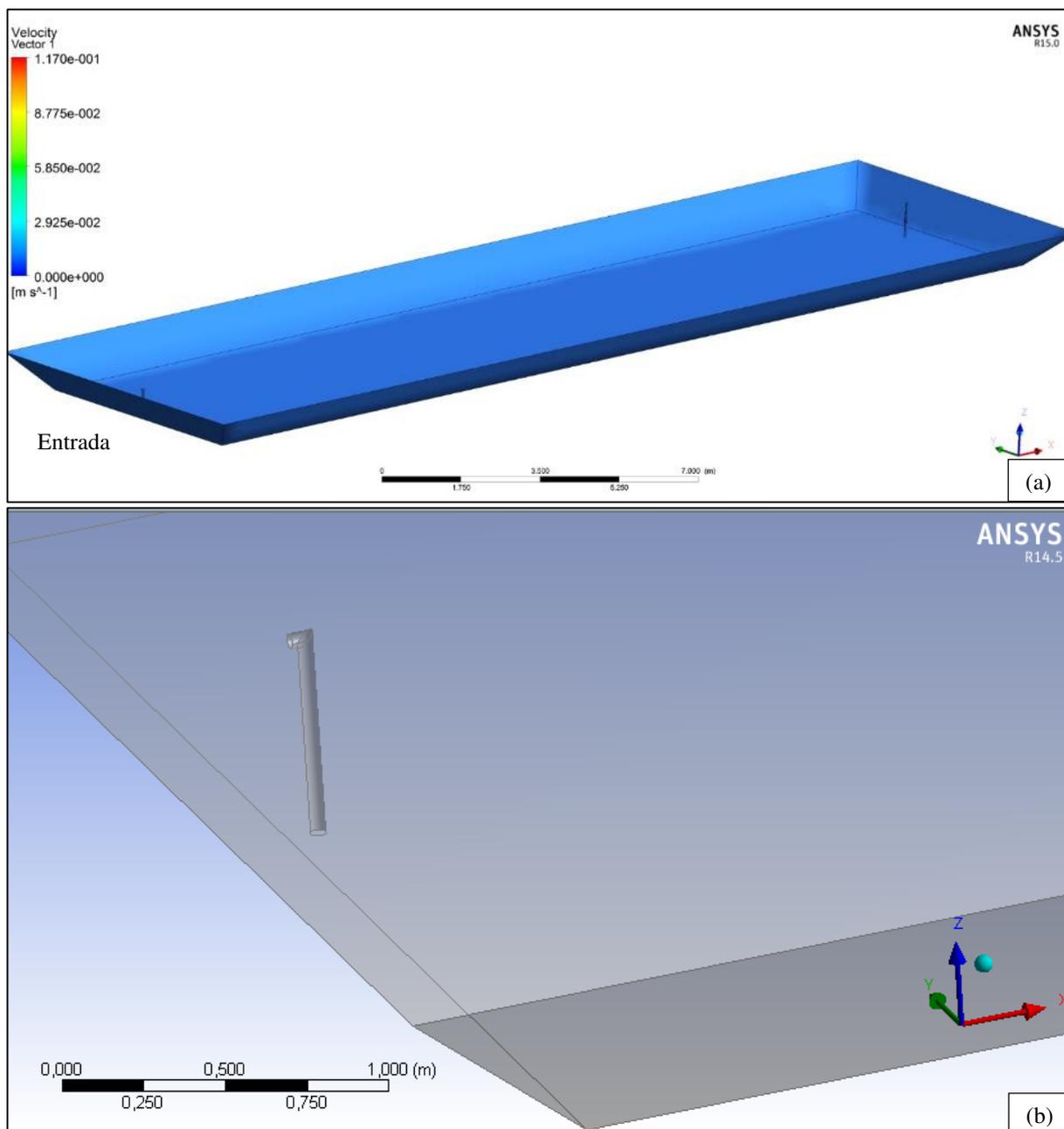
**FIGURA 5.55:** Vista superficial da malha da lagoa 1 – lodo geométrico - no plano XY, com destaque para refinamento nas regiões de entrada e saída (indicadas em vermelho).

**TABELA 5.14** – Principais características da malha da lagoa 1 – lodo geométrico - no modelo em CFD.

<b>Estatística</b>	
Número de nós	124775
Número de elementos	630634
Dimensão mínima	0,05 m
Dimensão máxima	0,10 m

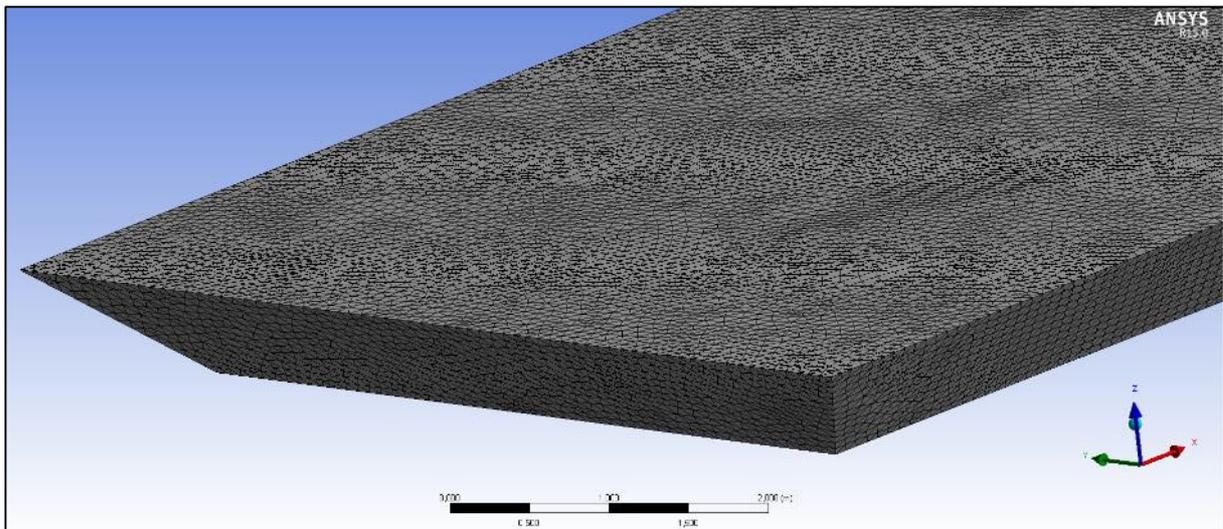
#### 5.3.1.3 Lagoa 2 – Fase 1 (sem chicanas)

A FIG. 5.56a apresenta a geometria tridimensional da lagoa 2 durante a fase 1 (sem chicanas, mais profunda) em perspectiva. A FIG. 5.56b apresenta detalhe do dispositivo de entrada, com configuração idêntica à observada nos projetos e em campo.



**FIGURA 5.56:** (a) Vista em perspectiva da geometria da lagoa 2 – fase 1 - no modelo em CFD (b) detalhe da geometria do dispositivo de entrada.

As mesmas características requeridas de refinamento para as demais malhas foram obtidas também na malha final deste modelo, apresentada parcialmente em perspectiva na FIG. 5.57. As principais características da malha estão destacadas na TAB. 5.15.



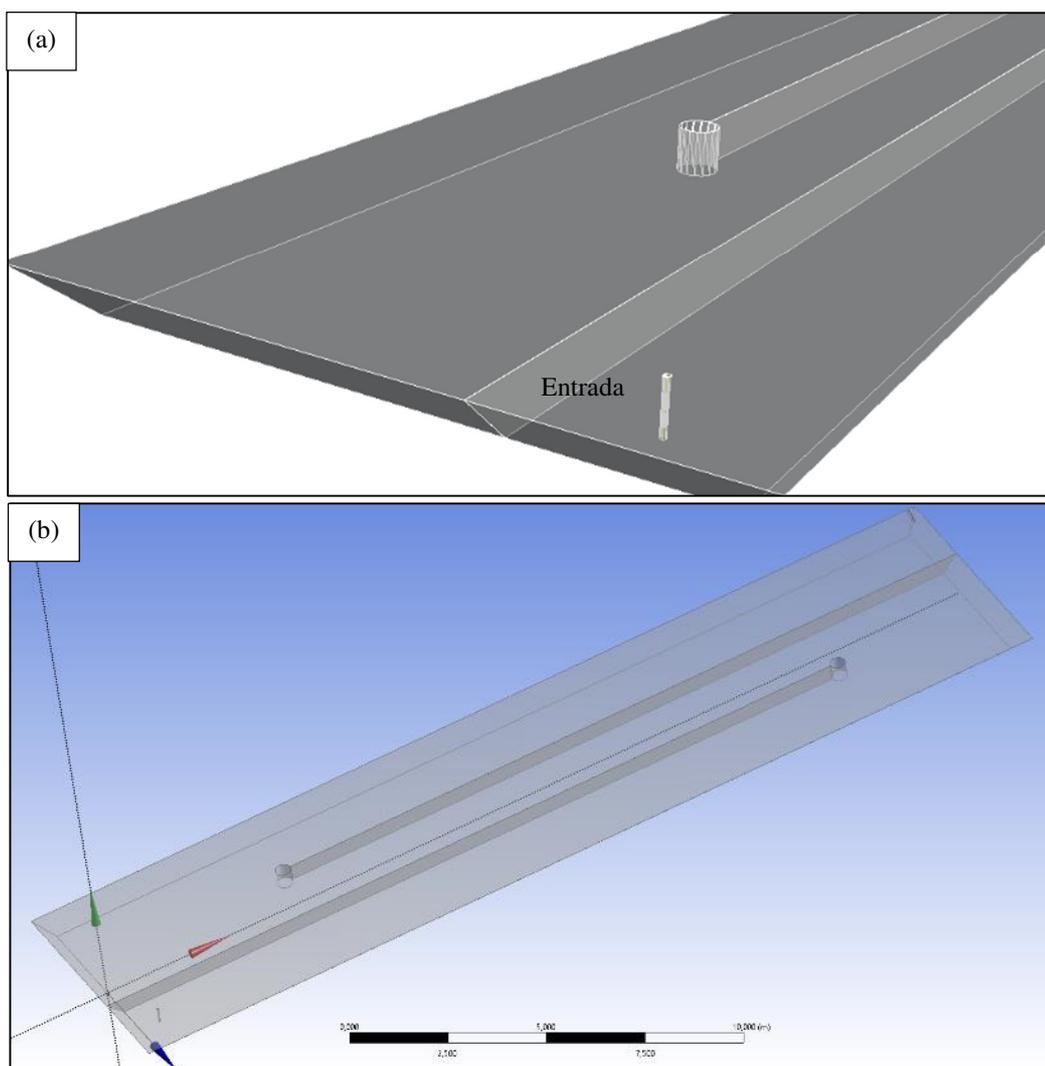
**FIGURA 5.57:** Vista em perspectiva de parte da malha da lagoa 2 – fase 1 - no modelo em CFD.

**TABELA 5.15** – Principais características da malha da lagoa 2 – fase 1 - no modelo em CFD.

<b>Estatística</b>	
Número de nós	214637
Número de elementos	1161305
Dimensão mínima	0,05 m
Dimensão máxima	0,10 m

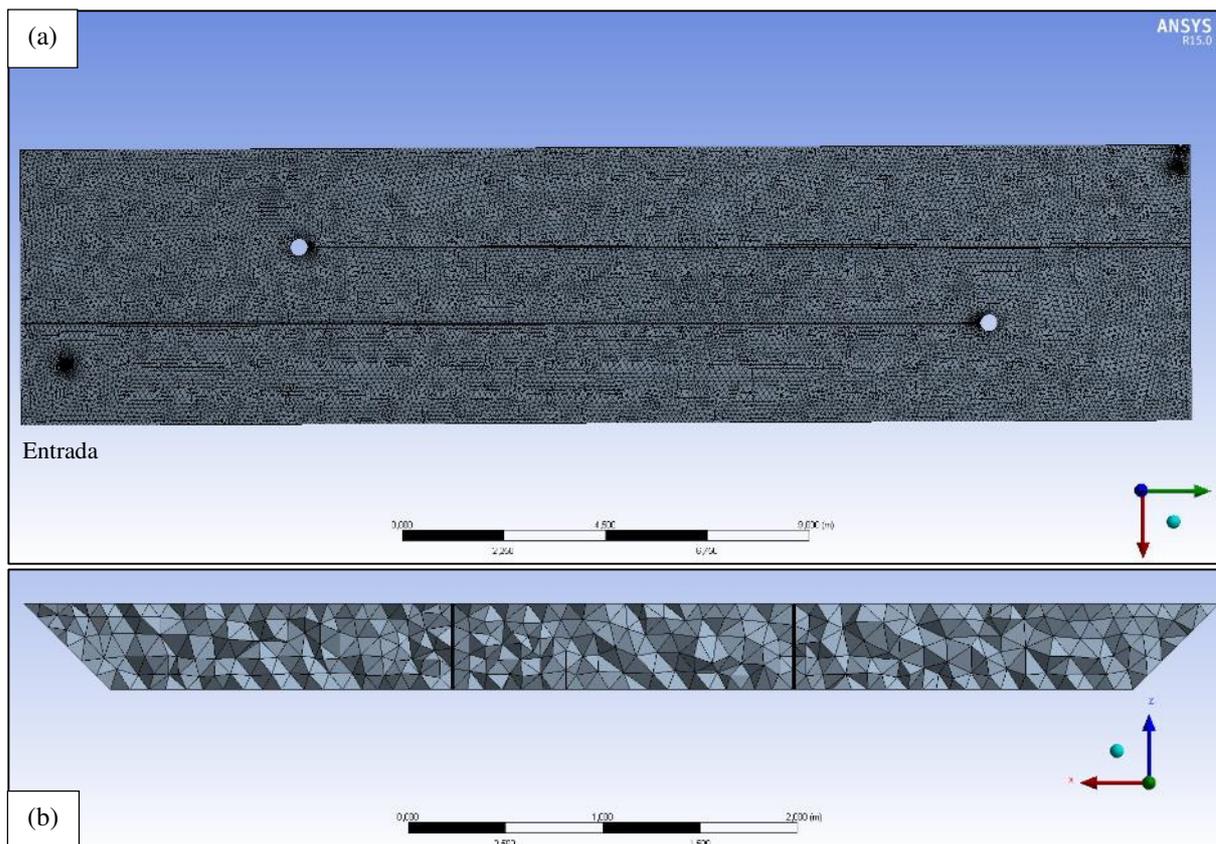
#### 5.3.1.4 Lagoa 2 – Fase 2 (com chicanas longitudinais)

A Figura 5.58 ilustra em perspectiva a geometria tridimensional da lagoa 2 durante a fase 2, desenvolvida a partir da exclusão, no domínio da simulação, do volume ocupado pelas chicanas e pelos baldes no final de cada canal, bem como dos dispositivos de entrada e saída (da mesma forma que nas demais geometrias).



**FIGURA 5.58:** (a) Vista em perspectiva da geometria da lagoa 2 - fase 2 - no modelo em CFD e (b) vista com relação aos eixos de referência na origem do sistema cartesiano.

A malha final obtida para este modelo está apresentada em vista superficial (plano XY) na FIG. 5.59a e em corte transversal, em um plano XZ que passa pelo meio da lagoa, na FIG. 5.59b. Nota-se na FIG. 5.59a maior refinamento nas regiões de entrada e saída, bem como nas curvas da chicana. Nota-se na FIG. 5.59b que o grau de refinamento da malha foi suficientemente preciso para distribuir diversos pontos de cálculo ao longo da pequena profundidade da lagoa, ainda menor que nos demais modelos. Ressalta-se novamente que este é um critério essencial para captar os fenômenos que afetam o comportamento hidrodinâmico no sentido da profundidade da lagoa, tais como recirculações e estratificação térmica. As principais características da malha estão destacadas na TAB. 5.16.



**FIGURA 5.59:** (a) Vista superficial no plano XY da malha da lagoa 2 - fase 2 - no modelo em CFD e (b) Vista em corte transversal, em um plano XZ que passa pelo meio da lagoa.

**TABELA 5.16** – Principais características da malha da lagoa 2 - fase 2 - no modelo em CFD.

<b>Estatística</b>	
Número de nós	107096
Número de elementos	513674
Dimensão mínima	0,00663 m
Dimensão máxima	0,10 m

### 5.3.2 Simulações

#### 5.3.2.1 Lagoa 1 (lodo batimétrico)

##### a) Cenário 1 (cenário base)

Principais características:

- Regime permanente
- Isotérmico ( $T = 25^{\circ}\text{C}$ )

- Sem vento
- Sem forças de empuxo
- Fluido considerado como tendo as mesmas características físicas da água
- Modelo de turbulência  $k-\varepsilon$

Condições iniciais e de contorno:

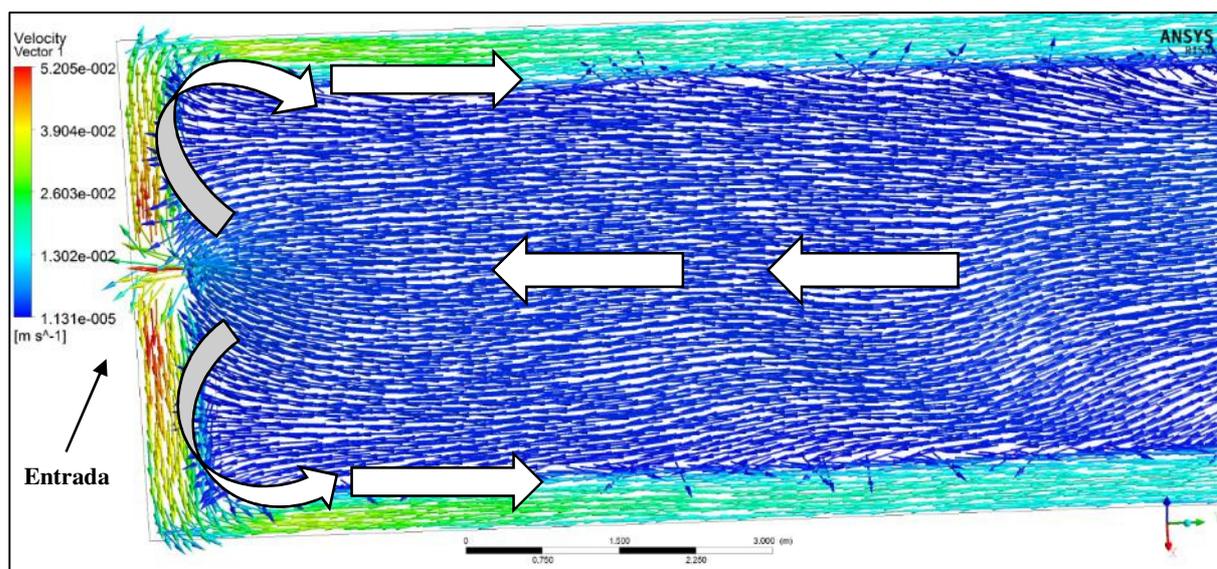
- Entrada → fluxo mássico correspondente à uma vazão teórica de 40 m<sup>3</sup>/d
- Taludes → parede sem deslizamento (rugosidade suave)
- Superfície → parede com deslizamento
- Fundo → parede sem deslizamento (rugosidade suave)
- Saída → fluxo mássico
- Condições iniciais → velocidade de 0,03 m/s na direção principal do fluxo e baixa intensidade de turbulência (1%) (estimativas, apenas para melhoria de convergência)

O número de Reynolds médio obtido para este cenário foi de  $5,87 \times 10^4$ , o que indica grande turbulência na lagoa, principalmente devido às suas grandes dimensões. Durante a etapa de processamento, observou-se grande oscilação nos erros residuais, bem como na velocidade em um ponto de monitoramento definido no meio da lagoa. De acordo com Wicklein *et al.*, (2016), esta oscilação persistente na convergência pode indicar a natureza dinâmica do escoamento, demandando execução de simulações transientes, o que já era esperado. De forma global, a velocidade em toda a lagoa variou de 0 a 0,62 m/s, sendo esta última do jato de entrada, e com a maioria se situando na faixa dos  $10^{-3} - 10^{-4}$  m/s, tal como relatado em literatura e obtido nos ensaios de campo com *drogues* e com o ADV.

O molinete *Flow Probe 3.7'-6' Swivel Head*® registrou a velocidade de 0,1 m/s a 0,05m do ponto de entrada do fluxo na lagoa 1, na sua direção principal. O valor da velocidade obtido via CFD para o mesmo ponto não apresentou variações perceptíveis ao longo do tempo e foi de 0,12 m/s. O molinete *Flow Rate Sensor Go!*®*Link* foi capaz de registrar a velocidade média de 0,035 m/s em um ponto a 0,1m da entrada na lagoa 1, exatamente o mesmo valor médio obtido com os ensaios pontuais com o drogue vertical e próximo à velocidade média obtida com os registros do ADV, de 0,038 m/s, conforme valores já apresentados. O valor da velocidade obtido via CFD para o mesmo ponto não apresentou variações perceptíveis ao longo do tempo

e foi de 0,036 m/s. Apesar das limitações dos equipamentos, nota-se boa concordância entre os resultados das medições de velocidade em campo e o modelo CFD.

A FIG. 5.60 apresenta os vetores de velocidade na superfície da lagoa (plano XY,  $z = 0,75\text{m}$ ), na sua primeira metade, na região de entrada. A cor varia de acordo com a magnitude da velocidade no plano, do azul (menor velocidade) ao vermelho (maior velocidade). Nota-se um padrão de fluxo ditado pelo dispositivo de entrada que, por lançar o fluido em sentido contrário ao da saída (sentido do talude), provoca a divisão do fluxo em duas correntes que avançam pelas laterais da lagoa em direção à saída (vetores de maior velocidade e cor azul/verde claro). O restante do fluxo passa a seguir em direção contrária, no sentido da entrada, em contrafluxo (vetores de menor velocidade e cor azul escuro). Tal comportamento, grosseiramente representado por setas brancas maiores na figura, provoca uma grande recirculação na lagoa no plano horizontal.

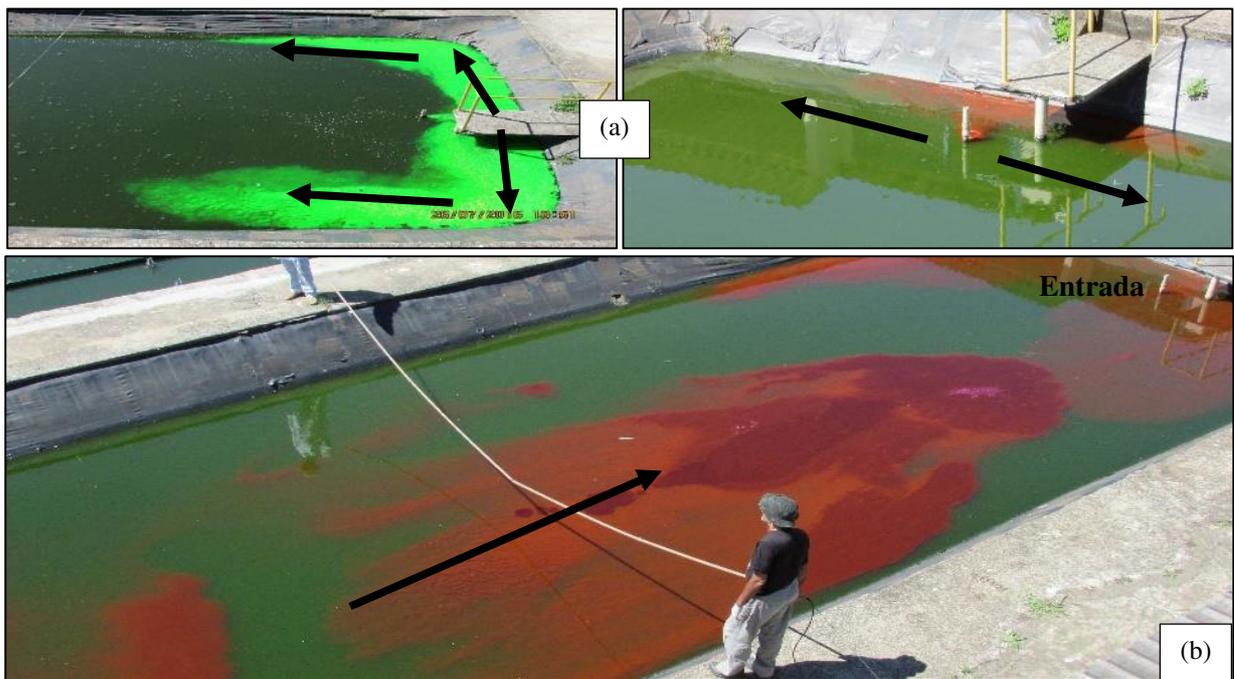


**FIGURA 5.60:** Vista superficial dos vetores de velocidade na lagoa 1 no plano XY ( $Z = 0,75\text{m}$ ), considerando regime permanente, cenário base. Setas brancas maiores representam o comportamento médio do fluxo

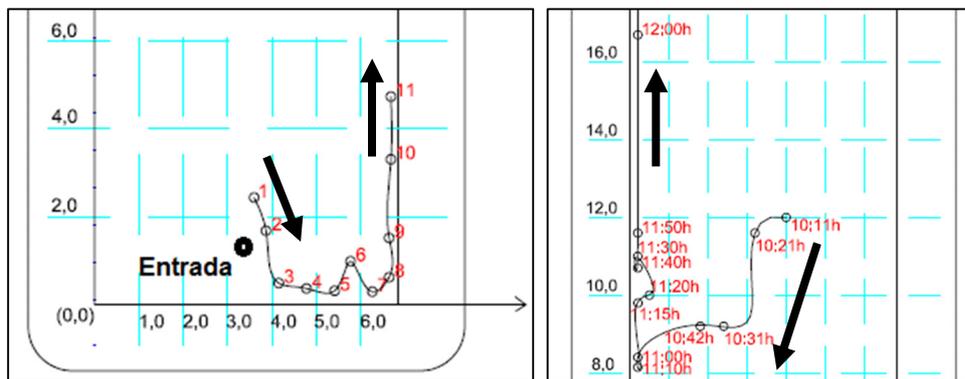
Shilton e Harisson (2003b) avaliaram dispositivos de entrada em lagoas com descarga de efluente na direção vertical, relatando casos em que o fluxo passava a se mover ao longo de duas plumas de fluxo adjacentes às paredes, tal como o padrão aqui obtido. A partir desses estudos, os autores sugeriram a provisão de pequenos defletores locados nas paredes, de forma a bloquear esse fluxo e promover um espalhamento já na entrada. Tal abordagem foi testada tanto em laboratório quanto via modelagem computacional, com obtenção de excelentes

resultados em ambos os casos. Esta ação poderia constituir estratégia operacional para redução de curto-circuitos e otimização hidráulica em lagoas com configurações semelhantes.

Este padrão de fluxo foi visualizado em campo durante os ensaios com corantes, com os *drogues* e até mesmo com as medições de velocidade com uso do ADV. Nos testes com corantes observou-se claramente na superfície da lagoa a divisão do jato de entrada após o talude sul (apresentado novamente na FIG. 5.61a) e também regiões no meio da lagoa em que o fluxo tendia a tomar o rumo da entrada, e não da saída (FIG. 5.61b). Nos ensaios com *drogues*, ficaram evidentes as mesmas tendências de o fluxo seguir em direção à entrada (sentido contrário do teórico) quanto mais afastado dos taludes laterais (meio) e uma tendência de fluxo em direção à saída quanto mais próximo aos taludes laterais (exemplos na FIG. 5.62). Em alguns dos testes com o ADV, percebeu-se que vários dos vetores de velocidade no meio da lagoa apontavam no sentido da entrada, enquanto os vetores mais próximos aos taludes apontavam para a saída.



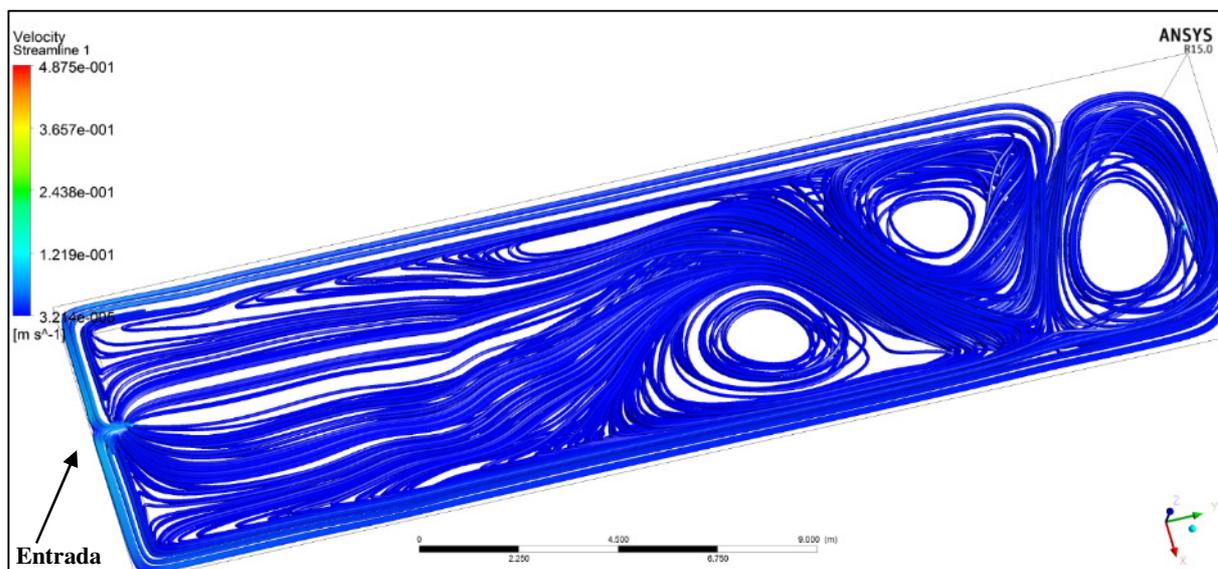
**FIGURA 5.61:** Registro fotográfico da aplicação de corante **(a)** na entrada e **(b)** em ponto central da lagoa 1 - CePTS UFMG/COPASA



**FIGURA 5.62:** Exemplo de trajetórias executadas por *drogue* vertical na lagoa 1 (representação gráfica em sequência numérica e temporal) - CePTS UFMG/COPASA.

Nota-se também regiões de maior mistura e recirculação próximo à saída e na região de maior profundidade da massa fluida (região de menor lodo acumulado). A FIG. 5.63 ilustra esta característica por meio da apresentação das linhas de fluxo tridimensionais com origem na entrada da lagoa. É possível notar na figura a presença de três predominantes vórtices de recirculação com diâmetro aproximado à largura da lagoa, sendo um deles bem próximo ao dispositivo de saída da lagoa. Recirculações foram evidentes também em campo com os corantes, *drogues* e ADV, sendo um exemplo de recirculação junto a saída apresentado novamente na FIG. 5.64 (teste com a rodamina lançada próximo à saída da lagoa). A FIG 5.65. apresenta os vetores de velocidade no plano XY que passa no meio da lagoa ( $Z = 0,40\text{m}$ ) para

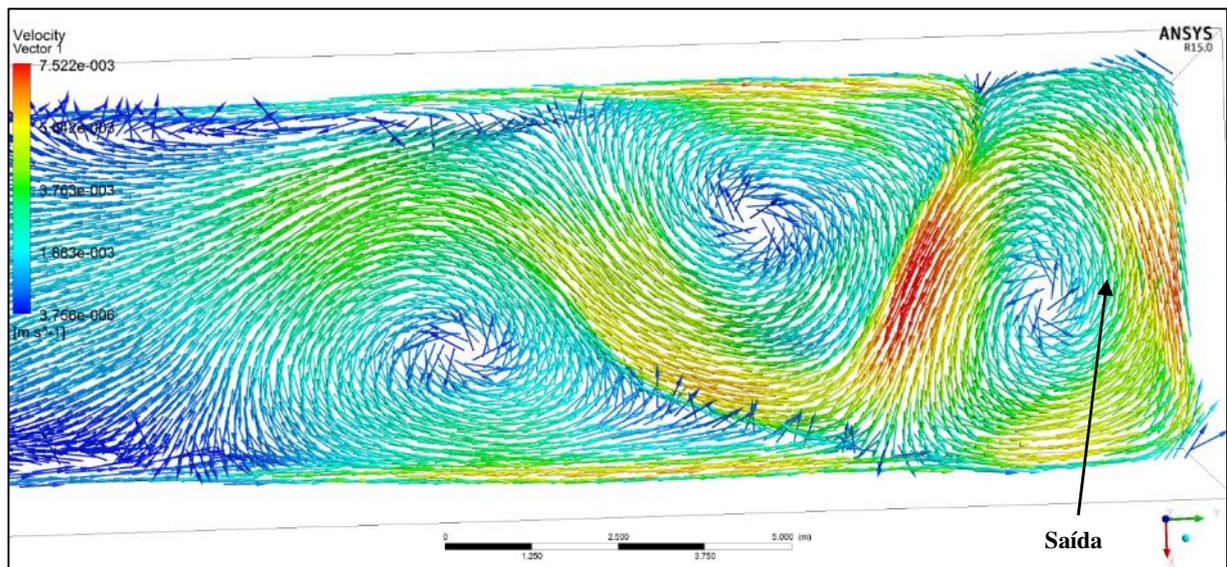
essa região de maior recirculação (segunda metade da lagoa). A maior velocidade obtida neste plano foi de 0,0075 m/s, representada pelos vetores de velocidade em vermelho na figura.



**FIGURA 5.63:** Vista superficial das linhas de fluxo com origem na entrada da lagoa 1, considerando regime permanente, cenário base.



**FIGURA 5.64:** Registro fotográfico da aplicação de corante em pontos próximos à saída da lagoa 1 - CePTS UFMG/COPASA



**FIGURA 5.65:** Vista superficial dos vetores de velocidade na lagoa 1 no plano XY ( $Z = 0,40\text{m}$ ) com destaque das zonas de recirculação. Regime permanente, cenário base.

### b) Cenário 2 (cenário base - transiente)

Principais características:

- Regime transiente
- Condições iniciais obtidas a partir do modelo estacionário (melhoria da convergência)
- Duração total (tempo físico) = 48h
- Passo de tempo = 10s
- Isotérmico ( $T = 25^\circ\text{C}$ )
- Sem vento
- Sem forças de empuxo
- Fluido considerado como tendo as mesmas características físicas da água
- Modelo de turbulência  $k-\varepsilon$

Condições de contorno:

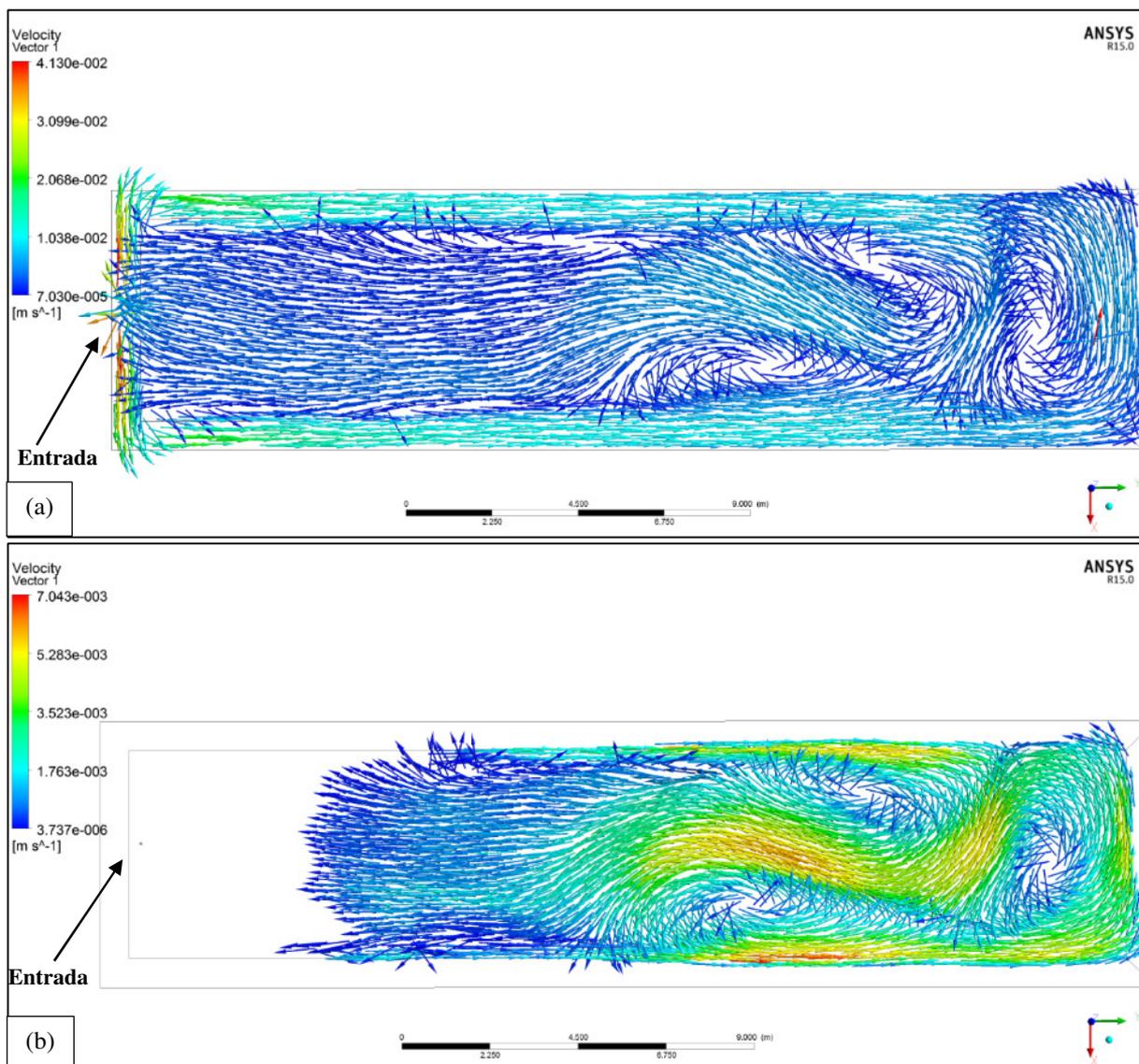
- Entrada  $\rightarrow$  fluxo mássico correspondente à uma vazão teórica de  $40 \text{ m}^3/\text{d}$
- Taludes  $\rightarrow$  parede sem deslizamento (rugosidade suave)
- Superfície  $\rightarrow$  parede com deslizamento
- Fundo  $\rightarrow$  parede sem deslizamento (rugosidade suave)

- Saída → fluxo mássico

Resumo (valores médios) dos resultados da simulação:

- Número de Courant = 11
- Número de Reynolds =  $5,13 \times 10^4$

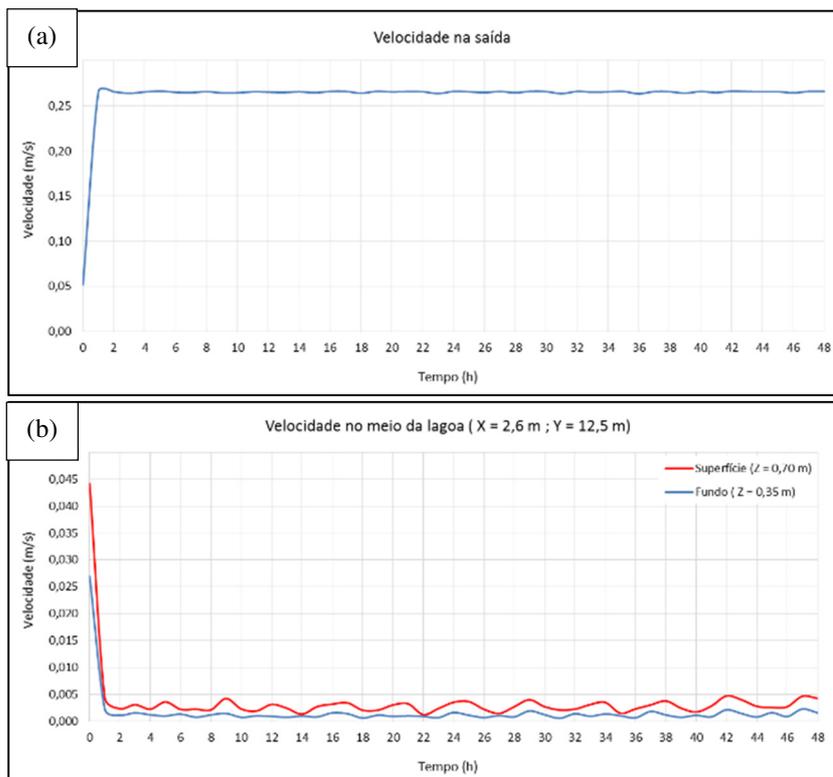
O número de Reynolds médio obtido para este cenário foi de  $5,13 \times 10^4$ , o que confirma a natureza turbulenta do regime de fluxo na lagoa. De modo geral, as simulações em regime transiente confirmaram as tendências observadas na simulação em regime estacionário. A FIG. 5.66a apresenta os vetores de velocidade na superfície da lagoa (plano XY;  $Z = 0,75\text{m}$ ) e a FIG. 5.66b no plano XY que passa aproximadamente no meio da lagoa ( $Z = 0,4\text{m}$ ) no final da simulação, demonstrando, independentemente da profundidade, a mesma tendência de divisão do fluxo de entrada em duas correntes que avançam pelas laterais da lagoa em direção à saída e tendência do restante dos vetores permanecer em sentido contrário e provocar recirculações próximo à saída e na região de menor acúmulo de lodo. Na FIG. 5.66b, os vetores de velocidade não aparecem nas regiões da lagoa ocupadas pelo lodo em que o plano visualizado está cortando.



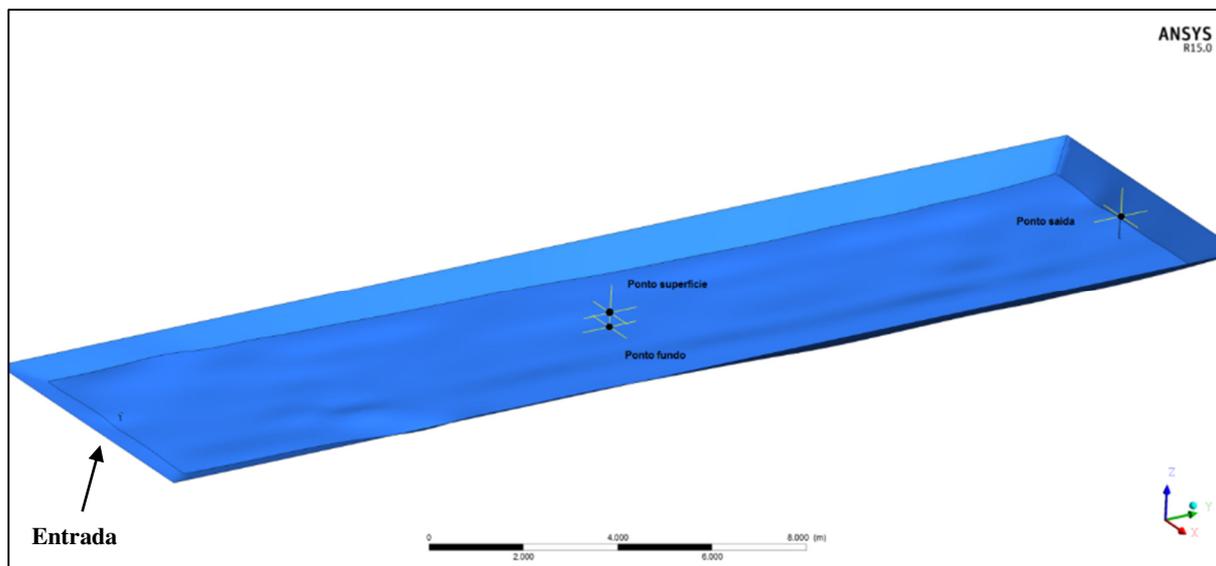
**FIGURA 5.66:** Vista superficial dos vetores de velocidade na lagoa 1 **(a)** na superfície - plano XY ( $Z = 0,75\text{m}$ ) e **(b)** no meio - plano XY ( $Z = 0,40\text{m}$ ). Regime transiente, após 48h, cenário base.

Os resultados da simulação em regime transiente sugerem que após aproximadamente 2h de simulação o fluxo na lagoa já se torna completamente desenvolvido, com balanço de massa fechado e passando a apresentar variações nos vetores de velocidade em menor escala ao longo do tempo. Portanto, apesar da natureza essencialmente transiente, pode-se notar um comportamento médio do fluxo já antes apontado nas simulações em regime estacionário no cenário base. A FIG. 5.67 ilustra este aspecto, apresentando a variação do módulo da velocidade ao longo do tempo em três pontos da lagoa: na saída (FIG. 5.67a) e no meio da lagoa, sendo um deles na superfície e outro no fundo (respectivamente, as linhas vermelha e azul na FIG. 5.67b). Nota-se que após cerca de 2h a velocidade nos três pontos tende a apresentar um comportamento típico, a despeito das pequenas variações temporais típicas da

natureza transiente do fluxo, com velocidades na superfície ligeiramente maiores que no fundo. A FIG. 5.68 mostra em perspectiva a lagoa com indicação desses pontos.



**FIGURA 5.67:** Módulo da velocidade (a) em um ponto na saída da lagoa 1 e (b) no meio da lagoa 1, em um ponto na superfície (Z = 0,70m; linha vermelha) e no fundo (Z = 0,35m; linha azul). Regime transiente, cenário base.



**FIGURA 5.68:** Vista em perspectiva da lagoa 1 com indicação dos pontos de monitoramento de velocidade da FIG. X. Regime transiente, cenário base.

Este modelo em regime transiente serviu de base para os demais cenários, a partir do qual novas equações e condições de contorno são adicionadas na análise e o modelo vai se tornando mais completo no que diz respeito às variáveis que podem interferir no escoamento das lagoas.

### c) Cenário 3 (rugosidade definida para o lodo)

Principais características:

- Regime transiente
- Condições iniciais obtidas a partir do modelo estacionário (melhoria da convergência)
- Duração total (tempo físico) = 48h
- Passo de tempo = 10s
- Isotérmico ( $T = 25^{\circ}\text{C}$ )
- Sem vento
- Sem forças de empuxo
- Fluido considerado como tendo as mesmas características físicas da água
- Modelo de turbulência  $k-\varepsilon$

Condições de contorno:

- Entrada  $\rightarrow$  fluxo mássico correspondente à uma vazão teórica de  $40 \text{ m}^3/\text{d}$
- Taludes  $\rightarrow$  parede sem deslizamento (rugosidade suave)
- Superfície  $\rightarrow$  parede com deslizamento
- Fundo  $\rightarrow$  parede sem deslizamento, com rugosidade definida para o lodo.
- Saída  $\rightarrow$  fluxo mássico

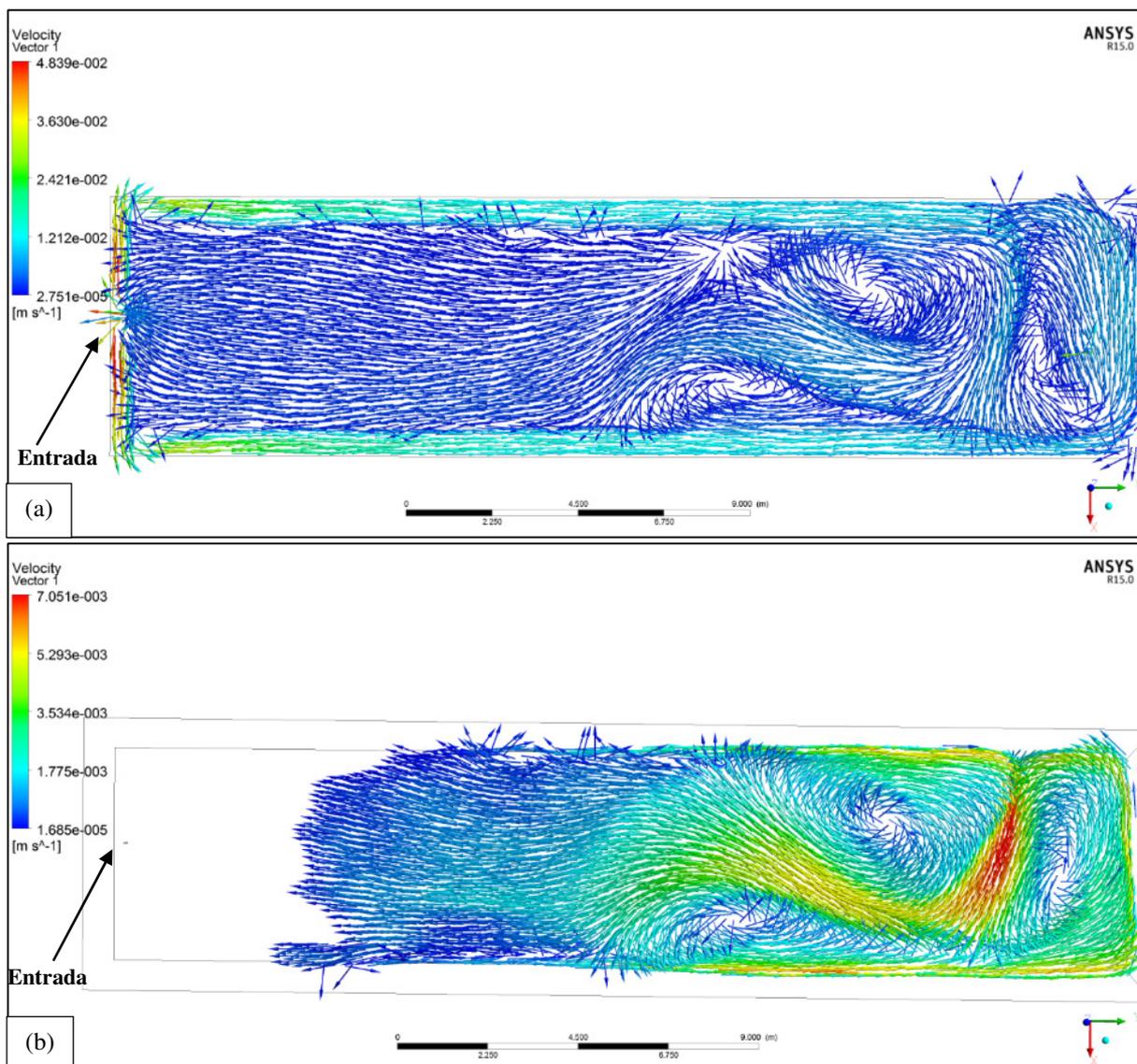
Resumo (valores médios) dos resultados da simulação:

- Número de Courant = 17
- Número de Reynolds =  $5,02 \times 10^4$

Após simulações com diferentes valores de rugosidade, bem como uma análise de sensibilidade do modelo quanto a essa variável, o valor de  $k_{ms}$  de  $50 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  (aproximadamente 20 mm de

rugosidade nos parâmetros do modelo) foi obtido como representativo da rugosidade de fundo das lagoas, estando este valor também situado dentro da faixa de variação observada na literatura (Vega *et al.*, 2003; Coggins *et al.*, 2017).

O número de Reynolds médio obtido para este cenário foi de  $5,02 \times 10^4$ , praticamente idêntico ao do cenário transiente base (sem rugosidade definida para o lodo). De modo geral, as simulações neste cenário apresentaram as mesmas tendências observadas no cenário anterior. Para fins de comparação qualitativa, a FIG. 5.69a também apresenta os vetores de velocidade na superfície da lagoa (plano XY;  $Z = 0,75\text{m}$ ) e a FIG. 5.69b no plano XY que passa aproximadamente no meio da lagoa ( $Z = 0,4\text{m}$ ) no final da simulação, demonstrando, independentemente da profundidade, as mesmas tendências de comportamento do fluxo já apresentada na FIG 5.66 e comentada no referido tópico.



**FIGURA 5.69:** Vista superficial dos vetores de velocidade na lagoa 1 **(a)** na superfície - plano XY ( $Z = 0,75\text{m}$ ) e **(b)** No meio - plano XY ( $Z = 0,40\text{m}$ ). Regime transiente, após 48h, cenário com rugosidade de 20 mm atribuída ao lodo.

**d) Cenário 4 (com vento – condições estacionárias: velocidade média no sentido predominante)**

Principais características:

- Regime transiente
- Duração total (tempo físico) = 48h
- Passo de tempo = 10s
- Isotérmico

- Vento com valor médio de 5 m/s na direção predominante WNW (FIG. 5.2)
- Sem forças de empuxo
- Fluido considerado como tendo as mesmas características físicas da água
- Modelo de turbulência  $k-\varepsilon$

Condições de contorno:

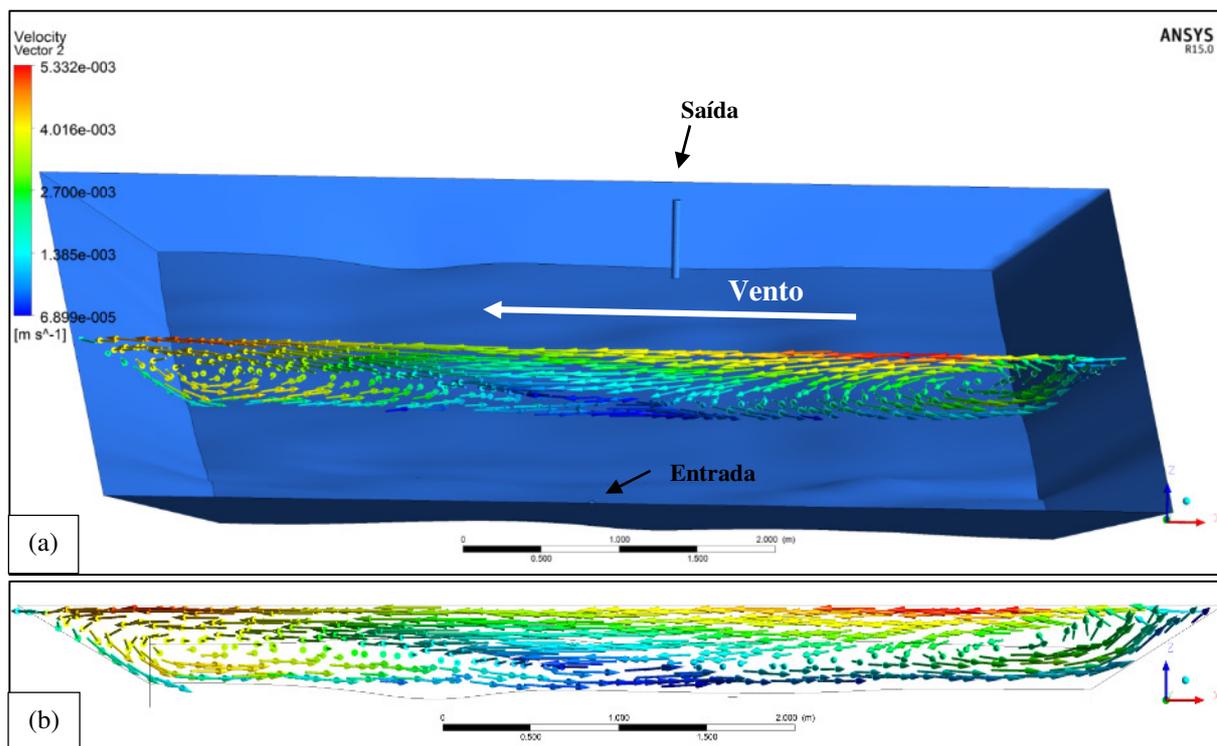
- Entrada → fluxo mássico correspondente à uma vazão teórica de 40 m<sup>3</sup>/d
- Taludes → parede sem deslizamento (rugosidade suave)
- Superfície → vetor médio de tensão de cisalhamento de módulo igual a 0,003 N/m<sup>2</sup>, sentido -X, da lagoa na simulação. Valor da constante empírica  $C_d = 10^{-4}$ ; menor valor da faixa registrada em literatura
- Fundo → parede sem deslizamento (rugosidade suave)
- Saída → fluxo mássico

Resumo (valores médios) dos resultados da simulação:

- Número de Courant = 17
- Número de Reynolds =  $4,92 \times 10^4$

O número de Reynolds médio obtido para este cenário foi da mesma ordem de grandeza do obtido no Cenário 2. De modo geral, a simulação em regime transiente com vento em condições de velocidade média e direção predominante demonstrou grande influência do mesmo na superfície da lagoa, ditando a direção dos vetores de velocidade em até aproximadamente 20% da profundidade do fluido. Abaixo do plano de influência direta do vento observou-se linhas de contrafluxo, causando retromistura. Linhas de contrafluxo de fundo em lagoas provocadas pelo vento também foram apontadas por Fares (1998). Portanto, além de influenciar diretamente os vetores de velocidade na superfície da lagoa, o vento, atuando de modo contante, acaba por provocar linhas de fluxo em sentido contrário nas camadas mais profundas do fluxo. Este efeito é mais sentido na região central da lagoa, onde é menor a influência dos jatos de entrada e das recirculações próximas à saída. A FIG. 5.70a apresenta os vetores de velocidade no plano transversal que corta o meio da lagoa (plano XZ; Y = 12,5m), ilustrando a influência direta do vento nas camadas mais superficiais do fluido (até

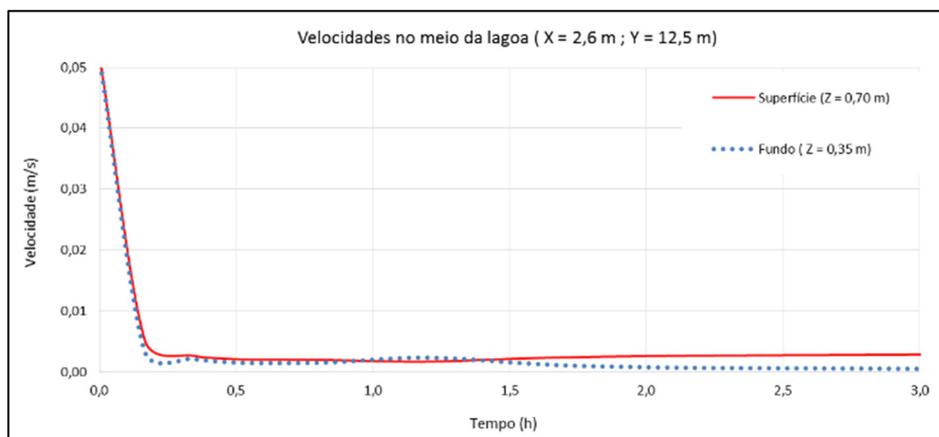
0,15m neste plano) e os vetores de contrafluxo provocados, gerando zonas de retromistura próximas aos taludes.



**FIGURA 5.70:** (a) Vista dos vetores de velocidade em plano transversal na lagoa 1 (plano XZ; Y = 12,5m). Regime transiente, após 48h, vento constante – direção predominante e velocidade média. (b) Vista em corte.

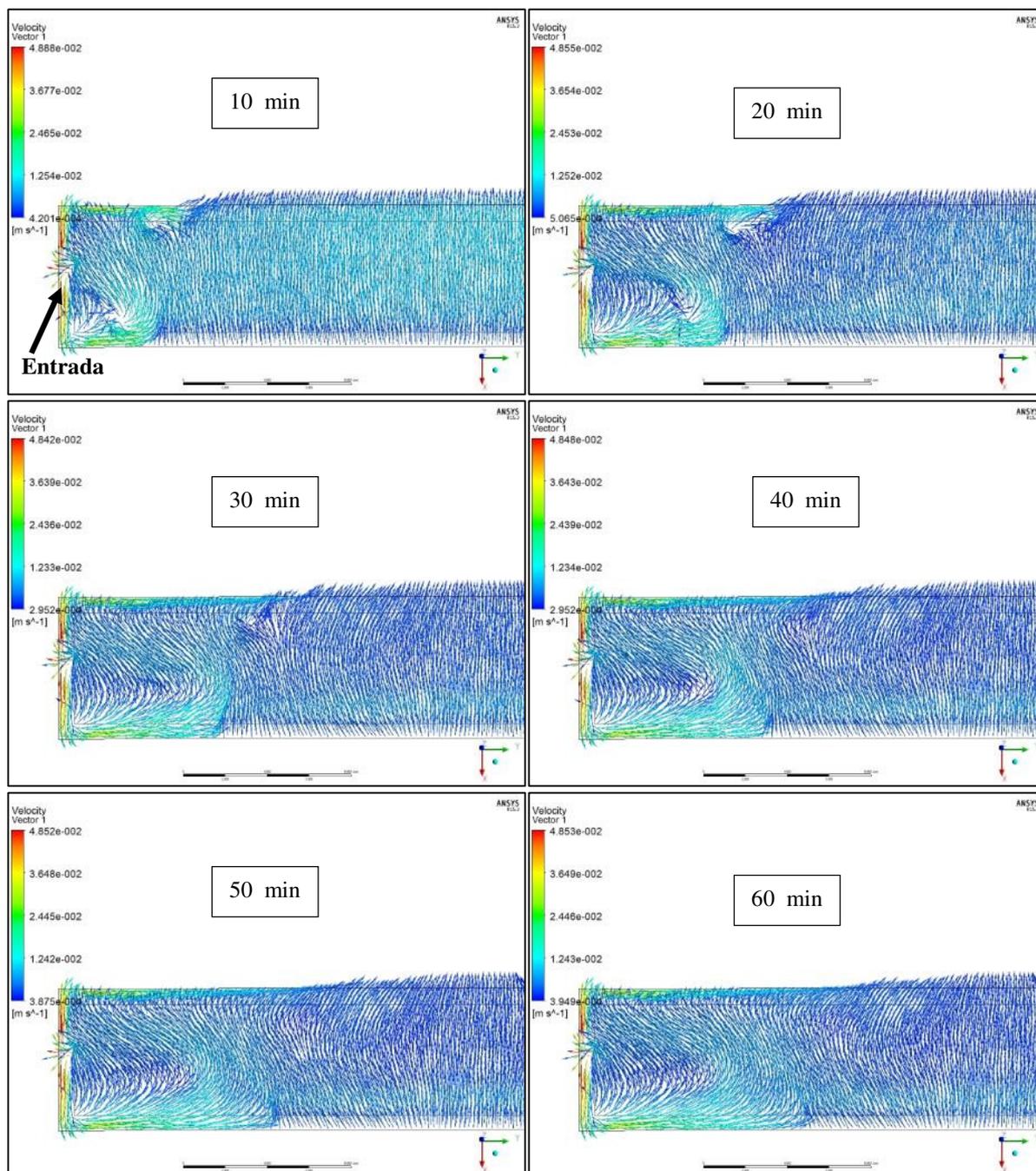
Os resultados da simulação neste cenário sugerem que após aproximadamente 2h do início do escoamento, o fluxo na lagoa já se torna completamente desenvolvido, com balanço de massa fechado e passando a apresentar apenas pequenas variações nos vetores de velocidade em menor escala ao longo do tempo. Este seria o tempo necessário para que um equilíbrio dinâmico entre as forças inerciais do jato de entrada e as forças de cisalhamento do vento seja atingido, principalmente na superfície da lagoa. A partir deste momento, passam a coexistir na lagoa fenômenos de recirculação nas três dimensões, linhas de fluxo ditadas predominantemente pelo vento e linhas de fluxo ditadas predominantemente pelo dispositivo de entrada. A FIG. 5.71 ilustra este aspecto, apresentando a variação do módulo da velocidade ao longo do tempo nos dois pontos centrais já apresentados na FIG. 5.68 (superfície e fundo). Nota-se que após cerca de 2h a velocidade nos dois pontos tende a apresentar um comportamento constante, que se estende até o final da simulação (48h). Este comportamento não foi observado no cenário sem atuação do vento, quando as velocidades nos dois pontos

sofreram pequenas variações ao longo do tempo. As velocidades de equilíbrio para estes dois pontos foram de  $4 \times 10^{-4}$  m/s no fundo e  $3 \times 10^{-3}$  m/s na superfície.



**FIGURA 5.71:** Módulo da velocidade no meio da lagoa 1, em um ponto na superfície (Z = 0,70m; linha vermelha) e no fundo (Z = 0,35m; linha pontilhada em azul). Regime transiente, vento constante – direção predominante e velocidade média.

A FIG. 5.72 apresenta uma evolução dos vetores de velocidade na superfície da lagoa ao longo do tempo (plano XY; Z = 0,75m), a cada 10 minutos a partir do início do escoamento. Nota-se o avanço do jato de entrada pelas duas laterais da lagoa na primeira hora, até aproximadamente 12m da entrada da lagoa. A partir desta hora e distância, os vetores de velocidade passam a ser mais influenciados pela tensão de cisalhamento provocada pela atuação constante do vento no seu sentido predominante.



**FIGURA 5.72:** Evolução dos vetores de velocidade na superfície da lagoa ao longo do tempo (plano XY;  $Z = 0,75\text{m}$ ). Regime transiente, vento constante – direção predominante e velocidade média.

De acordo com a análise teórica para comparação entre a energia fornecida ao fluido pelo jato de entrada e a energia fornecida ao fluido pela tensão de cisalhamento do vento, proposta por Shilton (2001) e Shilton e Harrison (2003b), há uma predominância da influência do vento nas condições simuladas para este cenário, o que condiz com os resultados obtidos. Aplicando-se as Equações 4.47 e 4.50, obtem-se que a potência fornecida pelo vento ( $P_{\text{vento}} = 0,077 \text{ W}$ ) chega a ser cerca de 6 vezes maior que a potência fornecida pelo jato de entrada ( $P_{\text{entrada}} = 0,013 \text{ W}$ ), de

forma que fica evidente a tendência de dominância do vento no comportamento hidrodinâmico da lagoa nestas condições, com grande poder de mistura, ao menos do ponto de vista teórico.

A despeito dos resultados obtidos, é salutar ressaltar que o cenário em análise tem por premissa a atuação constante do vento, com sua velocidade média em uma única direção, o que favorece a sua dominância no escoamento. Em condições reais o vento é naturalmente dinâmico, de forma que esta tensão de cisalhamento, e conseqüentemente seu poder de mistura, é somente aplicada de uma forma esporádica e variável, enquanto que a influência da entrada é praticamente constante. De fato, de acordo com Shilton (2001), as mudanças nas direções do vento podem eventualmente agir cancelando qualquer quantidade de movimento que havia sido recentemente aplicada ao fluido. Já o dispositivo de entrada, de acordo com o mesmo autor, apesar de poder apresentar variações ao longo do dia, age como uma fonte de quantidade de movimento mais permanente e unidirecional. Além disso, tais flutuações são de menor magnitude que as do vento (SHILTON, 2001).

#### e) **Cenário 5 (com vento – condições dinâmicas)**

Principais características:

- Regime transiente
- Duração total (tempo físico) = 48h
- Passo de tempo = 10s
- Isotérmico
- Vento com velocidade variando ciclicamente na sua direção predominante, de acordo com o ajuste estatístico da função seno aos dados registrados na estação meteorológica ( $r = 0,97$ ):

$$U_{vento[W]} = 2,93 + 1,90 \cdot \text{sen}(7,272 \times 10^{-5} \cdot t - 1,571) \quad (5.5)$$

- Sem forças de empuxo
- Fluido considerado como tendo as mesmas características físicas da água
- Modelo de turbulência  $k-\varepsilon$

Condições de contorno:

- Entrada → fluxo mássico correspondente à uma vazão teórica de 40 m<sup>3</sup>/d
- Taludes → parede sem deslizamento (rugosidade suave)
- Superfície → vetor médio de tensão de cisalhamento de módulo variando de acordo com a Equação 5.5 e sentido -X da lagoa na simulação. Valor da constante empírica  $C_d = 10^{-4}$ ; menor valor da faixa registrada em literatura

$$\bar{\tau}_{[W]} = -1,225 \times 10^{-4} U_{vento[W]}^2 \quad (5.6)$$

- Fundo → parede sem deslizamento (rugosidade suave)
- Saída → fluxo mássico

Resumo (valores médios) dos resultados da simulação:

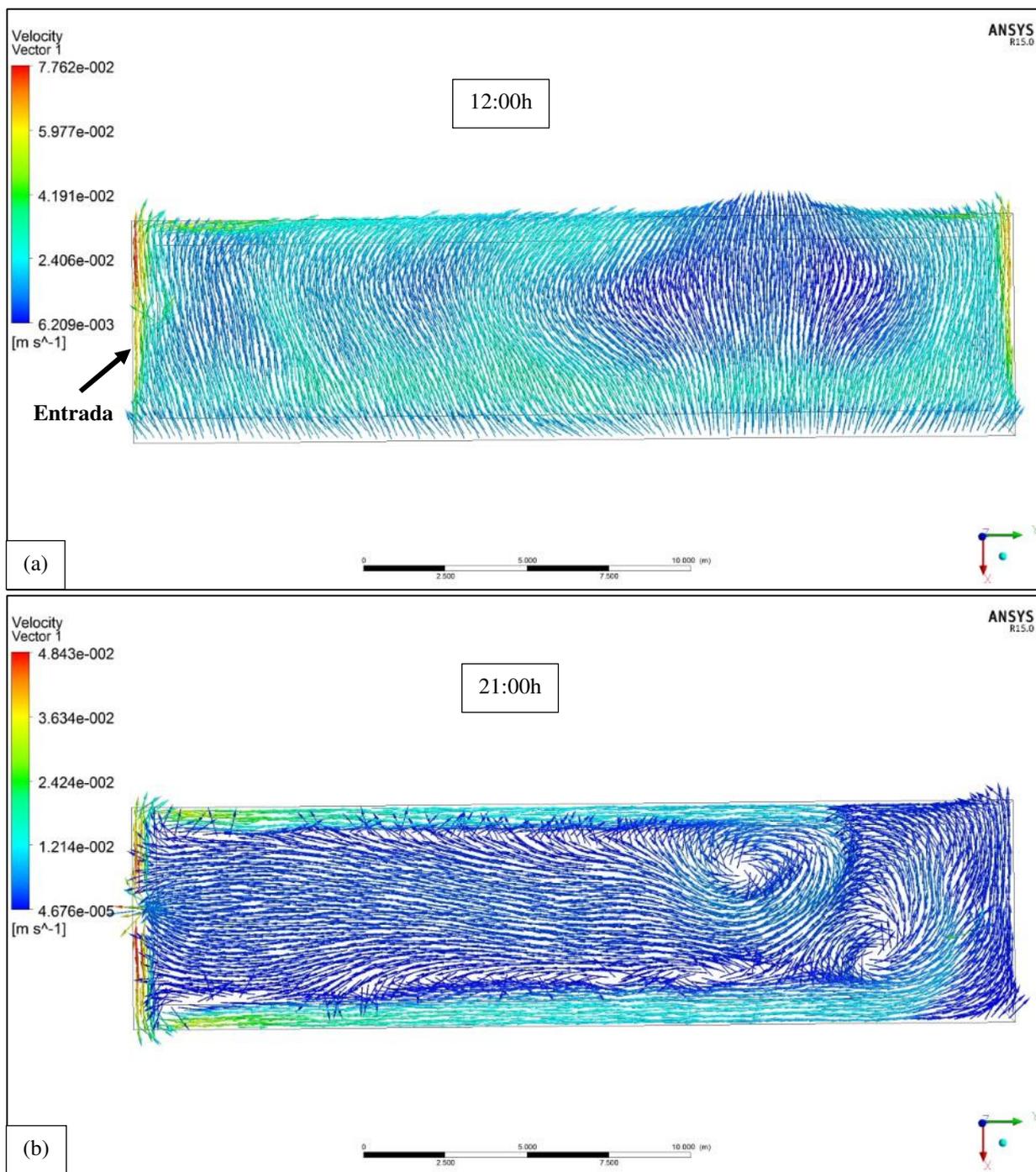
- Número de Courant = 17
- Número de Reynolds =  $7,68 \times 10^4$

O número de Reynolds médio obtido para este cenário foi ligeiramente maior, mas da mesma ordem de grandeza do obtido no cenário de vento estacionário, indicando condições similares de turbulência.

Os resultados neste cenário também corroboram a grande influência do vento na superfície da lagoa, provocando mistura vertical por meio da indução de linhas de contrafluxo. Entretanto, tal influência vai reduzindo à medida que os ventos se tornam menos intensos, quando o jato de entrada passa a determinar predominantemente o comportamento hidrodinâmico da lagoa. Esta transição foi possível ver claramente nas imagens da simulação. A FIG. 5.73 apresenta os vetores de velocidade na superfície da lagoa (plano XY; Z = 0,75m) em dois horários extremos de um dia quanto à atuação do vento, ilustrando a sua influência direta nas camadas mais superficiais do fluido durante os períodos do dia em que sua velocidade é maior (FIG. 5.73a, vetores de velocidade às 12:00h) em alternância com a influência direta do jato de entrada nos períodos do dia em que se observa menores velocidades do vento (FIG. 5.73b, vetores de velocidade às 21:00h). Este último se assemelha bastante ao modelo sem atuação do vento,

exceto que os jatos laterais oriundos do jato de entrada que partem em direção à saída parecem provocar mistura em direção ao meio da lagoa antes mesmo de chegar ao final, de forma que a pluma que segue pela lateral esquerda da lagoa (oeste) apresentou a tendência de se dispersar para o meio da lagoa antes da pluma leste, em região mais próxima à entrada, assim como observado nos testes com corantes.

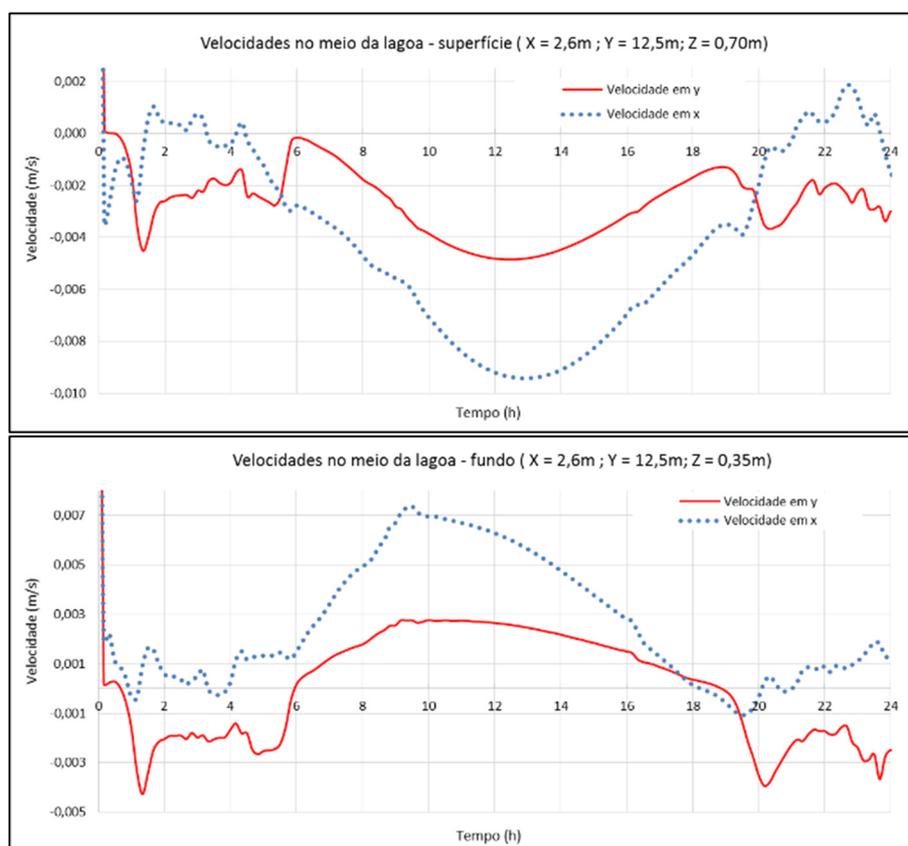
O padrão de alternância (maior influência do vento X maior influência da entrada) se repete em ciclos diários e, portanto, tal efeito não pôde ser observado no modelo em condições constantes de vento, no qual se observou dominância do mesmo no escoamento de modo permanente (o que raramente se encontra na realidade).



**FIGURA 5.73:** Vetores de velocidade na superfície da lagoa 1 ( $Z = 0,75\text{m}$ ) (a) às 12h e (b) às 21h do dia. Regime transiente, vento dinâmico.

A FIG. 5.74 apresenta a variação da velocidade nos eixos x (sentido da largura da lagoa) e y (sentido do comprimento da lagoa) ao longo um dia nos dois pontos centrais já apresentados na FIG. 5.68 (superfície e fundo). O sentido positivo do x é o sentido leste, enquanto o sentido positivo de y é o norte. Observou-se um comportamento típico da velocidade nesses pontos que se repetiu em ciclo diário, com dois momentos claramente distintos, sendo um durante o dia (06:00h – 19:00h), em que há maior influência do vento no comportamento do fluxo, fazendo

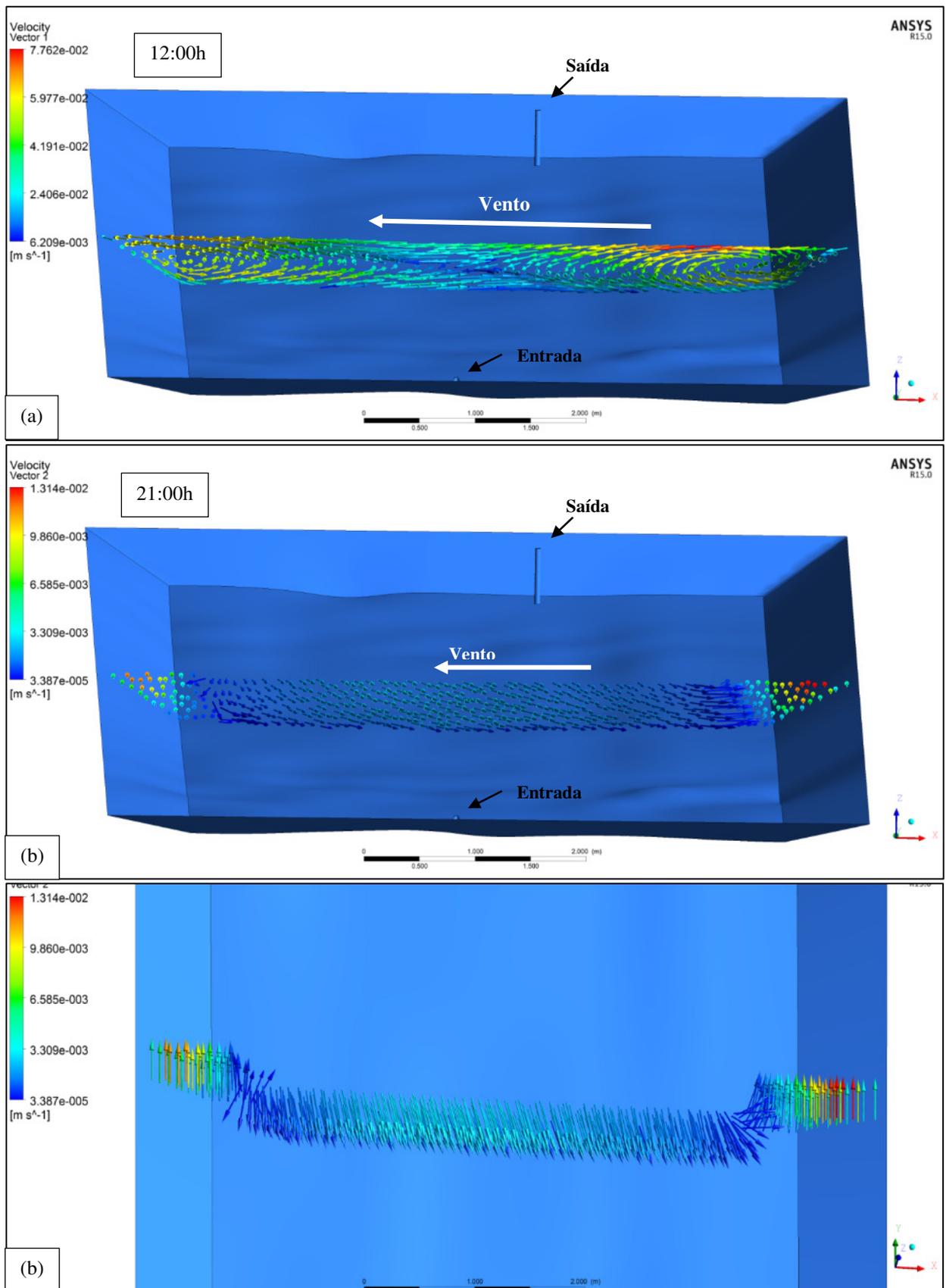
com que a velocidade nos dois pontos tenha a tendência de seguir uma curva aproximadamente parabólica, com um pico nas proximidades das 12h (tal como o próprio vento), e outro momento (00:00h às 06:00h – 19:00h às 00:00) com flutuações de menor magnitude da velocidade nesses dois pontos, tanto no eixo y quanto no eixo x, e com comportamento semelhante tanto na superfície quanto no fundo, sugerindo que um padrão de fluxo ditado pelo dispositivo de entrada se estabelece em equilíbrio com o vento nesses períodos do dia. Nota-se também o comportamento inverso da velocidade nos dois pontos quando do período de atuação mais significativa do vento, com vetores no sentido negativo dos eixos x e y no ponto da superfície e no sentido positivo no ponto do fundo, sugerindo a ocorrência dos fenômenos de retromistura proporcionados pelas linhas de fluxo em um sentido na superfície e linhas de contrafluxo no fundo em sentido inverso, ambas induzidas pelo vento.



**FIGURA 5.74:** Velocidade no meio da lagoa 1, nas direções x (no sentido da largura - linha pontilhada em azul) e y (no sentido do comprimento - linha contínua em vermelho) ao longo de um dia (a) em um ponto na superfície ( $Z = 0,70\text{m}$ ) e (b) em um ponto no fundo ( $Z = 0,35\text{m}$ ). Regime transiente, vento dinâmico.

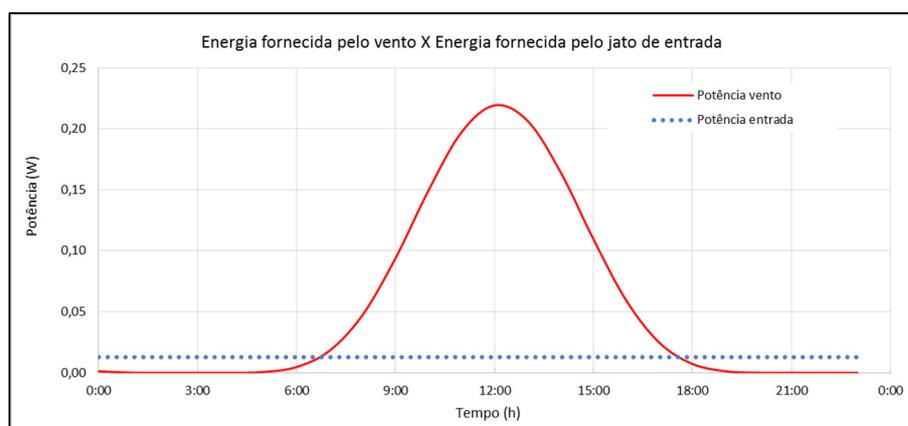
A FIG. 5.75a e 5.75b apresentam os vetores de velocidade no plano transversal que corta o meio da lagoa (plano XZ;  $Y = 12,5\text{m}$ ) para os mesmos horários da FIG. 5.73 - 12:00h e 21:00h - que são os horários de maior e menor velocidade do vento, respectivamente. Nota-se que a

FIG. 5.75a sugere a influência direta do vento nas camadas mais superficiais do fluido no horário analisado e os vetores de contrafluxo provocados, gerando circulação vertical e zonas de retromistura próximo aos taludes, enquanto que às 21:00h (FIG. 5.75b e FIG. 5.75c) os vetores de velocidade encontram-se direcionados para a saída nas laterais da lagoa, junto aos taludes, e em sentido inverso no meio da lagoa, conforme padrão obtido nos cenários sem vento (portanto, definido pelo dispositivo de entrada).



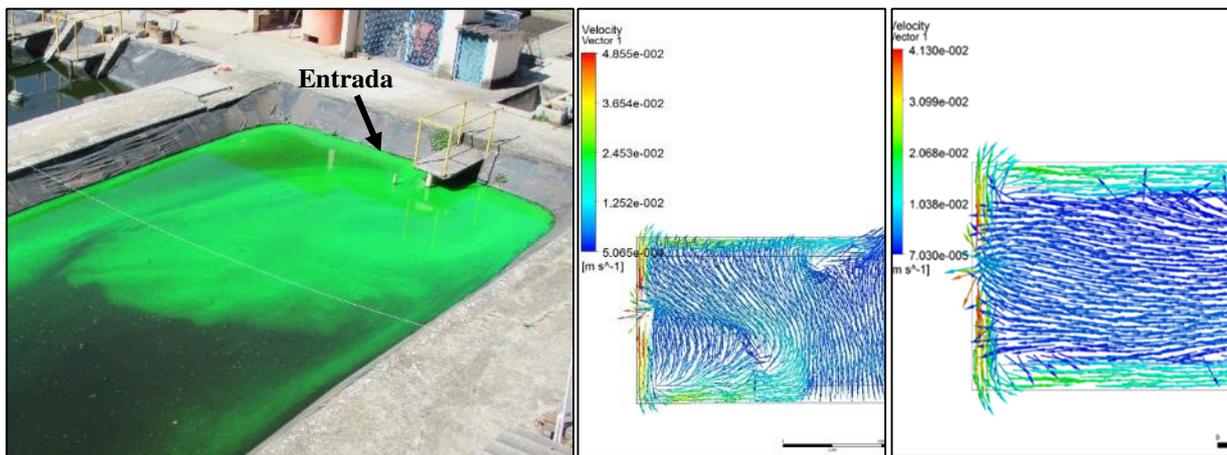
**FIGURA 5.75:** Vista dos vetores de velocidade em plano transversal na lagoa 1 (plano XZ;  $Y = 12,5\text{m}$ ) (a) às 12:00h do dia, com vista de perspectiva e (b) e (c) às 21:00h do dia, com vista em perspectiva e em planta, respectivamente, dos mesmos vetores. Simulação em regime transiente, vento dinâmico.

Os resultados do modelo em CFD concordam com a análise teórica proposta por Shilton (2001) e Shilton e Harrison (2003b) para comparação entre a energia fornecida ao fluido pelo jato de entrada e a energia fornecida ao fluido pela tensão de cisalhamento do vento (Equações 4.47 e 4.50). A FIG. 5.76 apresenta a evolução da energia fornecida pelo vento ao longo de um dia para este cenário (linha contínua em vermelho) em comparação com a potência fornecida ao fluido pelo jato de entrada (linha pontilhada azul - constante, já que a vazão também é constante). Nota-se a predominância da influência do vento das 07:00h às 17:30h aproximadamente, o que se assemelha bastante do comportamento observado dos valores de velocidade na FIG. 5.74.



**FIGURA 5.76:** Comparação teórica entre a energia fornecida ao fluido pelo jato de entrada e a energia fornecida ao fluido pela tensão de cisalhamento do vento.

Os resultados deste modelo demonstraram ser possível adotar modelos de lagoas com vento em condições dinâmicas, aspecto ainda não devidamente explorado na literatura. A inclusão do vento pareceu aproximar os resultados simulados de padrões observados em campo, tal como zonas de mistura não captadas em modelos sem consideração do vento. Um exemplo é a região de mistura observada no primeiro terço da lagoa a partir dos ensaios com corantes (FIG. 5.77a), que foi revelada nos modelos com vento (FIG. 5.77b) e ficou menos evidente nos cenários mais simplificados (FIG. 5.77c; transiente sem vento).



**FIGURA 5.77:** Comparação entre o (a) registro fotográfico da mistura do corante na entrada da lagoa 1 com resultados do modelo em CFD (b) considerando o vento dinâmico e (c) transiente, sem vento - CePTS UFMG/COPASA

#### f) Cenário 6 (cenário com balanço térmico – condições dinâmicas)

Principais características:

- Regime transiente
- Condições iniciais obtidas a partir do modelo estacionário (melhoria da convergência)
- Duração total (tempo físico) = 192 h
- Passo de tempo = 1 min
- Com transferência de calor (temperatura inicial estimada do fluido no domínio da simulação de 21°C → média da temperatura à 00:00h pela estação meteorológica)
- Sem tensão de cisalhamento provocada pela atuação direta do vento (vento considerado aqui apenas como fator interveniente nas variáveis da transferência de calor)
- Considerando modelo de empuxo (temperatura de referência = 25°C → temperatura para a massa específica definida para o fluido)
- Fluido com aproximações das características da água residuária já na lagoa
- Modelo de turbulência  $k-\varepsilon$

Condições de contorno:

- Entrada → fluxo mássico correspondente à uma vazão teórica de 40 m<sup>3</sup>/d

- Taludes → parede sem deslizamento (rugosidade suave), com coeficiente de transferência de calor conforme definido por Karteris *et al.* (2005), igual a 3 W/m<sup>2</sup>.K
- Superfície → parede com deslizamento; transferência de calor na interface definida de acordo pelo coeficiente de transferência de calor  $h_{ar-liq}$  (em W/m<sup>2</sup>.K) para lagoas de estabilização, definido por Fritz *et al.* (1980) e Sweeney *et al.* (2005), dependente da velocidade do vento (independentemente da sua direção), que, por sua vez, varia ciclicamente de acordo com o ajuste estatístico da função seno aos dados registrados na estação meteorológica ( $r = 0,92$ ):

$$h_{ar-liq} = 1,569 \cdot U_{vento} \quad (5.7)$$

$$U_{vento} = 2,93 + 1,90 \cdot \text{sen}(7,272 \times 10^{-5} \cdot t - 1,571) \quad (5.8)$$

e temperatura externa (do ar,  $T_{ar}$ , em K) variando ciclicamente de acordo com o ajuste estatístico da função seno aos dados registrados na estação meteorológica ( $r = 0,97$ ):

$$T_{ar} = 296,63 + 3,90 \cdot \text{sen}(7,272 \times 10^{-5} \cdot t - 2,086) \quad (5.9)$$

Radiação solar (irradiação) como termo fonte de energia na superfície variando em ciclo diário de acordo com o ajuste estatístico da função seno aos dados registrados na estação meteorológica ( $r = 0,87$ ), associada a uma função *step*:

$$I = \text{step}[\text{sen}(7,272 \times 10^{-5} \cdot t - 1,482)] \cdot 700 \cdot \text{sen}(7,272 \times 10^{-5} \cdot t - 1,482) \quad (5.10)$$

Perdas de calor por evaporação na superfície das lagoas definidas a partir do método de Fritz *et al.*, (1980) e dados de monitoramento em campo, por:

$$Evap = 1,74 \cdot U_{vento} \quad (5.11)$$

Os efeitos da atenuação dos raios solares pela biomassa foram considerados a partir da redução na intensidade luminosa e da variação no transporte de calor ao longo da profundidade, tomando-se por base a concentração média de sólidos em suspensão

obtida no monitoramento em campo (67 mg/L na lagoa 1). A partir das Equações 4.91 e 4.92, temos como exemplo:

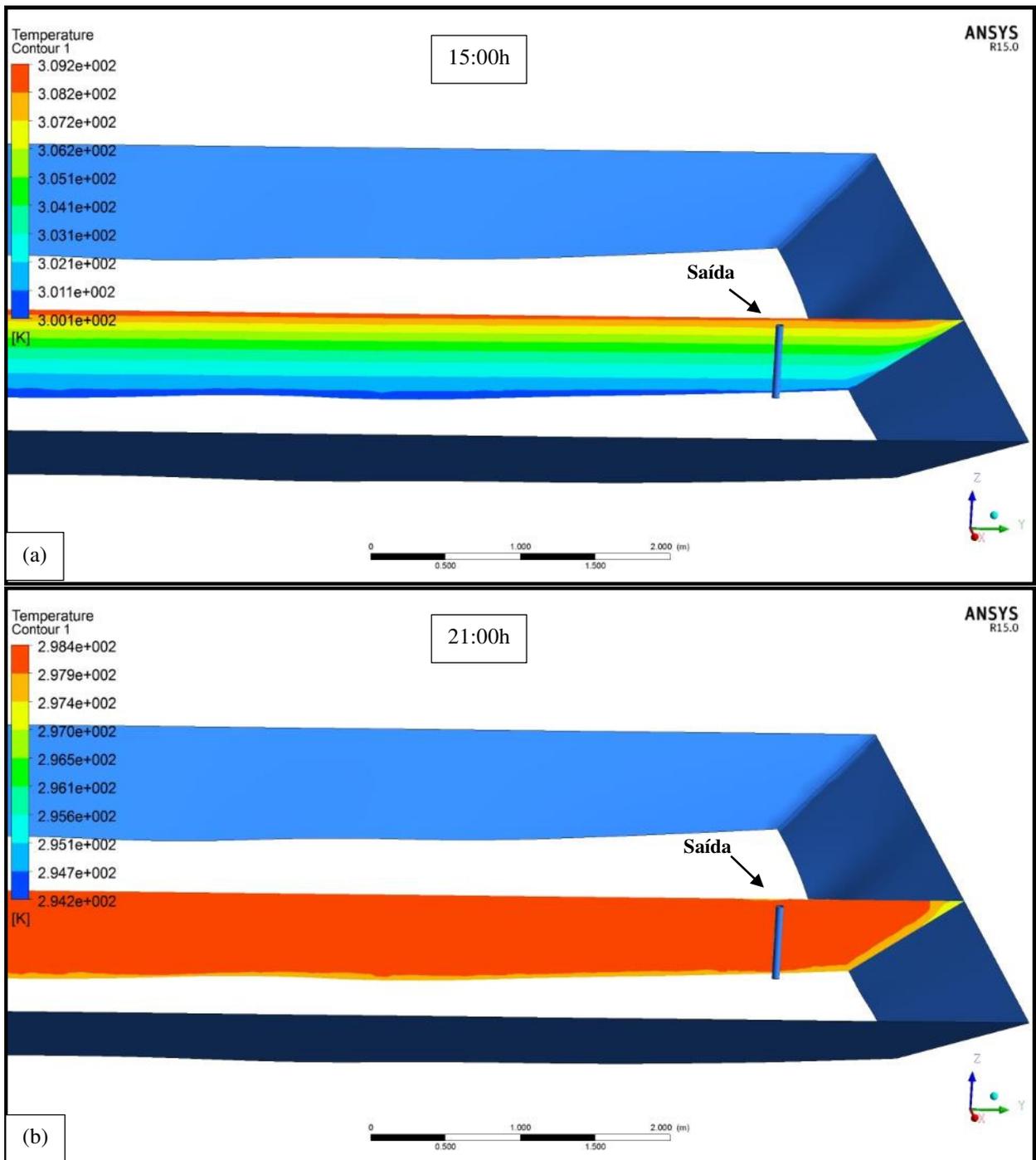
$$I = I_{\text{sup}} \cdot e^{-2,33 \cdot z} \quad (5.12)$$

- Fundo → parede sem deslizamento (rugosidade suave), com coeficiente de transferência de calor representativo do papel desempenhado pelo lodo no balanço térmico, obtido após calibração do modelo, no valor de 3 W/m<sup>2</sup>.K.
- Saída → fluxo mássico

Resumo (valores médios) dos resultados da simulação:

- Número de Courant = 19
- Número de Reynolds = 3,64 x 10<sup>4</sup>

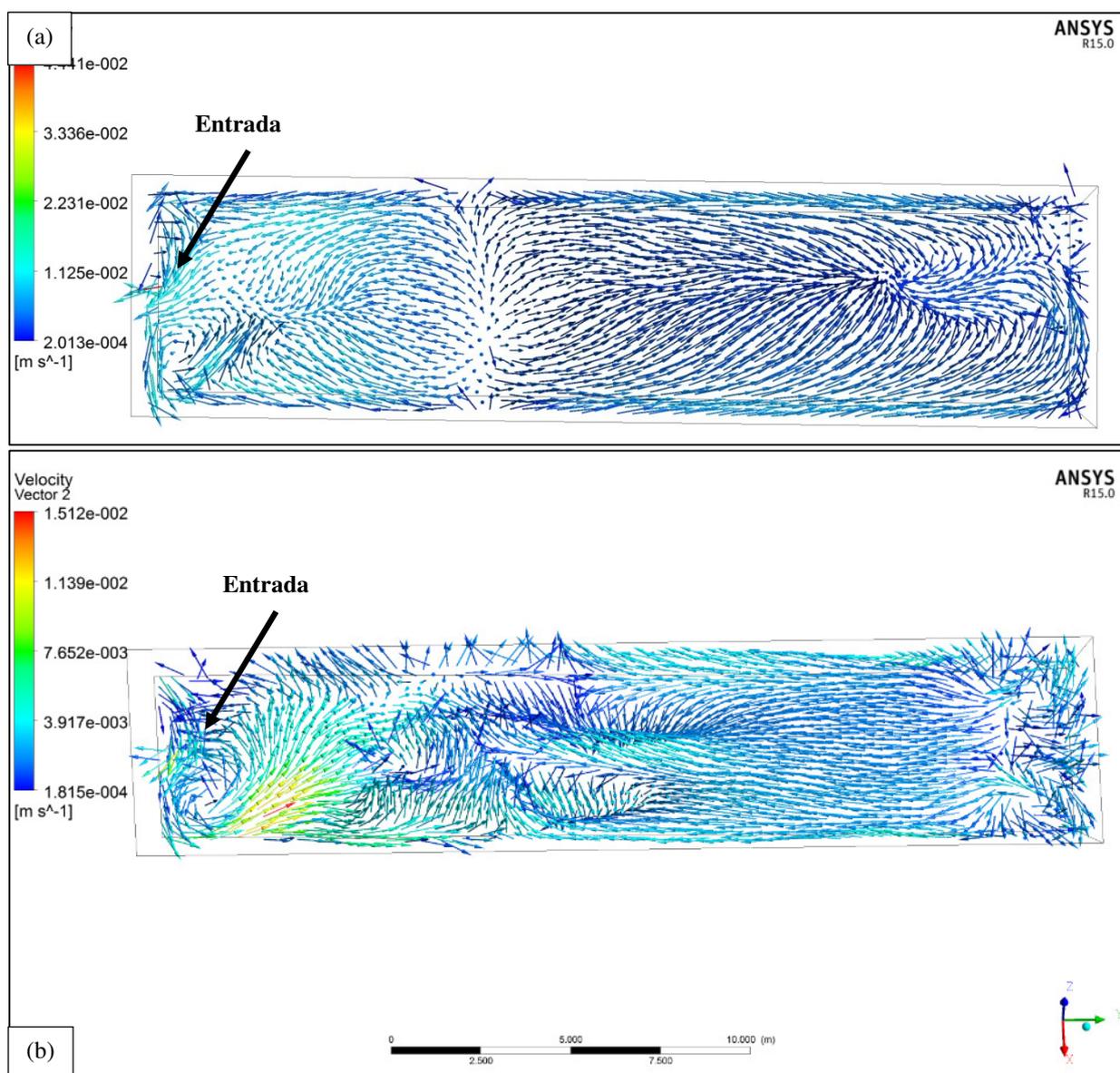
Os resultados neste cenário corresponderam bem aos resultados obtidos em campo. Os ciclos diários de estratificação e desestratificação observados em campo foram obtidos nas suas condições médias neste modelo. A fim de ilustrar este ciclo, a FIG. 5.78 apresenta superfícies de contorno variando com os valores da temperatura na segunda metade de um plano longitudinal no meio da lagoa, passando próximo ao dispositivo de saída (plano YZ; X = 3,25 m), em período de maior estratificação térmica obtido na simulação (FIG. 5.78a; ilustrando o perfil térmico às 15:00h) e no momento da mistura vertical (FIG. 5.78b; ilustrando o perfil térmico às 21:00h). As cores na legenda variam com a temperatura (em Kelvin), sendo a cor vermelha representativa da maior temperatura e a cor azul da menor. Nota-se no período de maior estratificação térmica (FIG. 5.78a) uma diferença de temperatura entre a superfície e o fundo de cerca de 10°C e no momento da mistura uma equalização da temperatura ao longo do perfil vertical, que se situou na faixa dos 25°C. Tanto as variações de temperatura quanto os momentos de estratificação e mistura vertical do modelo em CFD corresponderam bem às condições médias de perfil vertical obtidas em campo na lagoa 1.



**FIGURA 5.78:** Perfis verticais da temperatura em plano longitudinal na lagoa 1 (plano YZ;  $X = 3,25\text{m}$ ) obtidos via modelo em CFD **(a)** às 15:00h; correspondendo ao momento de maior gradiente térmico e **(b)** às 21:00h; correspondendo ao momento da mistura vertical. Regime transiente com balanço térmico em condições dinâmicas

Foi verificado também com este modelo o efeito do lodo de fundo no perfil térmico da lagoa, demonstrando a importância do mesmo no balanço térmico e modelagem hidrodinâmica de lagoas. O mesmo efeito de gradientes negativos observado em campo nas medições do perfil vertical foi obtido via CFD. Trata-se de uma abordagem inédita na literatura.

Com a inclusão dos efeitos do balanço térmico, notou-se que o comportamento hidrodinâmico na lagoa passou a ser ditado pelo efeito conjunto do jato de entrada e das forças de convecção e empuxo no meio líquido, resultando em um aspecto geral de mistura completa na unidade. As FIG. 5.79a e 579b apresentam vetores de velocidade no plano XY ( $Z=0,65\text{m}$ ) em momento de estratificação térmica e vetores de velocidade no plano XY ( $Z=0,55\text{m}$ ) em momento de mistura vertical.



**FIGURA 5.79:** (a) vetores de velocidade no plano XY ( $Z=0,65\text{m}$ ) em momento de estratificação térmica e (b) vetores de velocidade no plano XY ( $Z=0,55\text{m}$ ) em momento de mistura vertical. Regime transiente com balanço térmico em condições dinâmicas

É possível observar mistura geral mais acentuada no primeiro terço da lagoa, formando aproximadamente uma célula de mistura completa de comprimento de mesma magnitude da

largura da lagoa, tanto em momentos de estratificação térmica quanto em momentos de circulação vertical. Entretanto, em momentos de estratificação a célula com tendência de mistura completa se concentra mais nessa área de entrada e a parte final da lagoa parece sofrer menos a mistura no plano vertical.

Para fins de validação do modelo, foi também simulado um cenário representativo de um dos dias de ensaios de campo com medição do perfil térmico vertical da lagoa 1. Considerou-se o período de monitoramento nos dias 03/10/15 a 04/10/14 do ensaio nº 15, período no qual havia dados da estação disponíveis para modelagem dos fenômenos ambientais. Para este caso, a temperatura externa (do ar,  $T_{ar}$ , em K) variou ciclicamente de acordo com o ajuste estatístico da função seno aos dados registrados na estação meteorológica ( $r = 0,96$ ):

$$T_{ar} = 291,65 + 6 \cdot \text{sen}(7,272 \times 10^{-5} \cdot t - 2,32) \quad (5.13)$$

O coeficiente de transferência de calor  $h_{ar-liq}$  na superfície dependente da velocidade do vento (independentemente da sua direção), conforme Equação 5.7, e que, por sua vez, variou ciclicamente de acordo com o ajuste estatístico da função seno aos dados registrados na estação meteorológica ( $r = 0,43$ ):

$$U_{vento} = 7,07 + 2 \cdot \text{sen}(7,272 \times 10^{-5} \cdot t - 2,94) \quad (5.14)$$

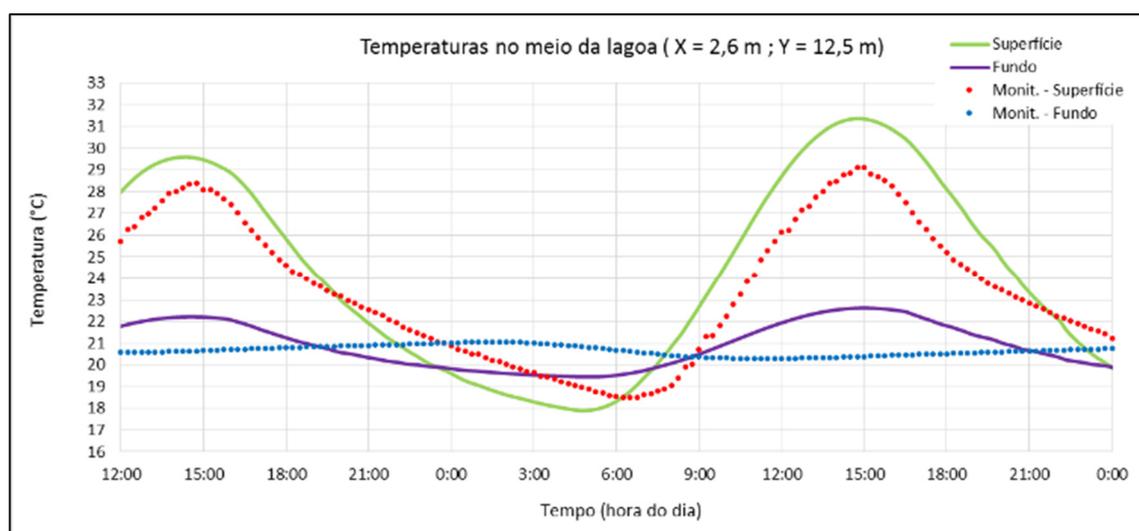
Importante lembrar que, neste cenário, a variação dinâmica do vento foi considerada apenas para efeito de variação do coeficiente de transferência de calor, e não como atuação direta na superfície (a ser incluído em outro cenário).

A radiação solar (irradiação) também foi definida de acordo com o ajuste estatístico da função seno aos dados registrados na estação meteorológica para o período ( $r = 0,85$ ), associada a uma função *step*:

$$I_{sup} = \text{step}[\text{sen}(7,272 \times 10^{-5} \cdot t - 1,56)] \cdot 1000 \cdot \text{sen}(7,272 \times 10^{-5} \cdot t - 1,56) \quad (5.15)$$

Nos processos de calibração e validação do modelo com balanço térmico, ficou evidente que a adoção de um perfil exponencial de variação do calor específico ao longo da profundidade é

elemento fundamental para obtenção dos ciclos de estratificação e desestratificação tal como observado em campo. Os resultados do modelo em CFD corresponderam bem aos dados obtidos com o monitoramento do perfil vertical. A FIG. 5.80 apresenta a comparação entre os dados de temperatura medidos na superfície e no fundo da lagoa em campo durante parte do ensaio de n° 15 (pontos) e os dados simulados em CFD com as mesmas condições (linhas contínuas). A raiz quadrada do erro quadrático médio (Erro *RMSE*) entre os dados simulados e os dados de campo foi de 2,1°C para a temperatura superfície e de 0,8°C para a temperatura do fundo.



**FIGURA 5.80:** Comparação entre os dados de temperatura medidos na superfície e no fundo da lagoa 1 em campo durante ensaio de n° 15 (pontos) e os dados simulados em CFD com as mesmas condições (linhas contínuas). Regime transiente com balanço térmico em condições dinâmicas

**g) Cenário 7 (MODELO UNIFICADO: lodo, balanço térmico, vento, condições dinâmicas)**

Após inúmeras tentativas de se chegar a um modelo dinâmico que produzisse resultados satisfatórios quanto ao comportamento hidrodinâmico da lagoa quando sujeita às condições de contorno comumente encontrada na maioria dos sistemas - lodo acumulado e influência das condições ambientais externas de temperatura, evaporação, ação do vento e radiação solar - apresentam-se abaixo os principais resultados deste cenário.

Principais características:

- Regime transiente
- Condições iniciais obtidas a partir do modelo estacionário (melhoria da convergência)
- Duração total (tempo físico) = 192 h
- Passo de tempo = 1 min
- Com transferência de calor (temperatura inicial estimada do fluido no domínio da simulação de 21°C → média da temperatura à 00:00h pela estação meteorológica)
- Tensão de cisalhamento provocada pela atuação direta do vento
- Considerando modelo de empuxo (temperatura de referência = 25°C → temperatura para a massa específica definida para o fluido)
- Fluido com aproximações das características da água residuária já na lagoa
- Modelo de turbulência  $k-\varepsilon$

Condições de contorno:

- Entrada → fluxo mássico correspondente à uma vazão teórica de 40 m<sup>3</sup>/d
- Taludes → parede sem deslizamento (rugosidade suave), com coeficiente de transferência de calor conforme definido por Karteris *et al.* (2005), igual a 3 W/m<sup>2</sup>.K
- Superfície → parede com deslizamento; transferência de calor na interface definida de acordo pelo coeficiente de transferência de calor  $h_{ar-liq}$  (em W/m<sup>2</sup>.K) para lagoas de estabilização, definido por Fritz *et al.* (1980) e Sweeney *et al.* (2005), dependente da velocidade do vento (independentemente da sua direção), que, por sua vez, varia ciclicamente de acordo com o ajuste estatístico da função seno aos dados registrados na estação meteorológica ( $r = 0,92$ ):

$$h_{ar-liq} = 1,569 \cdot U_{vento} \quad (5.16)$$

$$U_{vento} = 2,93 + 1,90 \cdot \text{sen}(7,272 \times 10^{-5} \cdot t - 1,571) \quad (5.17)$$

e temperatura externa (do ar,  $T_{ar}$ , em K) variando ciclicamente de acordo com o ajuste estatístico da função seno aos dados registrados na estação meteorológica ( $r = 0,97$ ):

$$T_{ar} = 296,63 + 3,9 \cdot \text{sen}(7,272 \times 10^{-5} \cdot t - 2,086) \quad (5.18)$$

Radiação solar (irradiação) como termo fonte de energia na superfície variando em ciclo diário de acordo com o ajuste estatístico da função seno aos dados registrados na estação meteorológica ( $r = 0,96$ ), associada a uma função *step*:

$$I = \text{step}\left[\text{sen}(7,272 \times 10^{-5} \cdot t - 1,482)\right] \cdot 700 \cdot \text{sen}(7,272 \times 10^{-5} \cdot t - 1,482) \quad (5.19)$$

A reflexão da radiação solar pelo albedo foi considerada como sendo de 5%, um valor aproximado a partir de analogias com corpos d'água semelhantes em condições climáticas semelhantes às do presente estudo (MEIRELLES, 2007; NICÁCIO, 2008; OLIVEIRA *et al.*, 2013).

Perdas de calor por evaporação na superfície das lagoas definidas a partir do método de Fritz *et al.*, (1980) e dados de monitoramento em campo, por:

$$Evap = 1,74 \cdot U_{\text{vento}} \quad (5.20)$$

Os efeitos da atenuação dos raios solares pela biomassa foram considerados a partir da redução na intensidade luminosa e da variação no transporte de calor ao longo da profundidade, tomando-se por base a concentração média de sólidos em suspensão obtida no monitoramento em campo (67 mg/L na lagoa 1). Temos como exemplo:

$$I = I_{\text{sup}} \cdot e^{-2,33 \cdot z} \quad (5.21)$$

Vetor médio de tensão de cisalhamento de módulo variando de acordo com a Equação 5.17 e sentido -X da lagoa na simulação. Valor da constante empírica  $C_d = 10^{-4}$ ; menor valor da faixa registrada em literatura

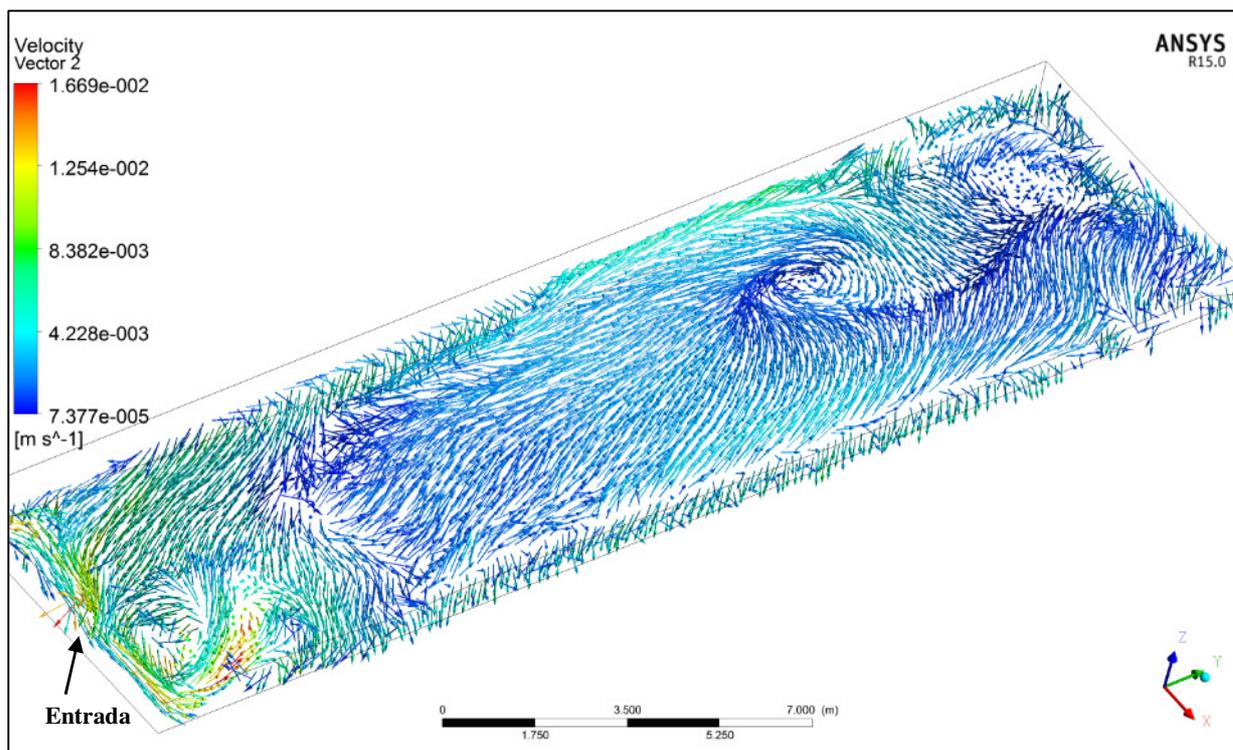
$$\bar{\tau}_{[W]} = -1,225 \times 10^{-4} U_{\text{vento}[W]}^2 \quad (5.22)$$

- Fundo → parede sem deslizamento, com rugosidade definida para o lodo de 20 mm. Coeficiente de transferência de calor representativo do papel desempenhado pelo lodo no balanço térmico, obtido após calibração do modelo, no valor de 3 W/m<sup>2</sup>.K.
- Saída → fluxo mássico

Resumo (valores médios) dos resultados da simulação:

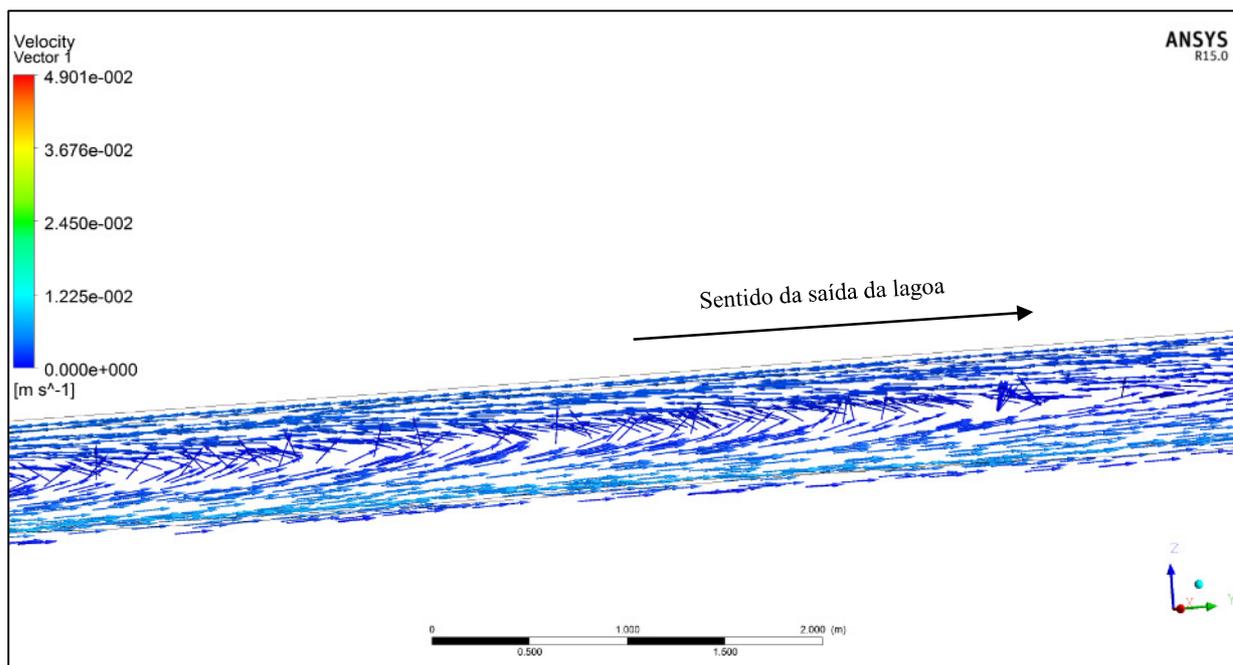
- Número de Courant = 19
- Número de Reynolds =  $3,13 \times 10^4$

De modo geral, o comportamento hidrodinâmico da lagoa 1 no modelo unificado pode ser caracterizado por uma mistura completa, ao longo das três dimensões. Ao longo do comprimento, a tendência geral é de que linhas de fluxo partam em direção à saída pelas laterais e principalmente pelo fundo da lagoa, junto ao lodo, e linhas de fluxo em sentido contrário (no sentido da entrada) ocorram mais nas camadas superficiais, o que concorda bem com o comportamento verificado em campo com os ensaios com corantes (já que a observação visual correspondia mais ao movimento nas camadas superficiais do fluido na lagoa). Este comportamento provoca uma mistura completa ao longo do comprimento e caracteriza uma grande célula de recirculação, que coexiste com células menores e em outras direções e regiões da lagoa. A FIG. 5.81 apresenta perspectiva da lagoa com vetores de velocidade em um plano XY mais central, de transição ( $z = 0,5\text{m}$ ), às 12:00h, ilustrando a grande mistura que se observa ao longo de toda a unidade.

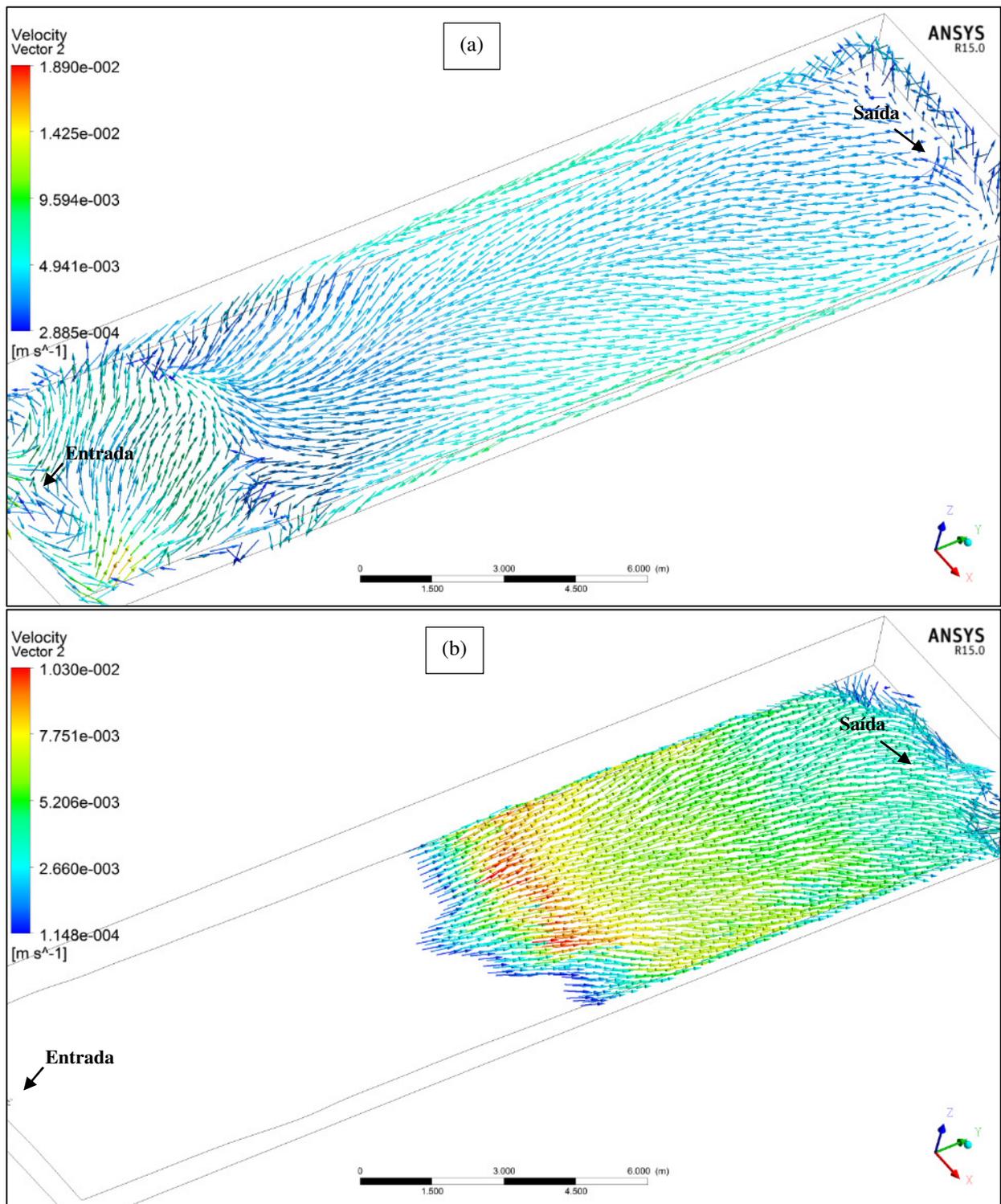


**FIGURA 5.81:** Vetores de velocidade na lagoa 1 às 12:00h - plano XY longitudinal, com Z = 0,50 m. Modelo transiente unificado.

A FIG. 5.82 ilustra para as 21:00h os vetores de velocidade em uma parte central de um plano longitudinal no meio da lagoa (plano ZY, X = 2,6 m), na qual é possível verificar os vetores nas camadas inferiores do fluido no sentido da saída e vetores na superfície em sentido inverso (em contrafluxo). A FIG. 5.82 também sugere velocidades ligeiramente superiores no fundo. Neste horário o vento atua com menores velocidades. As FIG 5.83a e 5.83b ilustram vetores de velocidade às 21:00h em um plano XY nas profundidades z = 0,65 m (mais próximo à superfície) e z = 0,30 m (cortando o lodo em algumas regiões), respectivamente, também evidenciando os sentidos opostos do fluxo principal de acordo com a profundidade. Na FIG 5.83b, os vetores de velocidade só aparecem para as porções do fluido que estão acima do lodo, portanto, para as regiões da lagoa com altura do lodo menor que 0,30m.



**FIGURA 5.82:** Vetores de velocidade na lagoa 1 às 21:00h - plano longitudinal no meio da lagoa (plano ZY, X = 2,6 m). Modelo transiente unificado.



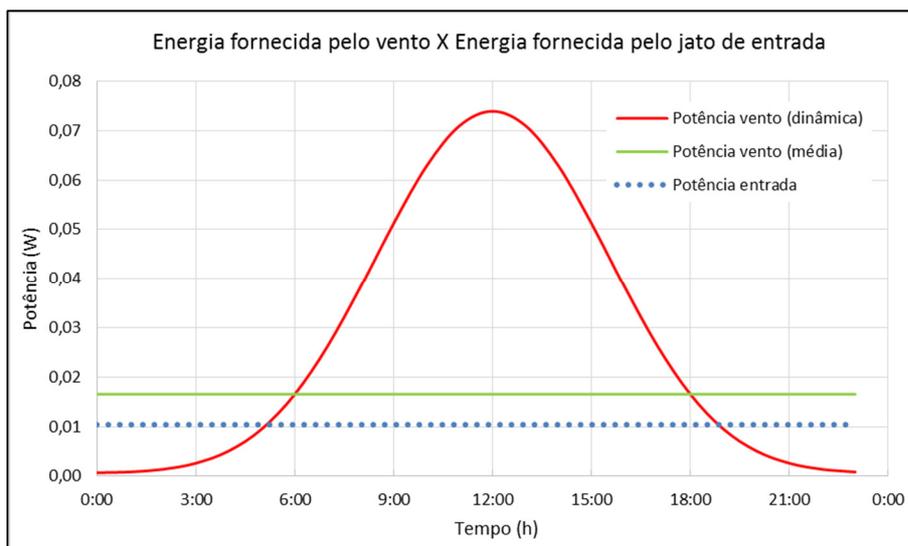
**FIGURA 5.83:** Vetores de velocidade na lagoa 1 às 21:00h - plano XY longitudinal, com **(a)**  $Z = 0,65$  m e **(b)**  $Z = 0,30$  m. Modelo transiente unificado.

Nos momentos do dia correspondentes à maiores velocidades do vento, que coincidem com períodos em que a lagoa se encontra estratificada, o vento parece induzir mais pronunciadamente a mistura no sentido da largura da lagoa (condizente com a direção de atuação do mesmo), de forma que se verificam vetores de velocidade na superfície apontados

no sentido do vento e vetores no sentido inverso nas camadas mais profundas, principalmente na parte com menor acúmulo de lodo (maior camada líquida). Entretanto, tal comportamento foi menos evidente em comparação ao modelo com vento isotérmico. Há também uma tendência de formação de uma “célula” de mistura completa no primeiro terço da lagoa, junto à entrada, com largura e comprimento semelhantes à largura da lagoa.

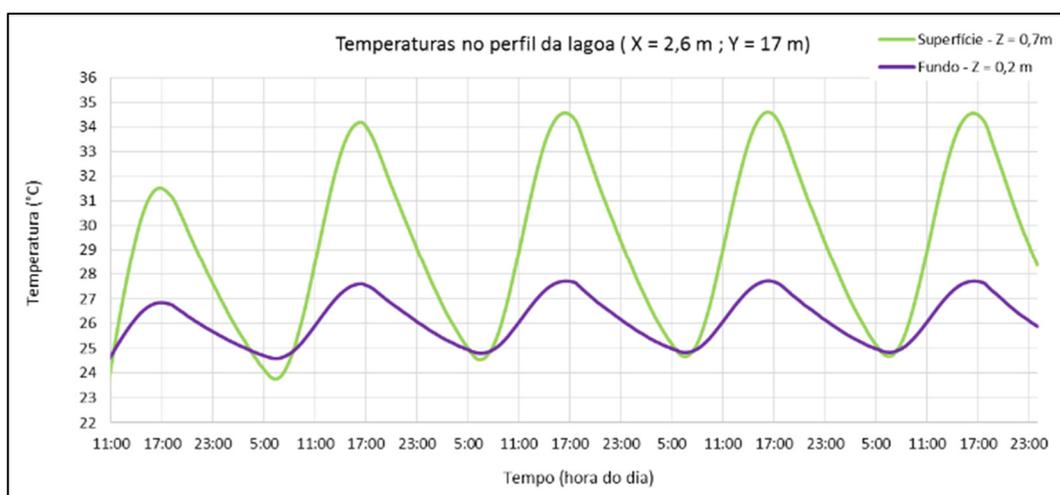
A tendência de predomínio do jato de entrada como principal condicionador do fluxo ocorre alternando com o vento, de acordo com a dinâmica deste último. Em tempos de ventos mais fortes, a influência do jato de entrada forçando o fluido pelas laterais deixa de ser visível na superfície, mas a condição de equilíbrio que é atingida mesmo com a intensificação do vento conta com a quantidade de movimento fornecida pela entrada para promover o fluxo subsuperficial do efluente e também promover a mistura na zona de entrada da lagoa.

Para comparação teórica entre a energia fornecida ao fluido pelo jato de entrada e a energia fornecida ao fluido pela tensão de cisalhamento do vento (Equações 3.55 e 3.57), a FIG. 5.84 apresenta a evolução temporal da energia fornecida pelo vento ao longo de um dia para este cenário (linha contínua em vermelho) em comparação com a potência fornecida ao fluido pelo jato de entrada (linha pontilhada azul - constante, já que a vazão também é constante) e também caso o vento fosse considerado constante, com velocidade média ao longo de todo o dia. Nota-se a predominância da influência do vento das 05:00h às 19:00h e predominância do jato de entrada das 19:00h às 05:00h (durante a maior parte da noite). A análise teórica também sugere que, caso o vento fosse considerado constante, a potência fornecida pelo mesmo durante todo o dia teria magnitude sempre superior àquela fornecida pelo jato de entrada, o que certamente seria fator condicionador predominante do fluxo, tal como já analisado em cenários anteriores.



**FIGURA 5.84:** Comparação teórica entre a energia fornecida ao fluido pelo jato de entrada e a energia fornecida ao fluido pela tensão de cisalhamento do vento – modelo transiente unificado.

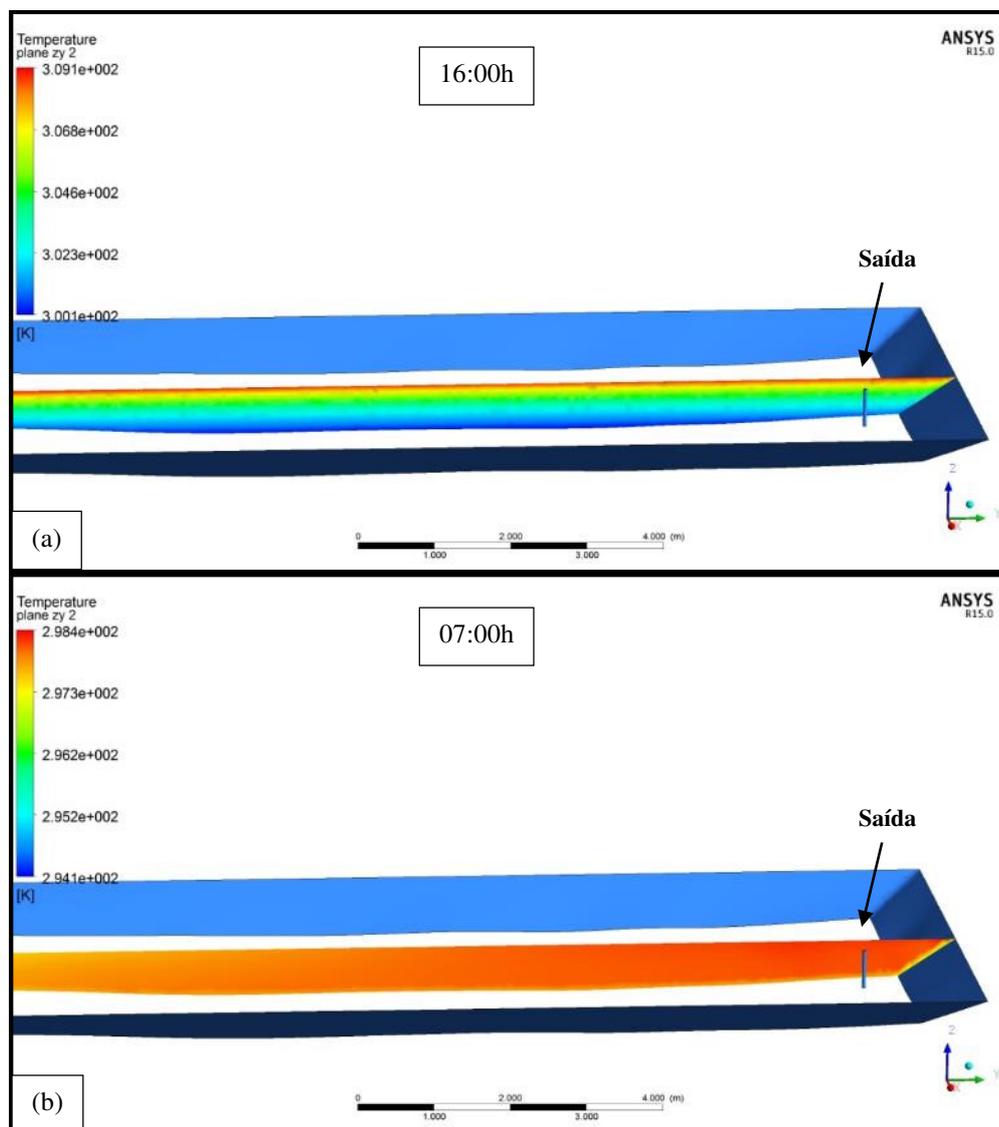
Os ciclos diários de estratificação e desestratificação observados em campo foram obtidos nas suas condições médias neste modelo. O modelo sugere estratificação térmica seguida de desestratificação mesmo em períodos de maior atuação do vento, com uma diferença média de 6°C entre a temperatura de um ponto na superfície ( $Z = 0,7$  m) e um ponto no fundo da lagoa, em uma região com menor lodo acumulado (maior camada de fluido), mas fora dele ( $Z = 0,2$  m). A FIG. 5.85 apresenta a variação temporal da temperatura nesses dois pontos.



**FIGURA 5.85:** Variação temporal das temperaturas na superfície (linha em verde) e fundo (linha roxa) da lagoa 1, obtidas pelo modelo unificado em CFD.

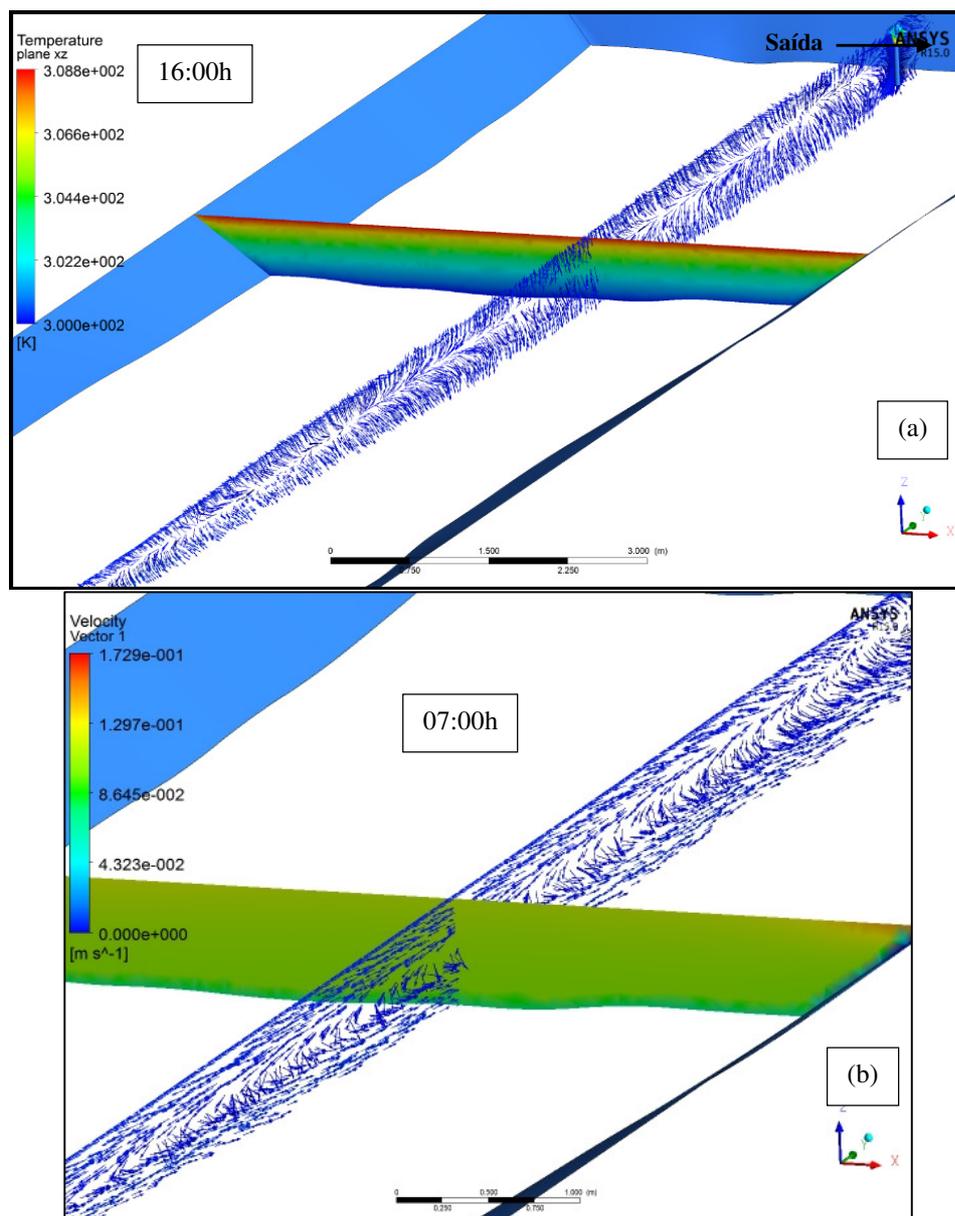
A fim de ilustrar este ciclo e o perfil vertical de temperatura, a FIG. 5.86 apresenta superfícies de contorno variando com os valores da temperatura na segunda metade de um plano longitudinal no meio da lagoa, passando próximo ao dispositivo de saída (plano YZ;  $X = 3,25$

m), em período de maior estratificação térmica obtido na simulação (FIG. 5.86a; ilustrando o perfil térmico às 16:00h) e no momento da mistura vertical (FIG. 5.86b; ilustrando o perfil térmico às 07:00h). As cores na legenda variam com a temperatura (em Kelvin), sendo a cor vermelha representativa da maior temperatura e a cor azul da menor. Nota-se no período de maior estratificação térmica (FIG. 5.86a) uma diferença de temperatura entre a superfície e o fundo de cerca de 6°C e no momento da mistura uma equalização da temperatura ao longo do perfil vertical, que se situou na faixa dos 25°C (298K). Tanto as variações de temperatura quanto os momentos de estratificação e mistura vertical do modelo em CFD corresponderam bem às condições gerais de perfil vertical obtidas em campo na lagoa 1.



**FIGURA 5.86:** Perfis verticais da temperatura em plano longitudinal na lagoa 1 (plano YZ; X = 3,25m) obtidos via modelo em CFD **(a)** às 16:00h; correspondendo ao momento de maior gradiente térmico e **(b)** às 07:00h; correspondendo a um momento com equalização da temperatura. Modelo transiente unificado.

Esta tendência também pode ser observada no sentido transversal da lagoa. As FIG 5.87a e 5.87b apresentam superfícies de contorno variando com os valores da temperatura em um plano transversal no meio da lagoa (plano XZ; X = 17 m). Nas mesmas figuras são mostrados os vetores de velocidade no plano longitudinal plano YZ; X = 3,25 m. A figura ilustra o comportamento em período de maior estratificação térmica obtido na simulação (FIG. 5.87a; ilustrando o perfil térmico às 16:00h, com a legenda de cores para os valores de temperatura) e em período de desestratificação (FIG. 5.87b; ilustrando o perfil térmico às 07:00h, com a legenda de cores para os valores de velocidade).



**FIGURA 5.87:** Perfis verticais da temperatura em plano transversal na lagoa 1 (plano XZ; Y = 17m) obtidos via modelo em CFD **(a)** às 16:00h; correspondendo ao momento de maior gradiente térmico e **(b)** às 07:00h; correspondendo a um momento com equalização da temperatura. Modelo transiente unificado.

Observa-se pelo comportamento geral do fluido nas situações de estratificação e desestratificação que há tendência de movimento convectivo provocado pela diferença de temperatura entre as camadas do fluido (associado ao empuxo), que concorre com os movimentos horizontais do campo de escoamento, impulsionados pelo jato de entrada e pela ação do vento, e com a própria tendência de estabilidade devido às propriedades viscosas do fluido e à difusão térmica. Todo este cenário confirma a grande complexidade e dinamismo do escoamento em lagoas, distanciando ainda mais da possibilidade de descrição definitiva do comportamento hidrodinâmico por meio de equações teóricas mais simplificadas, quando a intenção for de estudar e analisar os fenômenos que ocorrem no interior da unidade de tratamento. O que pode ser generalizado é um comportamento médio de mistura completa, com a ressalva de que fenômenos distintos ocorrem simultaneamente em diferentes regiões da lagoa.

Pela FIG. 5.87a é razoável assumir durante a estratificação a existência de uma instabilidade hidrodinâmica na lagoa análoga à Instabilidade de Rayleigh-Bénard. De acordo com o referencial teórico a respeito desta, se a diferença de temperatura entre duas superfícies (no caso do modelo da lagoa, a parede de fundo, representado pelo lodo, e a parede de superfície, representando as condições ambientais externas) for suficientemente pequena, a transferência de calor irá ocorrer basicamente por condução, originando um perfil de temperatura aproximadamente linear ao longo do fluido (observado via CFD – ver FIG. 5.109), mas quando a diferença de temperatura entre as superfícies atingir um valor crítico, o sistema irá se tornar instável e a estratificação de densidade (devido ao coeficiente de expansão térmica) irá originar a movimentação do fluido na forma de uma célula de convecção. A partir deste momento, a transferência de calor irá ocorrer também por convecção (CHARRU, 2011; FONTANA, 2014), provocando movimentação. Em uma abordagem mais avançada, Fontana (2014) apresenta um estudo a respeito da convecção de Rayleigh-Bénard-Poiseuille Estratificada (RBPE), na qual há um cenário misto quanto às formas de instabilidade, em que coexistem diferentes camadas, devido ao gradiente de temperatura e variação nas propriedades do fluido, e a presença de uma força motriz que induz o deslocamento do fluido na direção horizontal, provocando um escoamento estratificado com células de recirculação. Portanto, ressalvadas as devidas especificidades teóricas (comumente aplicada a dois fluidos distintos), há também uma analogia deste conceito de instabilidade às condições observadas na lagoa. A analogia do comportamento hidrodinâmico na lagoa durante a estratificação e esta teoria é possível quando se considera o gradiente térmico provocado pela temperatura externa e radiação solar; as

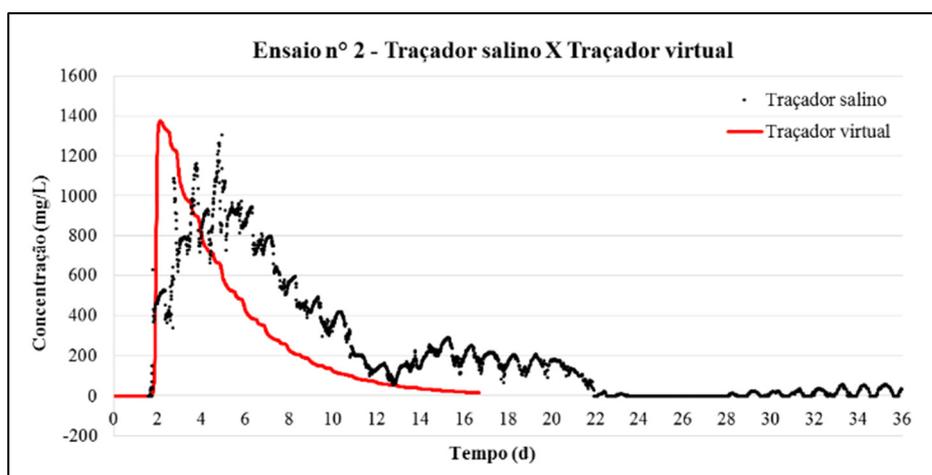
variações de propriedade do fluido consideradas no modelo (influência dos sedimentos, refletindo na variação das propriedades de transferência de calor ao longo da profundidade) e as forças-motrizes presentes que induzem movimento na direção horizontal (jato de entrada e atuação dos ventos). A FIG. 5.87a, que ilustrou vetores de velocidade ao longo da profundidade em um plano longitudinal durante momento de estratificação térmica, evidenciado pelo perfil térmico ao longo de um plano transversal na lagoa, sugere a existência de células de recirculação estratificada em aproximadamente duas camadas ao longo do perfil vertical, tal como teorizado na convecção RBPE. Em momentos de estratificação com maiores velocidade dos ventos, aos vetores de velocidade na superfície induzidos pelo vento e o movimento vertical podem ser lentos o suficiente, comparado com a transferência de calor, para não provocar a desestratificação térmica.

Já na FIG. 5.87b - que apresentou o perfil de temperatura em momento de desestratificação e o comportamento dos vetores de velocidade no plano longitudinal - é possível perceber a tendência de circulação vertical provocada pela equalização da temperatura, sugerida também pelos dados de monitoramento em campo (item 5.1.3).

Parâmetros adimensionais avaliados no momento de estratificação também indicam a tendência à transferência de calor por convecção natural no interior da lagoa, conseqüentemente a ocorrência da mistura vertical, bem como corroboram a importância do empuxo e a necessidade de tratamento da termodinâmica na lagoa em regime transiente, tal como realizado no presente cenário:

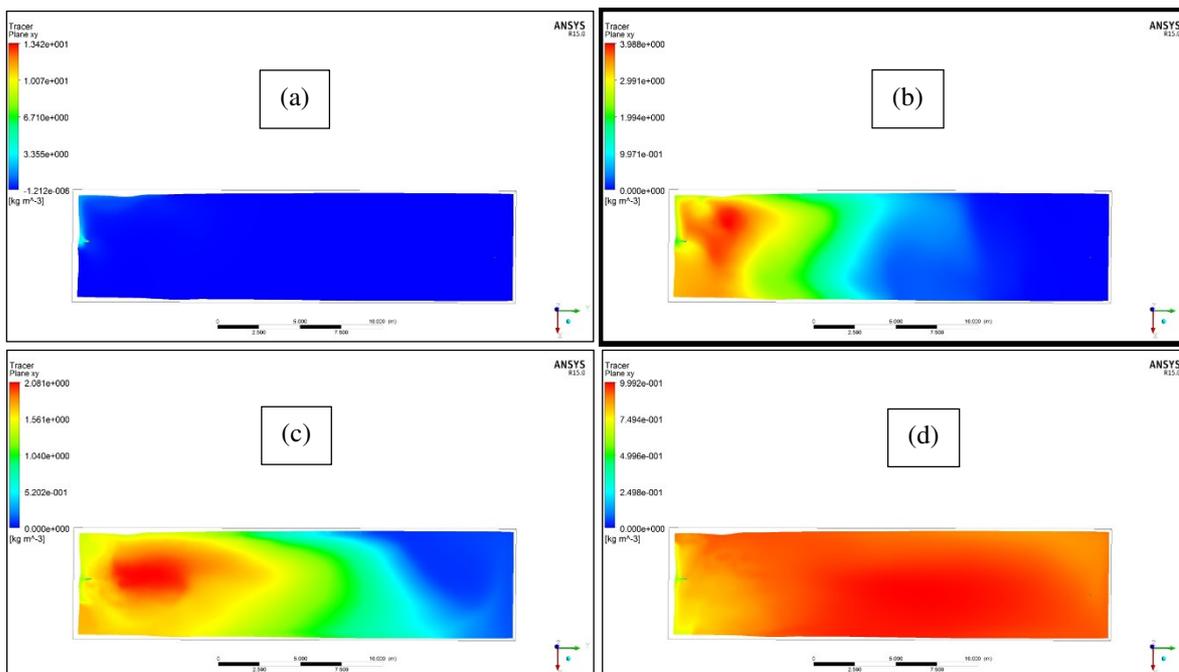
- O número de Biot de cerca de 23 (portanto,  $\gg 0,1$ ) indica a grande possibilidade de ocorrência da estratificação e inviabiliza o pressuposto de temperatura constante e uniforme em todo o volume, demandando tratamento transiente do processo de transferência de calor.
- O número de Richardson obtido, de cerca de 24, indica grande importância dos fenômenos de empuxo (também considerados no modelo).
- Por sua vez, a grande magnitude do número de Rayleigh obtido (da ordem de  $1,3 \times 10^{10}$ ) supera consideravelmente o limiar teórico aproximado para convecção ( $\sim 1700$ ), de forma que o movimento convectivo passa a operar como transferidor de calor, em detrimento do transporte de calor por condução, resultando assim em mistura.

Testes com traçador virtual realizados no modelo revelaram rápida chegada da pluma na saída, antecipando o pico. Para fins de comparação, definiu-se um teste com traçador virtual com as mesmas condições de contorno do ensaio de campo n° 2 com o traçador salino (incluindo a vazão aferida antes e durante os testes), exceto pelo fato de o traçador virtual ter sido definido com propriedades ideais e idênticas ao do fluido, para desconsiderar os fenômenos e efeitos de sedimentação, estratificação, adsorção etc. O número de dispersão obtido com a curva de traçador virtual foi de  $d = 0,3$ , e o tempo de detenção hidráulica médio foi calculado em  $\overline{TDH}_x = 4,3d$ , sendo este 66% do teórico (para o volume total da lagoa) ou exatamente o mesmo (4,3d) caso se desconsiderasse o volume ocupado pelo lodo na lagoa. Ressalta-se que o TDH médio e o número de dispersão obtidos com o traçador salino foram de  $\overline{TDH}_x = 6,5d$  e  $d = 0,7$ . A FIG. 5.88 apresenta comparação entre as duas curvas (real e virtual). Mesmo com todos os fatores que potencialmente contribuíram com erros, principalmente nos testes com traçador salino, resultando em elevados  $\overline{TDH}_x$  e  $d$ , observa-se certa similaridade entre o comportamento das duas curvas, principalmente quanto à tendência geral de mistura completa, quanto ao momento da aparição do traçador na saída e quanto à concentração do traçador no pico da curva.



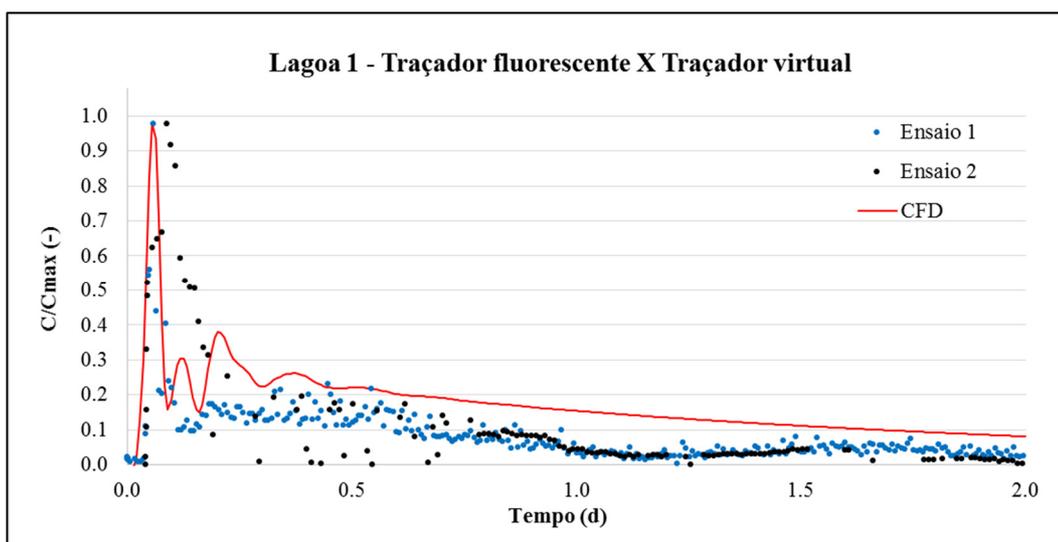
**FIGURA 5.88:** Comparação entre as concentrações efluente do traçador salino no ensaio de campo de n° 2 e as concentrações efluente do traçador virtual no modelo em CFD. Modelo transiente unificado.

Para fins de ilustração, a FIG. 5.89 apresenta a evolução temporal da dispersão do traçador virtual em um plano XY próximo à superfície ( $z = 0,65m$ ) da esquerda para a direita: (a) no momento da injeção; (b) após 2h da injeção; (c) após 4h da injeção; (d) após 8h da injeção. Nota-se a rápida chegada do traçador na saída, tal como evidenciado nas curvas da FIG. 5.88.



**FIGURA 5.89:** Evolução temporal da dispersão do traçador virtual em um plano XY próximo à superfície da lagoa 1 ( $z = 0,65\text{m}$ ): **(a)** no momento da injeção; **(b)** após 2h da injeção; **(c)** após 4h da injeção; **(d)** após 8h da injeção. Modelo transiente unificado.

A comparação entre o traçador virtual e os ensaios com traçador fluorescente também corrobora que os resultados do modelo em CFD foram satisfatórios. Para fins de análise comparativa, definiu-se um teste com traçador virtual com as mesmas condições de contorno dos ensaios de campo n.º 1 e 2 com a fluoresceína (uranina), incluindo a vazão média entre as aferidas antes e durante os testes, que foram semelhantes nos dois casos. Ressalta-se que o traçador virtual foi definido com propriedades ideais e idênticas ao do fluido, para desconsiderar os fenômenos e efeitos de degradação pela radiação solar e turbulência, variação com pH, adsorção etc.



**FIGURA 5.90:** Comparação entre as concentrações efluente do traçador fluorescente nos ensaios de campo de n° 1 e 2 e as concentrações efluente do traçador virtual no modelo em CFD. Modelo transiente base.

Mesmo com todos os fatores que potencialmente contribuíram com erros em campo, observa-se certa similaridade entre os resultados de campo e do modelo em CFD, principalmente quanto à tendência geral de mistura completa, quanto ao momento da aparição do traçador na saída e momento de ocorrência do pico.

### 5.3.2.2 Lagoa 1 (lodo geométrico)

Em termos de parâmetros hidráulicos resultantes, as simulações na lagoa 1 com a geometria do lodo aproximada a formas geométricas simples forneceu resultados semelhantes ao modelo com geometria obtida a partir do levantamento batimétrico, o que indica a possibilidade dessa substituição no processo de geração da geometria na modelagem em CFD para obtenção de TDH real e grau de dispersão, por exemplo.

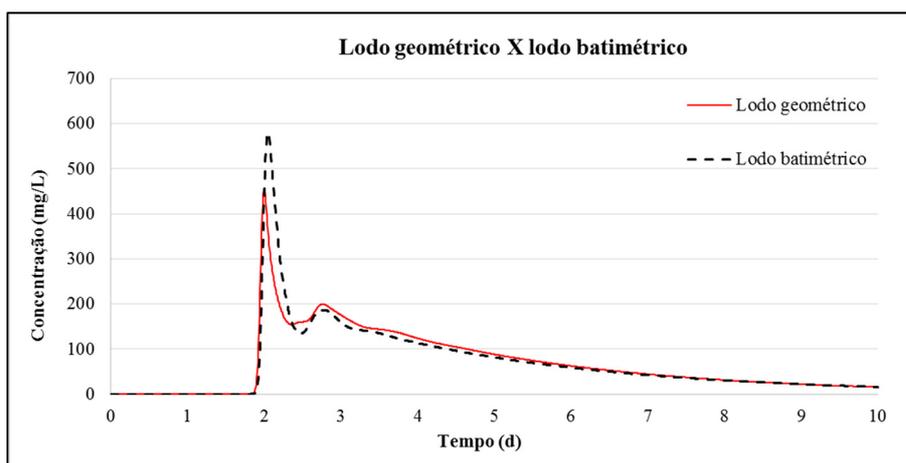
A fim de exemplificar, simulações foram feitas na lagoa 1 com injeção do traçador virtual em um modelo simplificado transiente (sem transferência de calor, propriedades constantes do fluido e sem vento atuando na superfície) com as mesmas condições de contorno em dois cenários distintos: um primeiro considerando o lodo geométrico e um segundo momento considerando o lodo batimétrico, ambos com mesma rugosidade (20 mm). A intenção foi de isolar unicamente o efeito das diferentes geometrias do lodo no comportamento hidrodinâmico, aferido pela curva de traçador na saída. Portanto, tem-se para os dois cenários a seguinte definição de modelagem:

- Regime transiente
- Condições iniciais obtidas a partir do modelo estacionário (melhoria da convergência)
- Duração total (tempo físico) = 240 h
- Passo de tempo = 10 min
- Isotérmico
- Sem atuação do vento
- Modelo de turbulência  $k-\varepsilon$
- Injeção de pulso de traçador com  $215\text{kg/m}^3$  e difusividade cinemática de  $10^{-5}\text{ m}^2/\text{d}$  após 40h do início do escoamento (após a simulação atingir condições estáveis)

Condições de contorno:

- Entrada → fluxo mássico de  $22\text{m}^3/\text{d}$
- Taludes → parede sem deslizamento (rugosidade suave)
- Superfície → parede com deslizamento
- Fundo → parede sem deslizamento, com rugosidade definida para o lodo de 20 mm
- Saída → fluxo mássico

A FIG. 5.91 apresenta o resultado das curvas do traçador virtual monitorado na saída da lagoa nos dois modelos. O TDH real médio e o número de dispersão obtidos foram semelhantes. Para a vazão de  $22\text{m}^3/\text{d}$ , o TDH da lagoa com lodo batimétrico foi de 4,2d, enquanto o TDH obtido para a lagoa com lodo geométrico foi de 4,3d. Os números de dispersão foram 0,13 e 0,12 para a lagoa com lodo batimétrico e geométrico, respectivamente. Os dois modelos também apresentaram resultados semelhantes também quanto a resposta ao fenômeno de recirculação, observado com o segundo pico de traçador nas duas curvas.



**FIGURA 5.91:** Comparação entre as concentrações efluentes do traçador virtual nos modelos da lagoa 1 com lodo geométrico e lodo batimétrico. Vazão na lagoa de 19m<sup>3</sup>/d. Modelo transiente simplificado.

Este resultado é particularmente importante se considerados os casos em que recursos de avaliação em campo para batimetria não estão disponíveis ou demandarão muito tempo (sistemas maiores, por exemplo), ou em casos em que a intenção é estudar diferentes tipos de conformação do lodo e seu impacto na dispersão e no TDH. Para estes últimos casos, a prática da modelagem se torna mais simples, visto que tempo considerável é geralmente gasto na definição da geometria do problema. Entretanto, é importante a tentativa de máxima aproximação possível com a realidade do volume a ser considerado para o lodo e sua conformação de acúmulo, buscando sempre a literatura e relatos de casos semelhantes para auxiliar nessas estimativas. Sabe-se, por exemplo, que há uma tendência do lodo se acumular próximo aos dispositivos de entrada e saída, sendo que nas outras regiões da lagoa a camada geralmente apresenta-se homogênea, com a interface sólido – líquido em cotas pouco variáveis (GONÇALVES, 1999; NELSON *et al.* 2004; ABIS E MARA, 2005; PICOT *et al.*, 2005; ALVARADO *et al.*, 2012; POSSMOSER-NASCIMENTO *et al.* (2014), e que a má divisão do afluente entre duas tubulações de entrada proporciona distribuição desigual do lodo nessa região, com maior parte do lodo se acumulando mais próximo ao dispositivo que recebe maior fração dos esgotos (PASSOS *et al.*, 2014b). Estas informações, associadas aos registros em literatura das taxas de acumulação médias em diversos cenários, podem servir de balizadores na construção da geometria do lodo por meio de formas geométricas mais simples, substituindo com razoável precisão modelos que levem em consideração o padrão de distribuição do lodo a partir de estudos batimétricos.

### 5.3.2.3 Lagoa 2 – Fase 2 (com chicanas longitudinais)

#### a) **Cenário 1 (cenário base)**

Principais características:

- Regime permanente
- Isotérmico
- Sem vento
- Sem empuxo
- Sem lodo
- Fluido considerado como tendo as mesmas características físicas da água
- Modelo de turbulência  $k-\varepsilon$
- Vazão teórica de entrada (40 m<sup>3</sup>/d)

Condições de contorno:

Entrada → velocidade de 0,45 m/s e baixa intensidade de turbulência (1%)

Taludes → parede sem deslizamento (rugosidade suave)

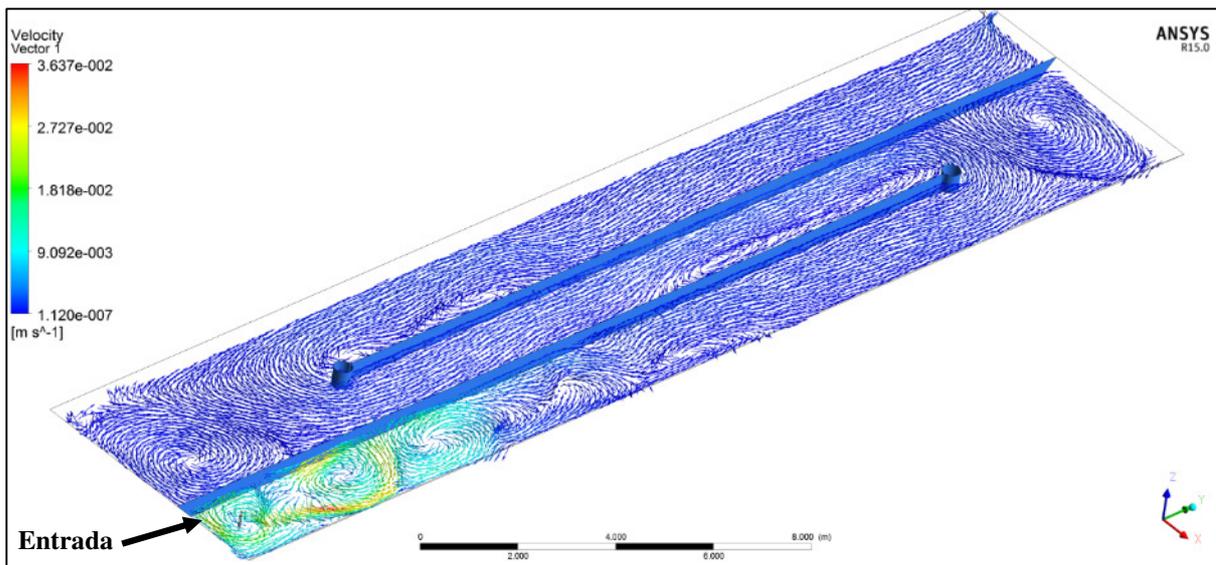
Superfície → parede com deslizamento

Chicanas → parede sem deslizamento (rugosidade suave)

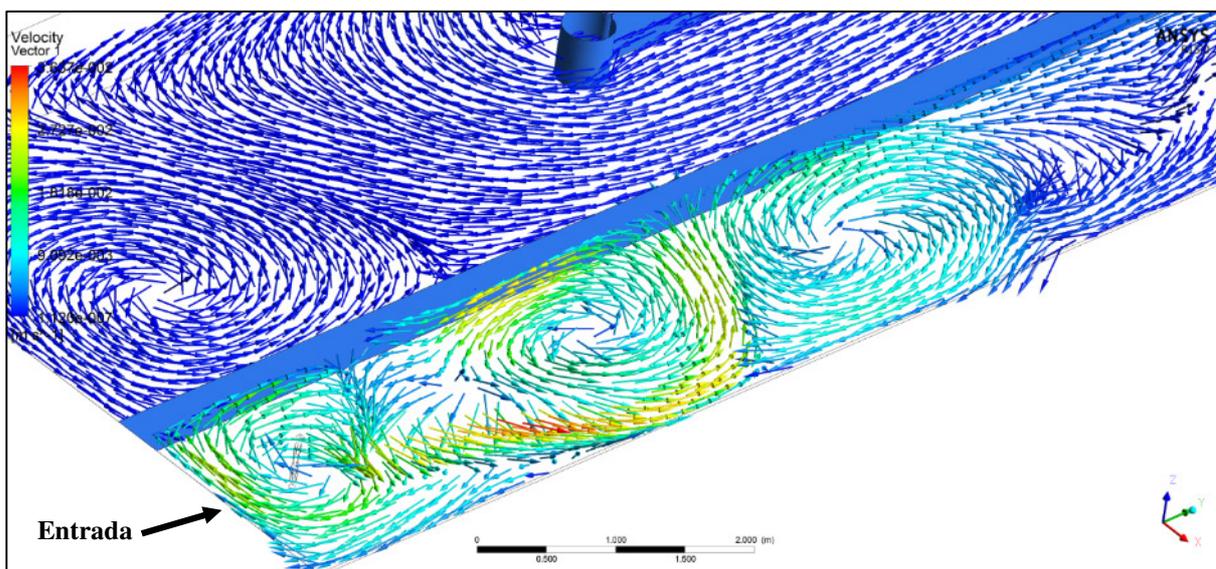
Fundo → parede sem deslizamento (rugosidade suave)

Saída → saída com pressão relativa nula

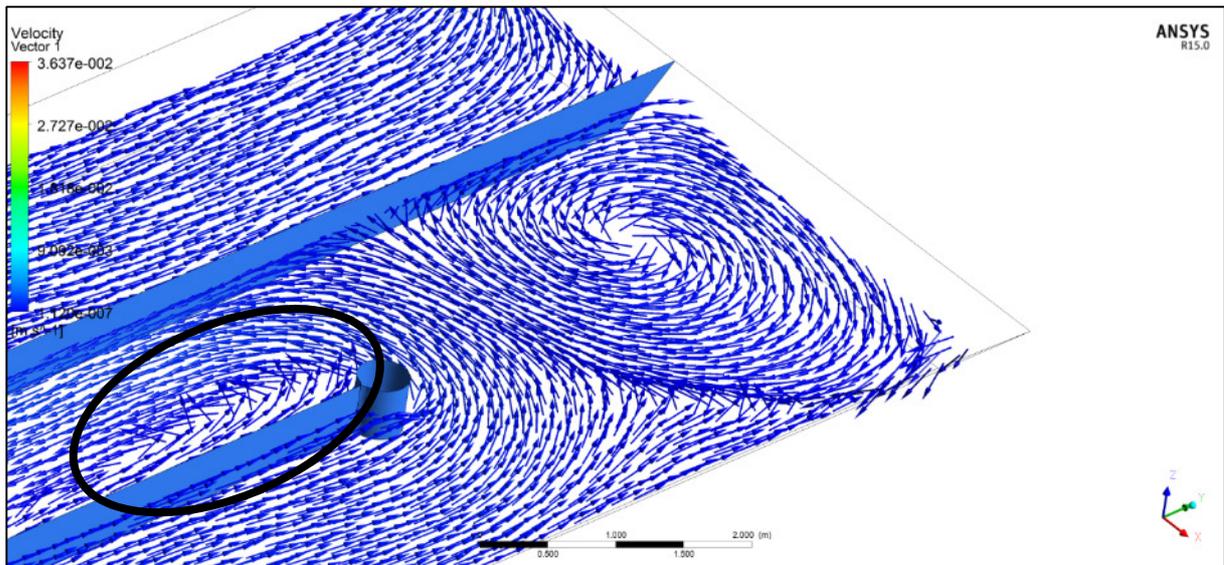
A FIG. 5.92 apresenta a distribuição espacial dos vetores de velocidade no plano XY que corta o meio da lagoa (na metade da profundidade:  $z = 0,22$  m), após 10000 iterações do solver. As velocidades obtidas nesse plano variaram de  $1,1 \times 10^{-7}$  m/s a  $3,6 \times 10^{-2}$  m/s, com maiores valores observados próximo à entrada do afluente, no primeiro canal. Nota-se na figura quatro zonas de recirculação no primeiro canal e mais duas no final de cada chicana, bem como pequenas zonas estagnadas junto à parede das chicanas. Nas FIG. 5.93 e 5.94 a vista nessas áreas é ampliada, para melhor visualização dos fenômenos de recirculação que acontecem nessas regiões. A zona de estagnação junto à parede da chicana está destacada na figura.



**FIGURA 5.92:** Distribuição espacial dos vetores de velocidade no plano XY que corta o meio da lagoa 2 (em  $z = 0,22$  m) – simulação em regime permanente após 10000 iterações do solver.

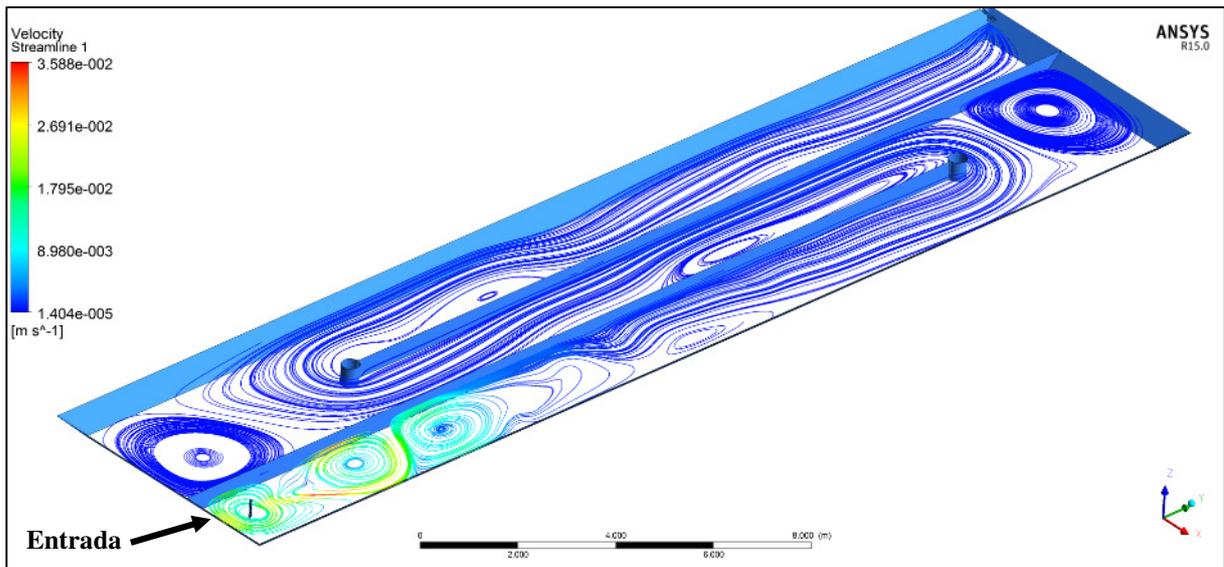


**FIGURA 5.93:** Detalhe da distribuição espacial dos vetores de velocidade no plano XY que corta o meio da lagoa 2 (em  $z = 0,22$  m), na região de entrada do fluido – simulação em regime permanente após 10000 iterações do solver.



**FIGURA 5.94:** Detalhe da distribuição espacial dos vetores de velocidade no plano XY que corta o meio da lagoa 2 (em  $z = 0,22$  m), no final da primeira chicana – simulação em regime permanente após 10000 iterações do solver.

A FIG. 5.95 apresenta linhas de fluxo no mesmo plano, com as cores variando com a magnitude da velocidade, ilustrando mais claramente as observações acima.



**FIGURA 5.95:** Linhas de fluxo no plano XY que corta o meio da lagoa 2 (em  $z = 0,22$  m), com as cores variando com o valor da velocidade – simulação em regime permanente após 10000 iterações do solver.

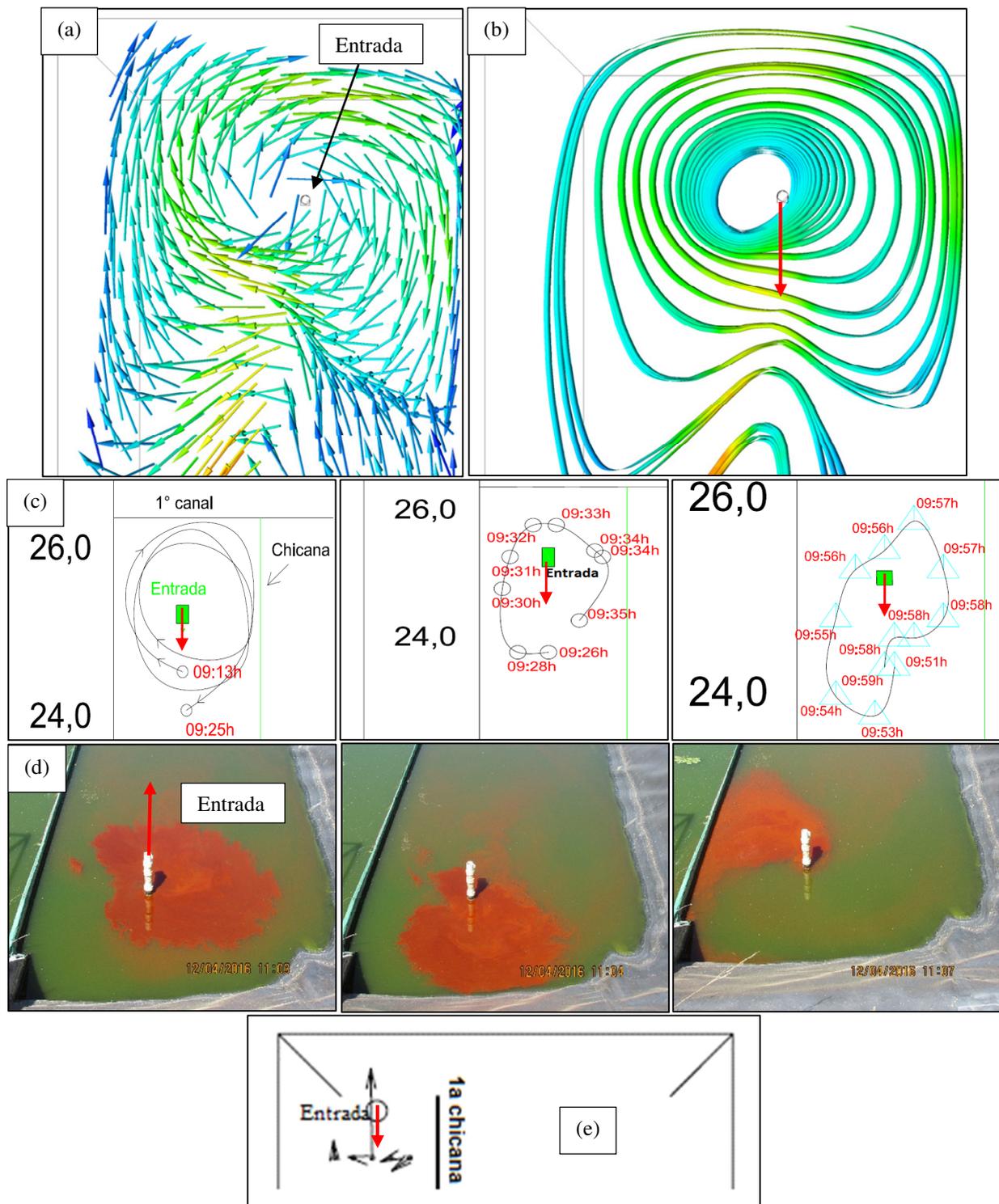
A zona de estagnação destacada na FIG. 5.94 foi confirmada em campo por meio dos testes com corantes. A FIG. 5.96 apresenta um dos registros fotográficos obtidos nos testes com a

uranina. Aparentemente, há realmente o retorno lento de parte do fluxo do segundo canal para o primeiro pela curva interna da chicana, junto ao balde, como obtido no modelo em CFD.



**FIGURA 5.96:** Registro fotográfico de corante fluorescente na curva da primeira chicana da lagoa 2, com destaque para a zona de estagnação visualizada junto à parede da chicana.

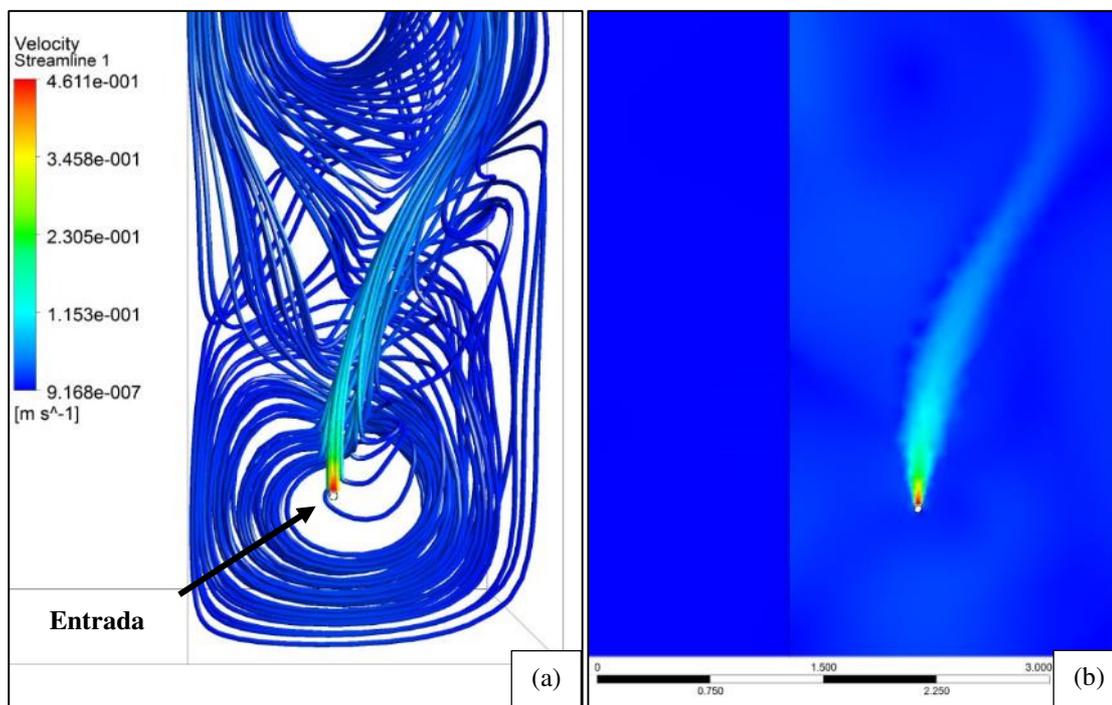
Curioso notar que há uma tendência de recirculação ao redor do dispositivo de entrada, no sentido horário. Conforme já apresentado neste trabalho, os *drogues* lançados nesta área confirmaram esta tendência, apresentando as mesmas trajetórias que foram obtidas via CFD, configurando também como forma de validação do modelo. Os testes com corantes e com o ADV também demonstraram a mesma tendência. Na FIG. 5.97 esses resultados são apresentados lado a lado (vetores de velocidade, linhas de fluxo, trajetória dos *drogues* verticais e movimentação da pluma de corante lançado na entrada da lagoa 2). Na figura, o sentido do jato de entrada está representado por uma seta de cor vermelha.



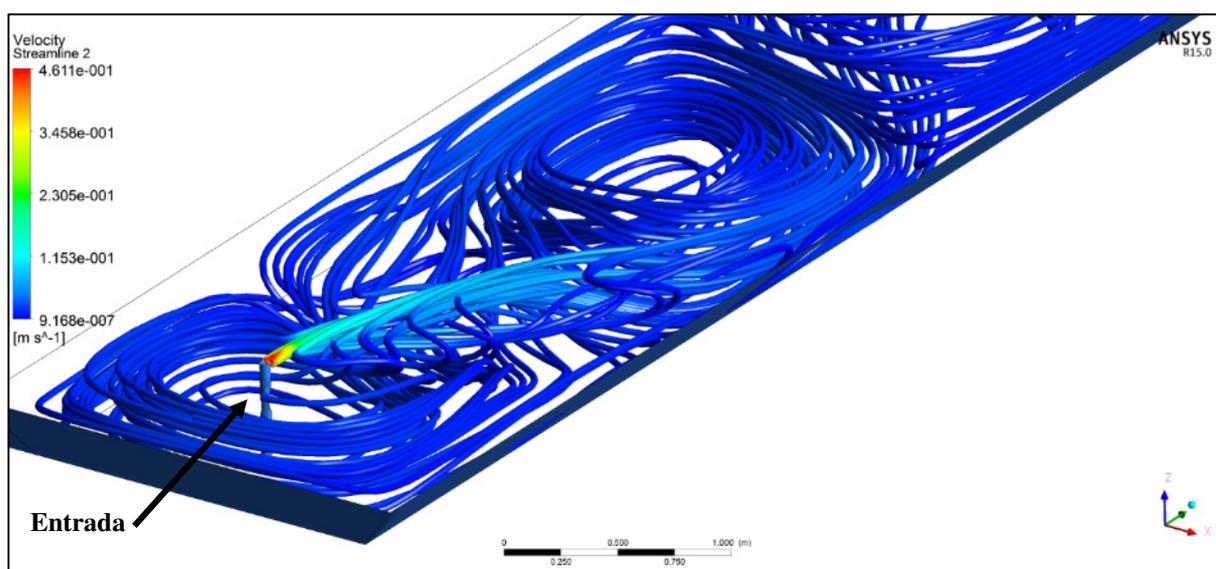
**FIGURA 5.97:** Comparação entre os resultados do fluxo próximo à entrada da lagoa 2 obtidos em CFD com resultados de ensaios de campo no mesmo local: **(a)** vetores de velocidade (CFD); **(b)** linhas de fluxo (CFD); **(c)** trajetória dos *drogues* verticais; **(d)** movimentação da pluma de corante; **(e)** vetores de velocidade em 5 pontos na seção L2S1.

Para fins de visualizar o efeito do jato de entrada, as FIG. 5.98a e 5.98b ilustram, respectivamente, a vista em planta dos trajetos de 25 linhas de fluxo tridimensionais que partem

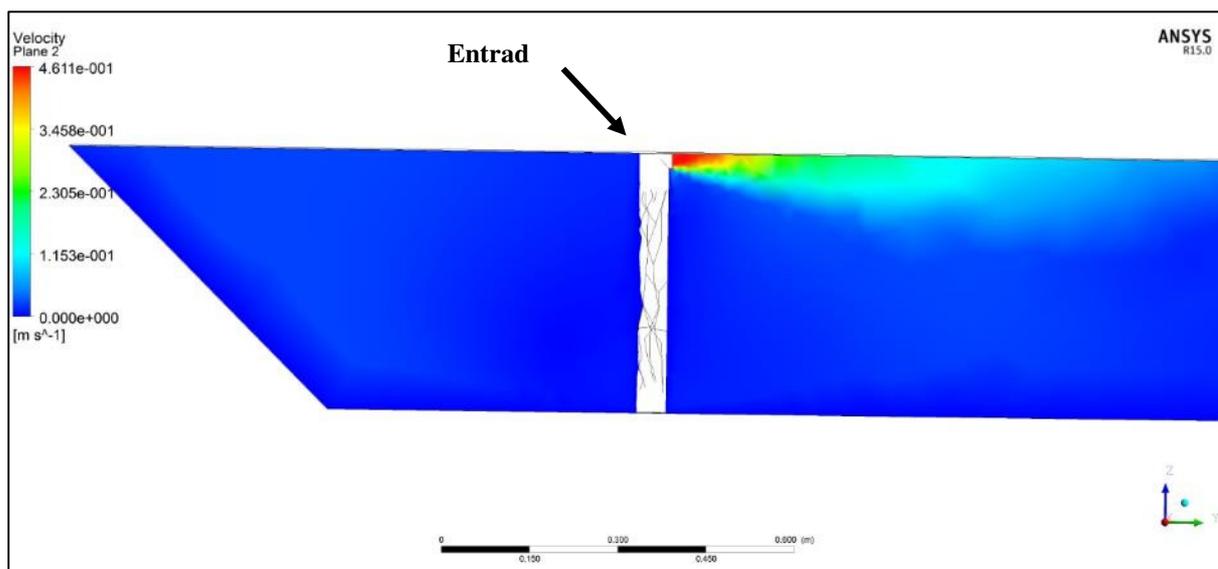
da tubulação de entrada e a variação espacial da magnitude da velocidade no plano XY de mesma altura. Na FIG. 5.99 as linhas de fluxo são apresentadas em perspectiva. Já na FIG. 5.100, a superfície com valores de velocidade é apresentada para o plano transversal que corta a tubulação de entrada no sentido vertical e longitudinal (plano YZ, em  $x = 1,73$  m).



**FIGURA 5.98:** Vista em planta das (a) linhas de fluxo tridimensionais na região de entrada do fluido na lagoa 2 e (b) da variação espacial da magnitude da velocidade, com as cores variando com o valor da velocidade no plano  $z = 0,435$  m – simulação em regime permanente após 10000 iterações do solver.



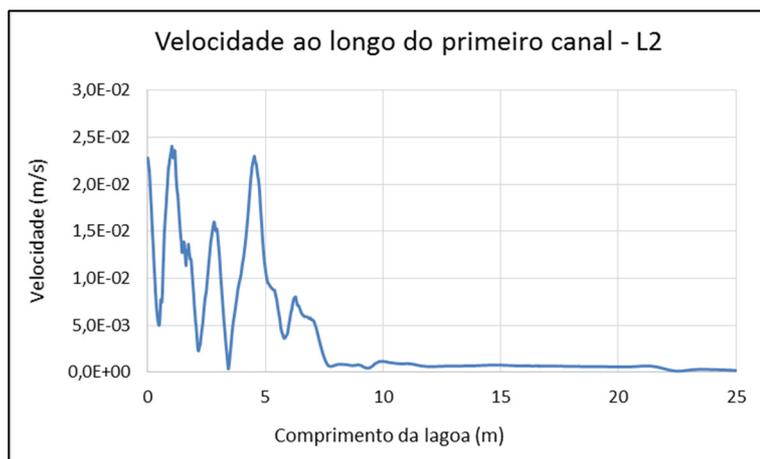
**FIGURA 5.99:** Detalhe em perspectiva das linhas de fluxo tridimensionais na região de entrada do fluido na lagoa 2, com as cores variando com o valor da velocidade – simulação em regime permanente após 10000 iterações do solver.



**FIGURA 5.100:** Vista em corte longitudinal ( $x = 1,73$  m) da variação espacial da magnitude da velocidade na lagoa 2, com as cores variando com o valor da velocidade no plano que corta a tubulação de entrada – simulação em regime permanente após 10000 iterações do solver.

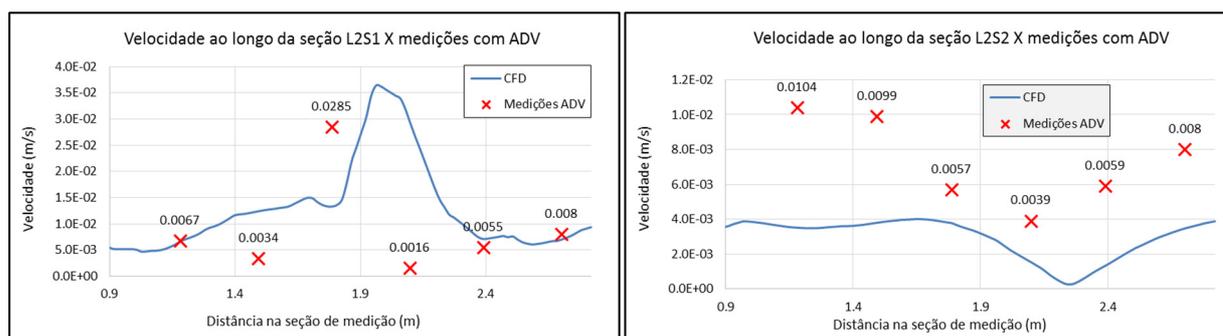
Nota-se nessas figuras que as velocidades obtidas na lagoa para este cenário variaram de 0 a 0,46 m/s, com a maior velocidade da faixa obtida, naturalmente, na saída do dispositivo de entrada na lagoa. Este jato de entrada foi responsável por impulsionar o fluxo adiante na lagoa; não necessariamente em linha reta, como se pode intuir, mas formando zonas de recirculação com dimensões características da mesma ordem de grandeza da largura do canal. Nas figuras podem ser observados mais claramente três vórtices com essas características.

Ao se avaliar o valor da velocidade em uma linha reta ao longo do comprimento do primeiro canal, na metade da profundidade da lagoa ( $z = 0,22$  m), pode-se inferir que o efeito do jato de entrada na lagoa é mais pronunciadamente sentido até os primeiros 8 a 10 metros ao longo do seu comprimento (FIG. 5.101), após os quais o fluxo passa a se mover em velocidade constante e de menor magnitude (da ordem de  $10^{-4}$  m/s).



**FIGURA 5.101:** Velocidade em uma linha reta ao longo do comprimento do primeiro canal, na metade da profundidade da lagoa 2 – fase 2 ( $z = 0,22$  m).

A FIG. 5.102 apresenta comparação entre o perfil transversal do módulo da velocidade ao longo das seções L2S1 e L2S2 (locais de maior variação das velocidades) obtidas no modelo em CFD com o perfil obtido com as medições com o ADV em seis pontos. Nota-se tendências bastante similares entre o modelo em CFD e os dados obtidos em campo, mesmo neste cenário de simulação mais básico. Na seção L2S1 houve muita proximidade entre os picos de velocidade obtidos no meio do canal e estimativas próximas nos demais pontos. Na seção L2S1, observa-se uma mesma tendência dos perfis de velocidade, entretanto, apresentando maiores valores nas medições com o ADV em todos os pontos, provavelmente ocasionados pelas interferências no fluxo ocasionadas pelo próprio manuseio do equipamento.



**FIGURA 5.102:** Velocidade aferida nas seções L2S1 *versus* medições com o ADV.

**b) Cenário 2 (MODELO UNIFICADO: balanço térmico, vento, condições dinâmicas)**

- Regime transiente

- Condições iniciais obtidas a partir do modelo estacionário (melhoria da convergência)
- Duração total (tempo físico) = 240 h
- Passo de tempo = 10 min
- Com transferência de calor (temperatura inicial estimada do fluido no domínio da simulação de 21°C → média da temperatura à 00:00h pela estação meteorológica)
- Tensão de cisalhamento provocada pela atuação direta do vento
- Considerando modelo de empuxo (temperatura de referência = 25°C → temperatura para a massa específica definida para o fluido)
- Fluido com aproximações das características da água residuária já na lagoa
- Modelo de turbulência *SST*

Condições de contorno:

- Entrada → fluxo mássico correspondente a uma vazão teórica de 40 m<sup>3</sup>/d
- Taludes → parede sem deslizamento (rugosidade suave), com coeficiente de transferência de calor conforme definido por Karteris *et al.* (2005), igual a 3 W/m<sup>2</sup>.K
- Superfície → parede com deslizamento; transferência de calor na interface definida de acordo pelo coeficiente de transferência de calor  $h_{ar-liq}$  (em W/m<sup>2</sup>.K) para lagoas de estabilização, definido por Fritz *et al.* (1980) e Sweeney *et al.* (2005), dependente da velocidade do vento (independentemente da sua direção), que, por sua vez, varia ciclicamente de acordo com o ajuste estatístico da função seno aos dados registrados na estação meteorológica ( $r = 0,92$ ):

$$h_{ar-liq} = 1,569 \cdot U_{vento} \quad (5.23)$$

$$U_{vento} = 2,93 + 1,90 \cdot \text{sen}(7,272 \times 10^{-5} \cdot t - 1,571) \quad (5.24)$$

e temperatura externa (do ar,  $T_{ar}$ , em K) variando ciclicamente de acordo com o ajuste estatístico da função seno aos dados registrados na estação meteorológica ( $r = 0,97$ ):

$$T_{ar} = 296,63 + 3,9 \cdot \text{sen}(7,272 \times 10^{-5} \cdot t - 2,086) \quad (5.25)$$

Radiação solar (irradiação) como termo fonte de energia na superfície variando em ciclo diário de acordo com o ajuste estatístico da função seno aos dados registrados na estação meteorológica ( $r = 0,96$ ), associada a uma função *step*:

$$I = \text{step}[\text{sen}(7,272 \times 10^{-5} \cdot t - 1,482)] \cdot 700 \cdot \text{sen}(7,272 \times 10^{-5} \cdot t - 1,482) \quad (5.26)$$

A reflexão da radiação solar pelo albedo foi considerada como sendo de 5%, um valor aproximado a partir de analogias com corpos d'água semelhantes em condições climáticas semelhantes às do presente estudo (MEIRELLES, 2007; NICÁCIO, 2008; OLIVEIRA *et al.*, 2013).

Perdas de calor por evaporação na superfície das lagoas definidas a partir do método de Fritz *et al.*, (1980) e dados de monitoramento em campo, por:

$$Evap = 1,74 \cdot U_{\text{vento}} \quad (5.27)$$

Os efeitos da atenuação dos raios solares pela biomassa foram considerados a partir da redução na intensidade luminosa e da variação no transporte de calor ao longo da profundidade, tomando-se por base a concentração média de sólidos em suspensão obtida no monitoramento em campo (67 mg/L na lagoa 1):

$$I = I_{\text{sup}} \cdot e^{-2,33 \cdot z} \quad (5.28)$$

Vetor médio de tensão de cisalhamento de módulo variando de acordo com a Equação 5.24 e sentido -X da lagoa na simulação. Valor da constante empírica  $C_d = 10^{-4}$ ; menor valor da faixa registrada em literatura

$$\bar{\tau}_{[W]} = -1,225 \times 10^{-4} U_{\text{vento}[W]}^2 \quad (5.29)$$

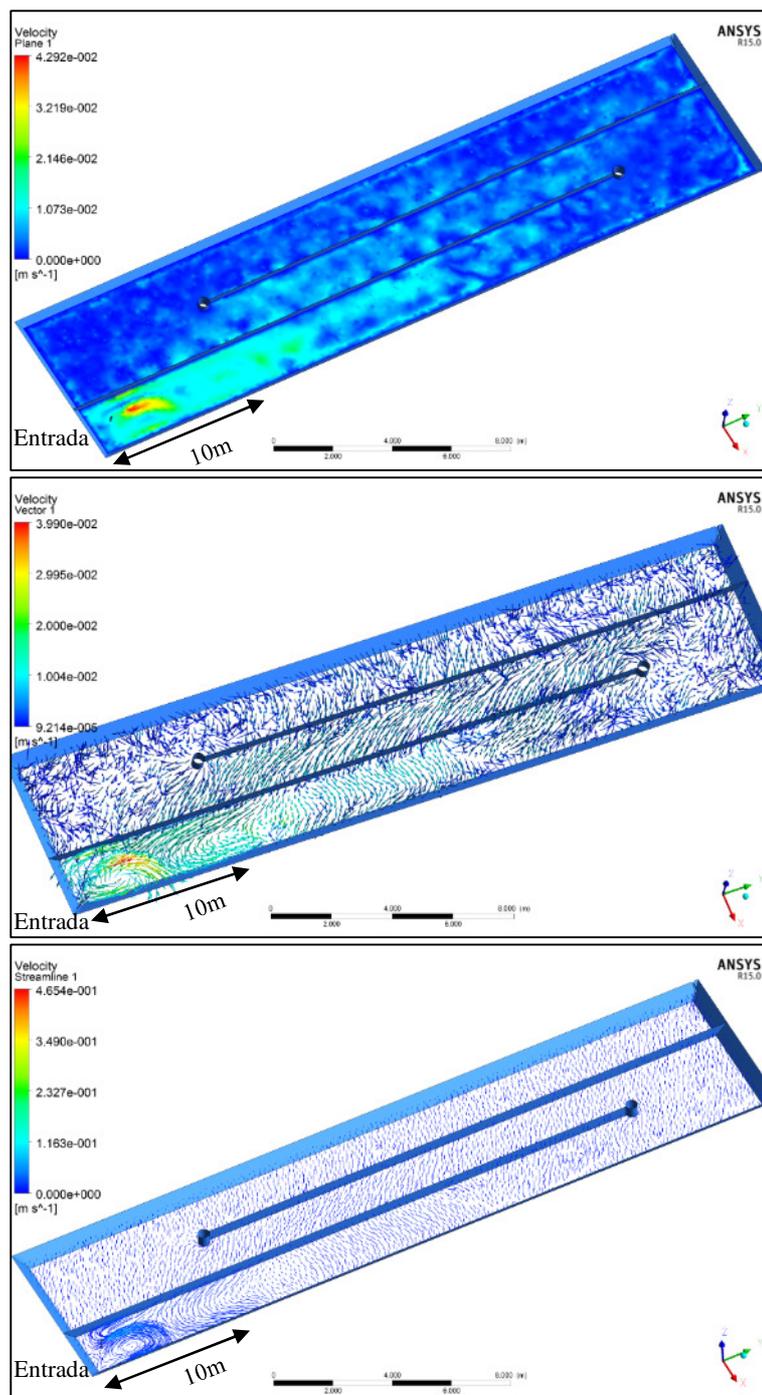
- Fundo → parede sem deslizamento, com rugosidade definida para o lodo de 20 mm. Coeficiente de transferência de calor semelhante aos taludes, no valor de 3 W/m<sup>2</sup>.K, já que a fina camada de lodo acumulada na lagoa 2 chicaneada não desempenharia o mesmo papel na transferência térmica como na lagoa 1.

- Saída → fluxo mássico

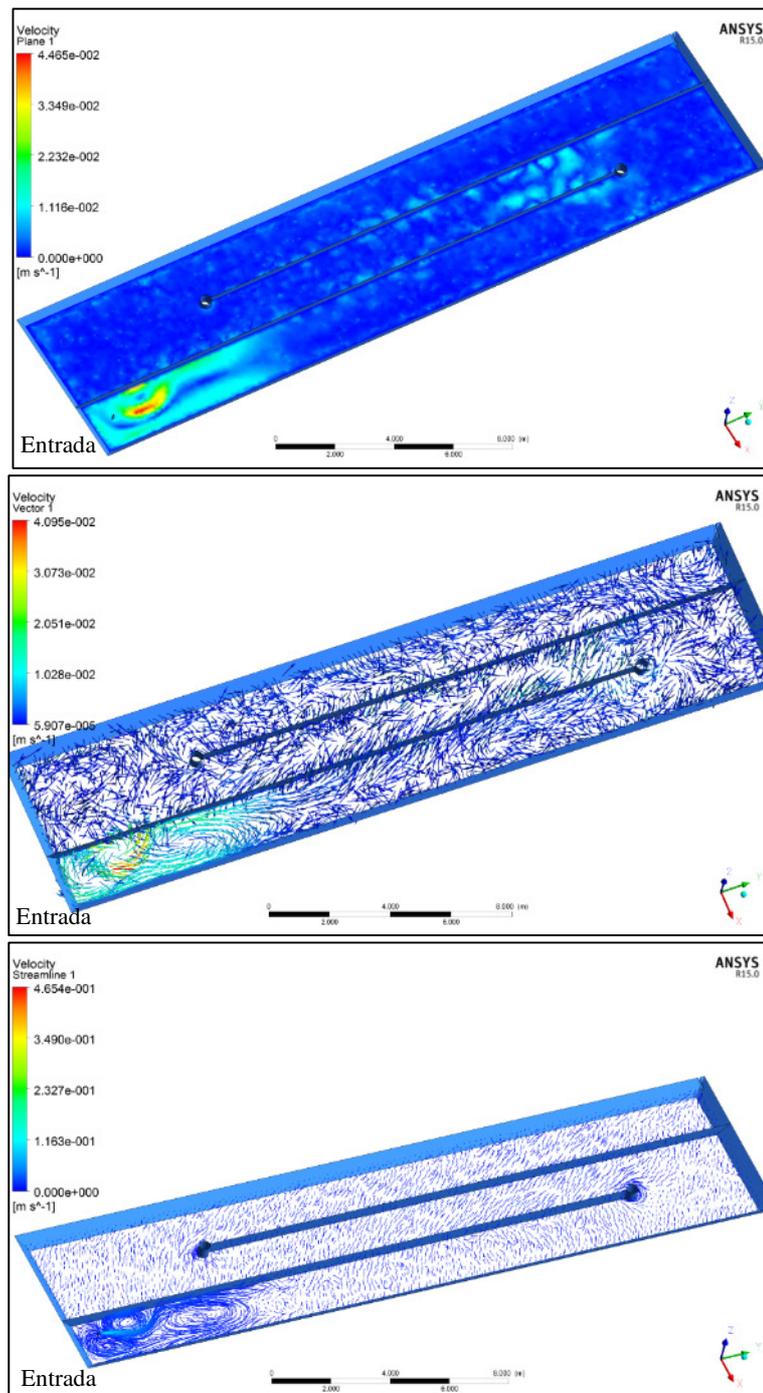
Resumo (valores médios) dos resultados da simulação:

- Número de Courant = 19
- Número de Reynolds =  $3,13 \times 10^4$

De forma geral, os resultados do modelo unificado na lagoa 2 sugeriram mistura nos três canais formados pelas chicanas, com a influência do jato de entrada ditando predominantemente o fluxo por meio da indução de células de recirculação em até 10m da entrada, tal como sugerido também no cenário base. Este comportamento pode ser observado tanto em horários de maior atuação do vento (ex.: 12:00h) quanto em horários de calmaria (Ex.: 00:00h). Distinção pode ser observada com relação aos vetores de velocidade nas demais porções da lagoa, passados os primeiros metros da entrada, para os quais se observa que o vento fornece tensão superficial suficiente para ditar o comportamento dos vetores de velocidade na superfície da lagoa nos horários em que sua velocidade é maior (é possível observar um padrão). As FIG. 5.103 e 5.104 apresentam superfície de contorno com módulo da velocidade, vetores e linhas de fluxo em um plano XY longitudinal no meio da lagoa ( $Z=0,22$  m) às 12:00h de um dia (FIG. 5.103) e às 00:00h (FIG. 5.104).



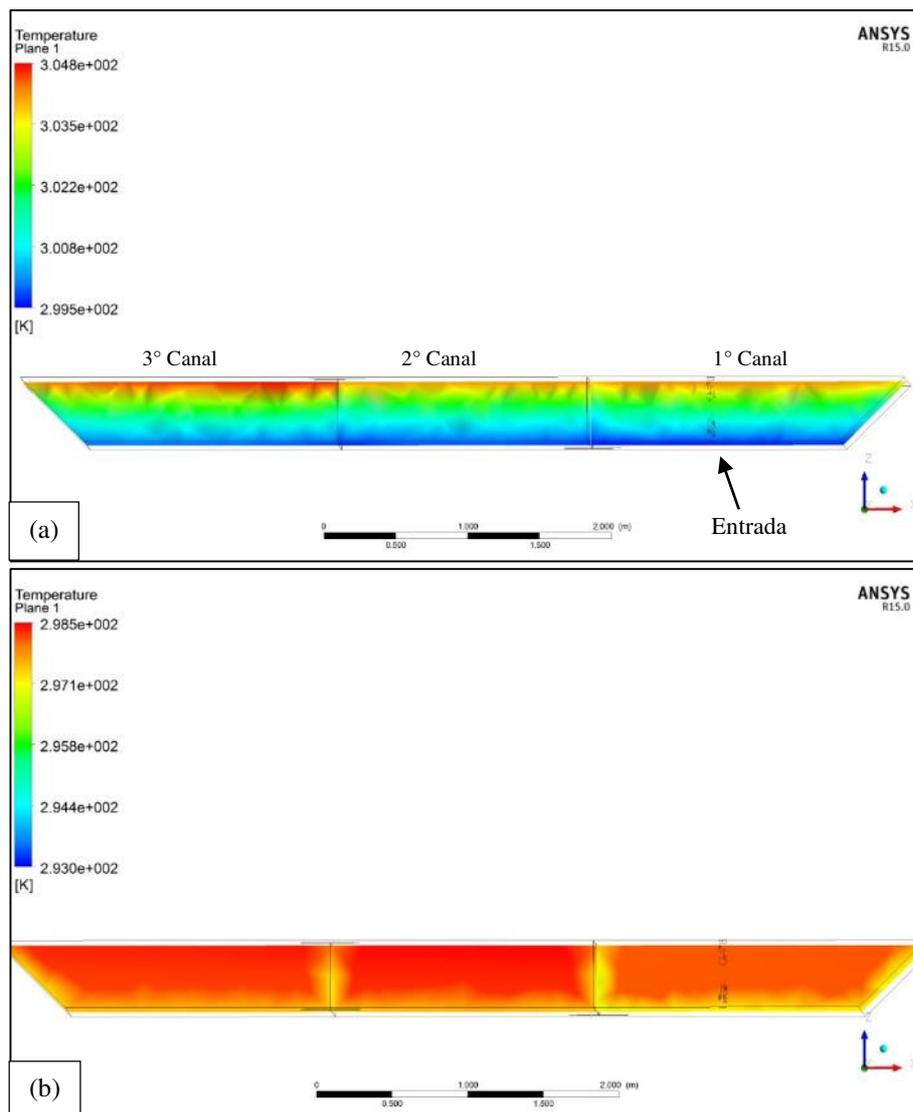
**FIGURA 5.103:** Superfície de contorno com módulo da velocidade, vetores e linhas de fluxo em um plano XY longitudinal no meio da lagoa 2 ( $Z=0,22$  m) às 12:00h de um dia. Modelo transiente unificado.



**FIGURA 5.104:** Superfície de contorno com módulo da velocidade, vetores e linhas de fluxo em um plano XY longitudinal no meio da lagoa 2 ( $Z=0,22$  m) às 00:00h de um dia. Modelo transiente unificado.

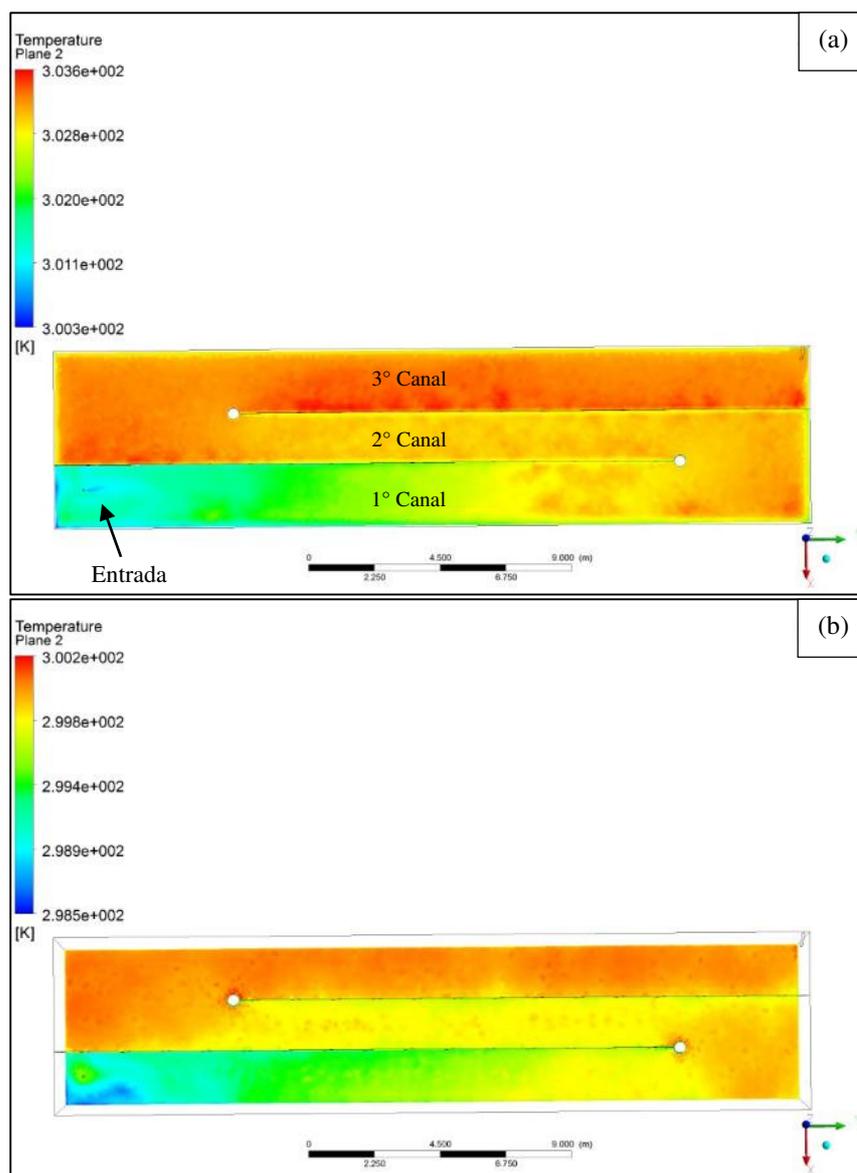
Os mesmos ciclos de estratificação térmica seguida de desestratificação observados nos modelos já apresentados foram obtidos neste modelo. A FIG. 5.105 apresenta superfícies de contorno variando com os valores da temperatura em um plano transversal na metade do comprimento da lagoa (plano XZ;  $Y = 12$  m), em período de maior estratificação térmica obtido na simulação (FIG. 5.105a; ilustrando o perfil térmico às 15:00h) e em um momento da mistura

vertical (FIG. 5.105b; ilustrando o perfil térmico às 05:00h). As cores na legenda variam com a temperatura (em Kelvin), sendo a cor vermelha representativa da maior temperatura e a cor azul da menor. Nota-se no período de maior estratificação térmica (FIG. 5.105a) uma diferença de temperatura entre a superfície e o fundo de cerca de 5°C e no momento da mistura uma equalização da temperatura ao longo do perfil vertical, que se situou na faixa dos 25°C (298K). Tanto as variações de temperatura quanto os momentos de estratificação e mistura vertical do modelo em CFD corresponderam bem às condições gerais de perfil vertical obtidas em campo também na lagoa 2.



**FIGURA 5.105:** Perfis verticais da temperatura em plano transversal na lagoa 2 chicaneada (plano XZ; Y = 12m) obtidos via modelo em CFD **(a)** às 15:00h; correspondendo ao momento de maior gradiente térmico e **(b)** às 05:00h; correspondendo a um momento com temperatura equalizada (lagoa desestratificada). Modelo transiente unificado.

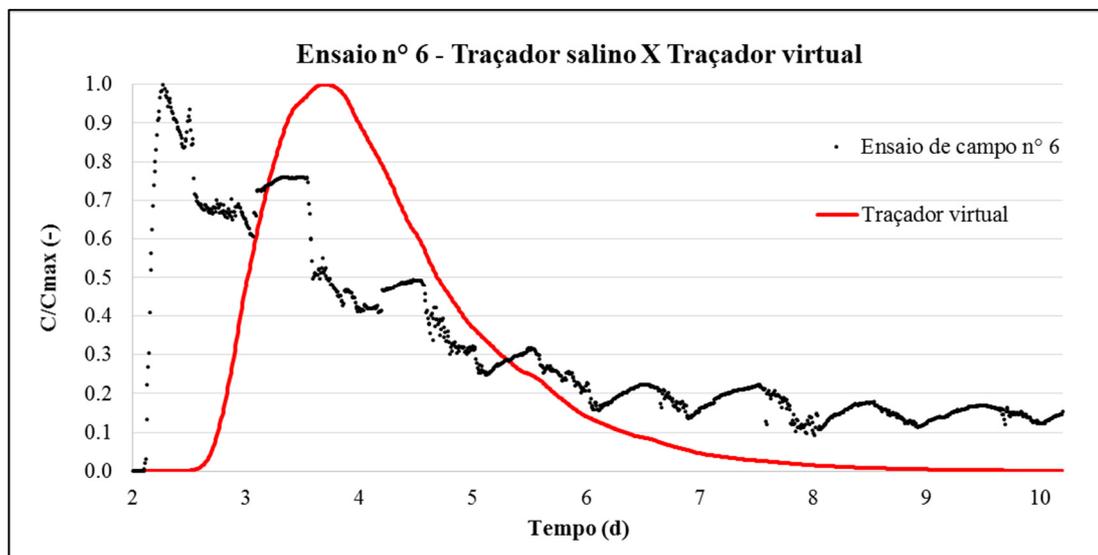
Considerando que toda a lagoa estava submetida às mesmas condições ambientais durante todo o tempo, nota-se pelo perfil vertical nos 3 canais que há uma tendência de aumento do gradiente de temperatura à medida em que o fluido avança na lagoa no sentido da saída. Logo, no terceiro canal, a diferença de temperatura entre a superfície e o fundo é maior que a encontrada no primeiro canal, o que não acontece na lagoa 1 (maior tendência a ser isotérmico ao longo do plano horizontal), parte devido a influência da temperatura do jato de entrada e parte pelo maior tempo de residência no fluido na medida em que percorre a lagoa, sofrendo assim maior influência da radiação solar e da troca de calor com o ar ambiente. Entretanto, esta diferença não é tão significativa. Apesar da pouca diferença, os resultados sugerem que uma lagoa pode não se comportar estritamente como isotérmica ao longo do comprimento e largura, tal como sugerido por Ukpong *et al.* (2006a), de forma que as diferenças podem ser significativas em lagoas maiores. A FIG. 5.106 ilustra esse comportamento por meio de registros da variação da temperatura no modelo ao longo de planos horizontais XY (a) na superfície ( $Z = 0,4$  m) e (b) no fundo ( $Z = 0,05$  m) da lagoa para o mesmo horário de estratificação térmica da FIG. 5.105a (15:00h).



**FIGURA 5.106:** Temperatura em planos horizontais longitudinais na lagoa 2 chicaneada (plano XY) obtidas via modelo em CFD para as 15:00h; correspondendo ao momento de maior gradiente térmico, sendo **(a)** na superfície da lagoa ( $Z = 0,4\text{m}$ ) e **(b)** no fundo da lagoa ( $Z = 0,05\text{m}$ ).

A comparação dos resultados do traçador virtual no modelo em CFD e os ensaios de campo com traçador salino revelaram a maior antecipação do pico no traçador real que no traçador virtual (quase 2 dias antes), o que pode ter ocorrido devido à já discutida hipótese de curto-circuito entre os canais na lagoa real (ausente na lagoa modelada). Apesar de tal diferença, o formato geral das duas curvas é semelhante. A FIG. 5.107 apresenta comparação entre as curvas do teste de campo do dia 09/08/14 (ensaio nº 6) e a curva do traçador virtual. Para fins de facilitar a comparação, as curvas foram normalizadas a partir da concentração de pico em cada caso, de forma que as concentrações relativas variam de 0 a 1. O teste com traçador virtual

foi modelado com as mesmas condições de contorno do ensaio de campo e definido com propriedades ideais e idênticas ao do fluido.



**FIGURA 5.107:** Comparação entre as concentrações efluentes do traçador salino no ensaio de campo de n° 6 e as concentrações efluentes do traçador virtual no modelo em CFD. Modelo unificado.

#### 5.3.2.4 Lagoa 2 – Fase 2 - Temperatura de entrada variável

Na medida em que a lagoa 2, durante a fase 2, recebe efluente da lagoa 1 após tomada d'água em sua superfície, é razoável considerar que a temperatura do jato de entrada na lagoa 2 varia com a temperatura da superfície da lagoa 1. Assim, a temperatura do jato de entrada não seria constante tal como nos modelos anteriores, o que poderia alterar o comportamento hidrodinâmico da lagoa. Esta reflexão é particularmente importante quando se deseja saber se há diferença quanto a esse aspecto entre uma lagoa que recebe efluente de outra lagoa anterior da série e uma lagoa que recebe efluente bruto ou de um UASB, por exemplo (menor variação na temperatura de entrada nestes últimos casos).

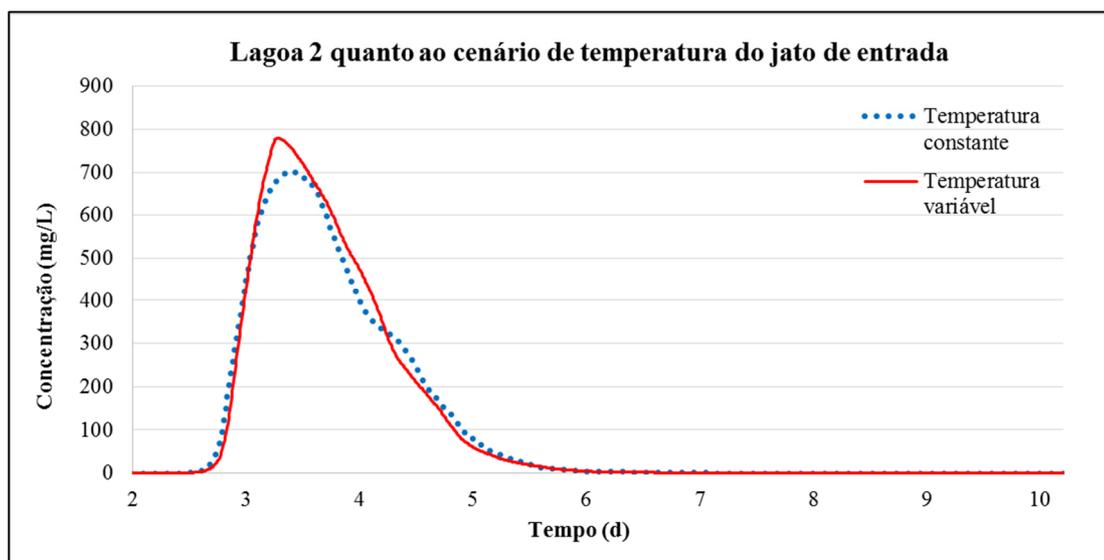
Uma avaliação global foi realizada neste trabalho, por meio da comparação da curva de saída do traçador virtual em ambas as situações na lagoa chicaneada: uma com a temperatura de entrada constante e outra com a temperatura de entrada variando de acordo com a temperatura monitorada na superfície da lagoa 1, próximo à saída.

Portanto, tem-se para este cenário as mesmas definições de modelagem do modelo unificado, exceto pela condição de contorno de entrada na lagoa, definido como segue:

- Entrada → fluxo mássico correspondente a uma vazão teórica de 40 m<sup>3</sup>/d e temperatura do jato de entrada variando ciclicamente de acordo com a temperatura na superfície da lagoa 1, visto que a tomada d'água da lagoa 1 para a lagoa 2 era superficial. O ajuste estatístico da função seno aos dados registrados de temperatura na superfície da lagoa apresentou R<sup>2</sup> = 0,97:

$$T_{entrada} = 300 + 2sen(7,272 \times 10^{-5} \cdot t - 3,132) \quad (5.30)$$

A FIG. 5.108 apresenta as duas curvas plotadas em conjunto, sendo a linha contínua referente ao modelo com temperatura de entrada variável e a linha pontilhada o modelo de temperatura constante. Nota-se pequena diferença entre a resposta dos dois modelos, restrita à concentração de pico do traçador virtual, sugerindo a viabilidade da simplificação, caso não seja possível atribuir temperaturas variáveis como condição de contorno de entrada ou na indisponibilidade de dados.



**FIGURA 5.108:** Comparação entre as concentrações efluente do traçador virtual na lagoa 2 nos casos de temperatura do jato de entrada constante e variável (de acordo com a temperatura da superfície da lagoa 1). Modelo unificado.

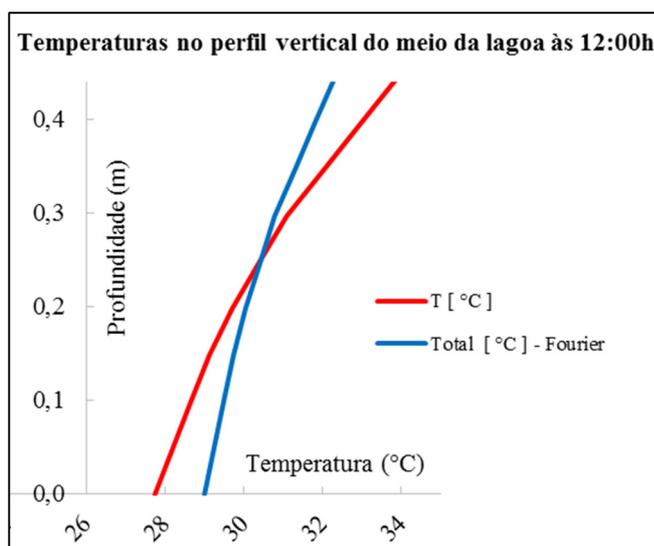
#### 5.3.2.5 Modelo de Fourier para radiação solar

Tratou-se neste cenário o comportamento da radiação solar (irradiação) como uma “meia onda” senoidal, que foi modelada a partir de uma série de Fourier. Após manipulação matemática e cálculo dos coeficientes, obteve-se a série de Fourier para a radiação solar (irradiação “I”), para as condições médias nas lagoas, sob mesmas condições de contorno do modelo dos

cenários anteriores. Após análise de erros e sensibilidades, a Equação 4.87 (item 4.5.5) foi truncada nos seus dois primeiros termos.

A fim de avaliar os resultados do cenário com aplicação da expressão acima, as mesmas condições de contorno do cenário unificado da lagoa 2 – fase 2 foram preservadas e somente a equação que modelava o fornecimento de calor pela radiação solar foi substituída neste novo cenário. Os resultados dos dois cenários foram semelhantes em termos dos ciclos da radiação solar, entretanto, acredita-se que ainda não foi obtido o melhor ajuste da série de Fourier para este modelo. Como exemplo, a FIG. 5.109 apresenta a comparação entre os perfis verticais de temperatura no meio da lagoa durante momento de estratificação (12:00h). Nota-se uma menor inclinação na curva obtida no modelo com a equação de meia onda (menor gradiente térmico), mas com diferenças máximas de menos de 2°C, e provavelmente ocasionadas pelo valor de “D” escolhido para ajuste da equação, o que pode ser melhor refinado. Por oportuno, cabe registrar o perfil aproximadamente linear das curvas, semelhante ao obtido em campo.

Avanços nos ajustes da equação derivada a partir da série de Fourier serão ainda empreendidos, a fim de se chegar ao melhor modelo. Após tal, espera-se que a proposta possa ser aproveitada na modelagem de lagoas ou no seu balanço térmico, sem a necessidade de subprogramações ou inclusão funções complementares que podem não estar disponíveis em softwares de modelagem.



**FIGURA 5.109:** Comparação entre os perfis verticais de temperatura no meio da lagoa durante momento de estratificação (12:00h). Modelo unificado com senoíde e função step X Modelo unificado com equação adaptada da série de Fourier.

### 5.3.2.6 Influência do lodo na hidrodinâmica

A fim de avaliar a influência do lodo na hidrodinâmica da lagoa, simulações foram feitas para comparação de um mesmo modelo em CFD para as lagoas 1 e 2 durante a fase 1, em que a lagoa 2 operava sem chicanas e com profundidade e condições de entrada e saída semelhantes à lagoa 1 (esta com lodo acumulado), sendo as duas em paralelo. Os dois cenários foram avaliados por meio da injeção do traçador virtual em condições transientes de um modelo simplificado (sem transferência de calor, propriedades constantes do fluido e sem consideração do vento atuando na superfície), com as lagoas submetidas às mesmas condições de contorno. A intenção foi de isolar unicamente o efeito do lodo acumulado na lagoa 1 (diferença predominante entre as duas unidades), aferido pela curva de traçador na saída. Portanto, tem-se, para os dois cenários, a seguinte definição de modelagem:

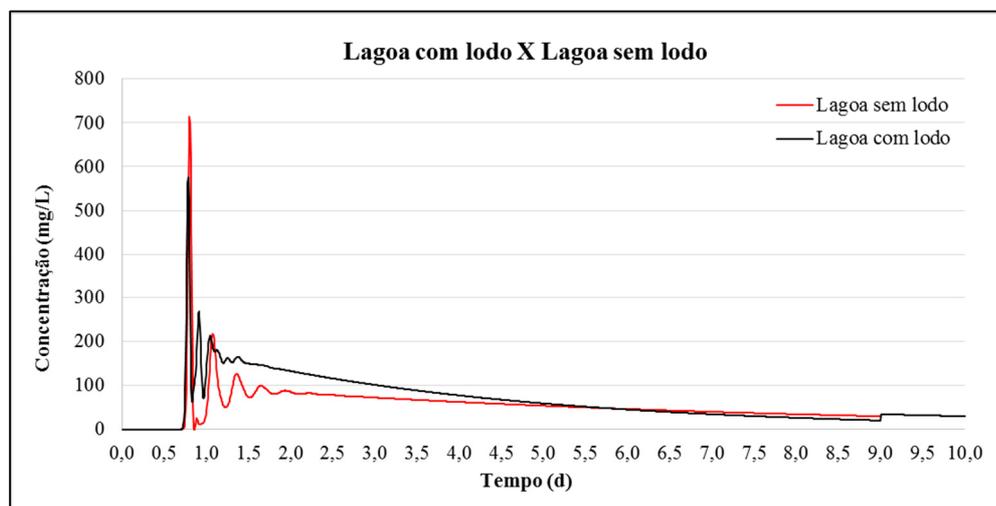
- Regime transiente
- Condições iniciais obtidas a partir do modelo estacionário (melhoria da convergência)
- Duração total (tempo físico) = 240 h
- Passo de tempo = 10 min
- Isotérmico
- Sem atuação do vento
- Modelo de turbulência  $k-\epsilon$
- Injeção de pulso de traçador com  $221 \text{ kg/m}^3$  e difusividade cinemática de  $10^{-5} \text{ m}^2/\text{d}$  após 24h do início do escoamento (após a simulação atingir condições estáveis)

Condições de contorno:

- Entrada → fluxo mássico correspondente a uma vazão de  $19 \text{ m}^3/\text{d}$
- Taludes → parede sem deslizamento (rugosidade suave)
- Superfície → parede com deslizamento
- Fundo → parede sem deslizamento, com rugosidade definida para o lodo de 20 mm.
- Saída → fluxo mássico

A FIG. 5.110 apresenta o resultado das curvas do traçador virtual monitorado na saída das duas lagoas no modelo. O TDH real médio e o número de dispersão obtidos para as lagoas foram, respectivamente,  $\text{TDH} = 3,7\text{d}$  e  $d = 0,31$  para a lagoa com lodo e  $\text{TDH} = 4,3\text{d}$  e  $d = 0,25$  para a

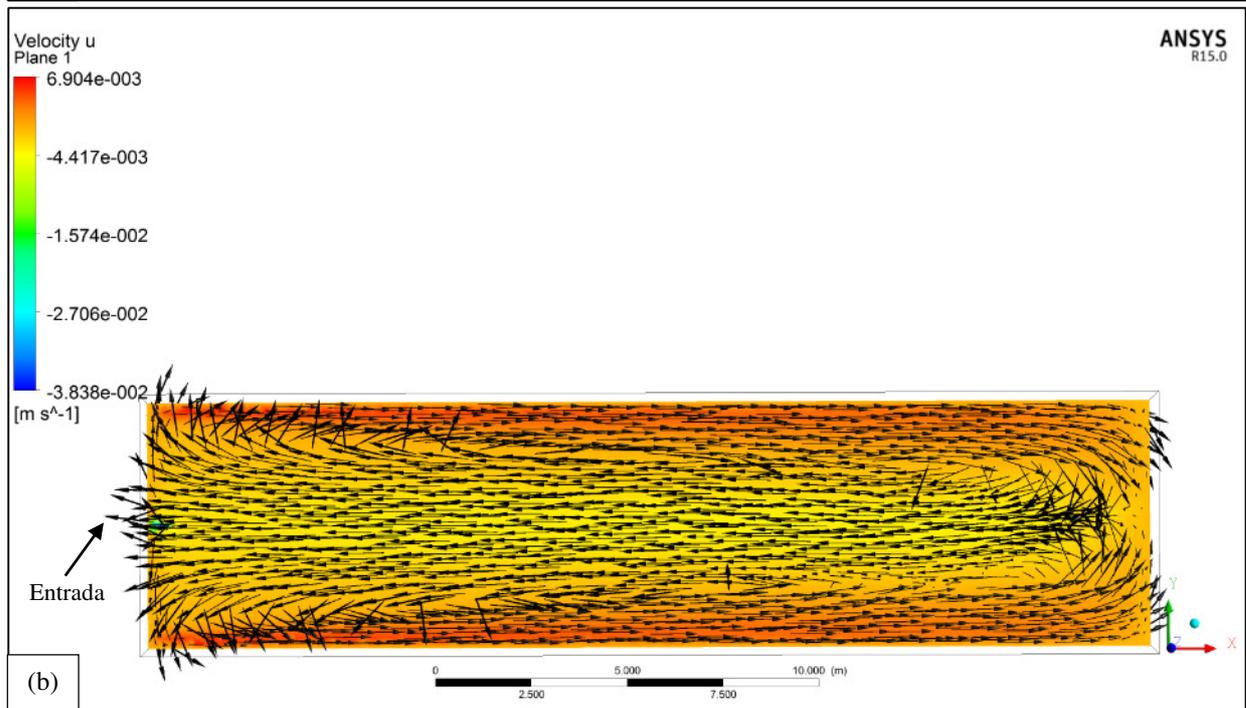
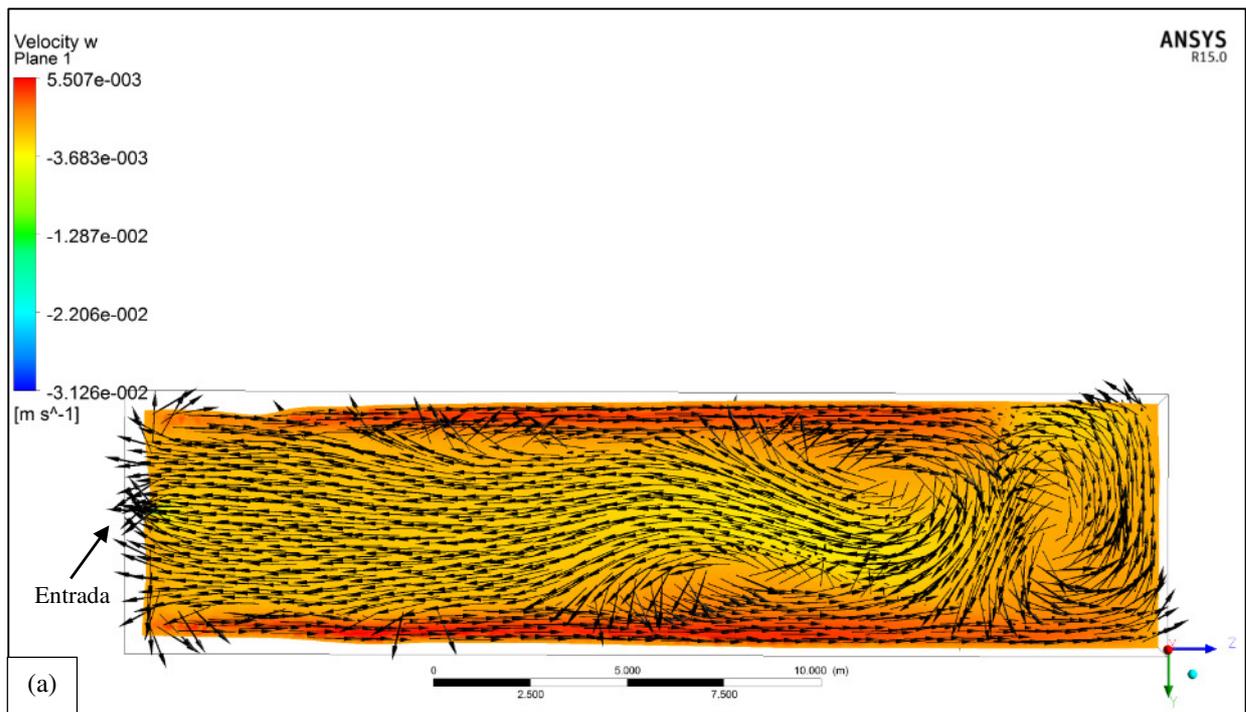
lagoa sem lodo. As duas lagoas apresentaram resultados semelhantes quanto ao número equivalente de tanques em série ( $n = 2$  para ambas as lagoas, de acordo com o método para dispersão de grande intensidade de Levenspiel (2000)), quanto ao tempo da chegada do pico principal do traçador após a injeção do pulso (em 1130 e 1150 min nas lagoas 1 e 2, respectivamente), e também quanto a resposta ao fenômeno de recirculação interna, observado com os picos secundários responsáveis por oscilações após o pico principal nas duas curvas. As principais diferenças podem ser vistas quanto a concentração do traçador no pico principal (maior concentração na lagoa sem lodo), bem como na quantidade de recirculações secundárias, que parece ser menor na lagoa com lodo, com mais rápida homogeneização do fluxo que na lagoa 2 e início mais rápido do fenômeno de cauda da curva de traçador. Tais comportamentos na curva indicam maior dispersão e tendência de mistura na lagoa com lodo.



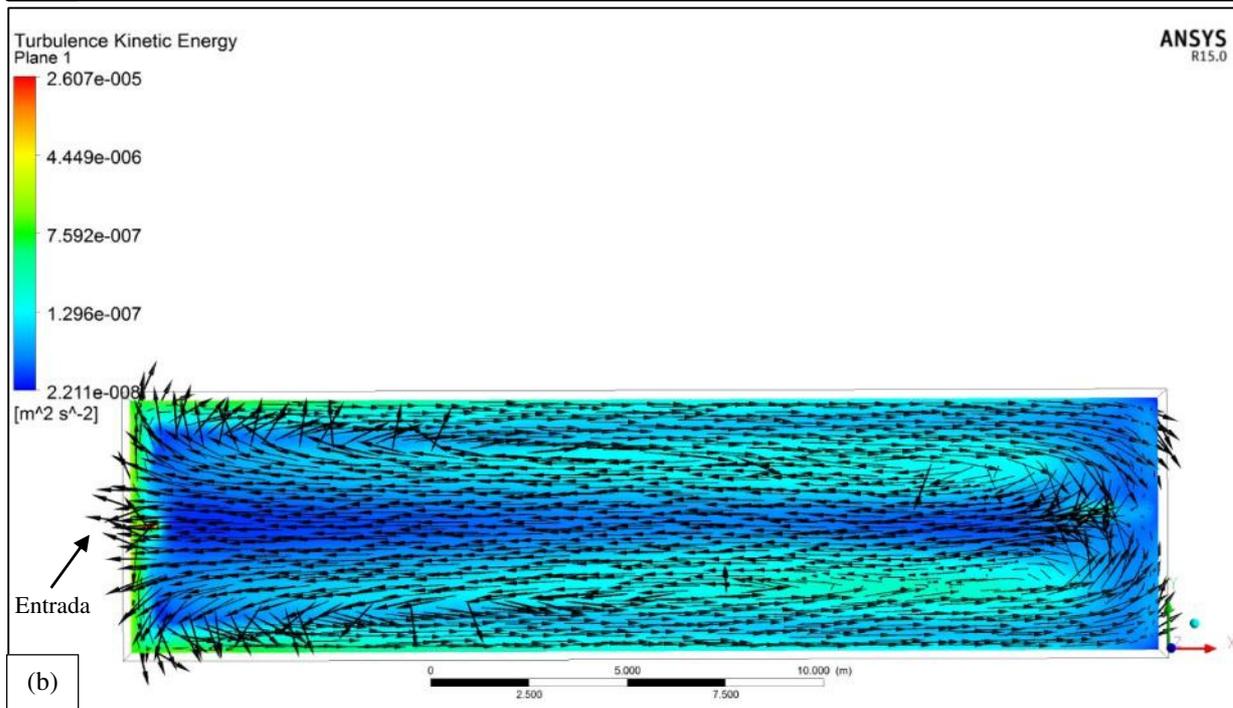
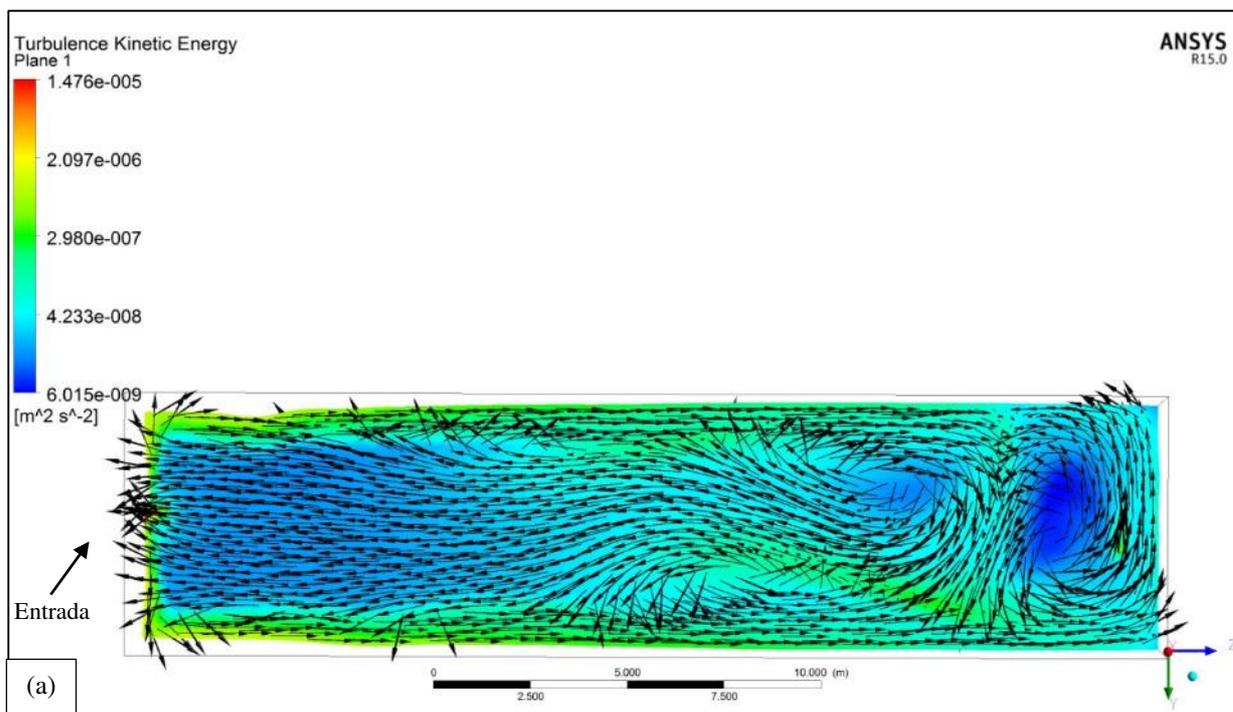
**FIGURA 5.110:** Comparação entre as concentrações efluente do traçador virtual nos modelos das lagoas na fase 1 - vazão nas lagoas de  $19\text{m}^3/\text{d}$ . Modelo transiente simplificado.

Fins de ilustração da influência da distribuição do lodo no campo de velocidade na lagoa, a FIG. 5.111 apresenta os vetores de velocidade e um plano com a magnitude da velocidade  $u$  (referente ao eixo que representa o sentido da entrada para a saída), em um plano horizontal 20 cm abaixo da superfície em cada lagoa. As cores na legenda variam com a velocidade (em m/s) no local, sendo os valores positivos (tendendo ao vermelho na legenda) atribuídos às parcelas do campo de velocidade com tendência a se deslocar em direção à saída da lagoa, e os valores negativos (tendendo ao azul), atribuídos às parcelas do campo de velocidade com tendência a se deslocar no sentido contrário, na direção da entrada na lagoa. Nota-se o mesmo comportamento já observado nos modelos anteriores, de predominância de avanço do fluxo na

direção da saída pelas laterais da lagoa e contrafluxo na região central, entretanto, com vetores de menor módulo de velocidade na lagoa com lodo. Nota-se também a mistura proporcionada pelo lodo no terço final da lagoa 1, justamente após o fluxo passar pela região de menor acúmulo do lodo na lagoa (portanto maior profundidade do líquido), cercada por grande acúmulo a montante e a jusante. Este comportamento não é observado no mesmo local na lagoa sem lodo. Portanto, tal característica de acumulação do lodo proporcionou o comportamento de mistura e recirculação nessa região, resultando também uma zona mais estagnada junto a saída. A FIG. 5.112 ilustra a energia cinética turbulenta ( $\epsilon$ ) obtida para os mesmos planos da FIG. 5.111.



**FIGURA 5.111:** Velocidade em planos horizontais longitudinais a 20cm de profundidade nas lagoas após 24h de simulação; sendo **(a)** vetores de velocidade e valores na lagoa 1, com lodo e **(b)** na lagoa 2, sem lodo.



**FIGURA 5.112:** Velocidade em planos horizontais longitudinais a 20cm de profundidade nas lagoas após 24h de simulação; sendo **(a)** vetores de velocidade e valores na lagoa 1, com lodo e **(b)** na lagoa 2, sem lodo.

Os resultados indicam que o volume acumulado do lodo no caso em questão (cerca de 35% do volume útil da lagoa 1) não reduziu proporcionalmente o TDH real da unidade (este foi reduzido em 23% com relação à lagoa 2), nem antecipou consideravelmente a ocorrência do pico de traçador. Também não houve mudança significativa no grau de dispersão. Assim, o

volume de lodo acumulado nas condições deste trabalho parece ter influência reduzida nos indicadores hidráulicos de saída na lagoa (ex: índice de curto-circuito, TDH real, eficiência hidráulica, volumétrica etc.). Por outro lado, as características da conformação geométrica de acumulação do lodo (análogo à topografia) parecem ter particular influência no comportamento hidrodinâmico, visto que o campo dos vetores de velocidade na lagoa é alterado, podendo resultar em zonas locais de recirculação e mistura e menor ou maior grau de turbulência. No trabalho de Coggins *et al.* (2017) em lagoas na Austrália, utilizando traçadores e CFD, a redução do TDH obtida foi proporcional ao percentual de lodo acumulado, mas os autores também encontraram resultados que corroboram o fato de que a configuração geométrica do lodo tem particular influência na hidrodinâmica, de forma que bancos de lodo junto à entrada, por exemplo, teriam efeito positivo no desempenho hidrodinâmico (reduzindo curto-circuito), enquanto que conformações de lodo que provoquem a canalização do fluxo teriam efeito negativo no desempenho hidrodinâmico (causando um grande e antecipado pico do traçador na saída).

#### 5.3.2.7 Diferentes locações do dispositivo de entrada nas lagoas

Duas diferentes condições de entrada foram utilizadas na operação das lagoas. Durante a primeira fase, ambas as lagoas contavam com o dispositivo de entrada direcionando o jato do afluente no sentido contrário ao do dispositivo de saída, portanto, em direção ao talude. Na segunda fase, o dispositivo de entrada na lagoa 2 (que sofreu modificações com a introdução de chicanas) passou a operar direcionando o fluxo na direção principal do escoamento. Os dispositivos de saída não sofreram modificações substanciais durante as fases de operação, tendo sido operados via fluxo vertendo superficialmente.

O efeito da configuração dos dispositivos de entrada e saída no comportamento hidrodinâmico das lagoas já pôde ser percebido nos resultados dos ensaios de campo e confirmados nas respectivas simulações apresentadas anteriormente. Nota-se principalmente que o efeito do jato de entrada direcionado no sentido contrário à saída provoca o escoamento preferencial junto aos taludes laterais das lagoas. A partir daí - a despeito das misturas em menores escalas que podem ser proporcionadas pelo vento, pelo lodo ou pelos fenômenos térmicos - a mistura longitudinal ocorre predominantemente junto à saída, gerando uma grande corrente de recirculação ao longo de toda a unidade, com correntes de fluxo (principalmente via taludes) e contrafluxo (principalmente via região central), provocando também picos secundários na curva de distribuição dos TDH na saída. Portanto, no caso de uma lagoa sem chicanas, os dados

sugerem que direcionar o efluente para os taludes da lagoa pode canalizar o fluxo e não necessariamente promover maior mistura. Acontecimento semelhante já foi observado por Shilton e Harrison (2003b), que avaliaram entradas com descarga de efluente na direção vertical e notaram que o traçador passava a se mover ao longo de duas plumas de fluxo adjacentes às paredes (tanto em laboratório quanto via modelagem computacional). Já os principais efeitos observados com dispositivo de entrada configurado de forma a direcionar o jato no sentido do escoamento principal, no caso da lagoa chicaneada, foram de mistura nos primeiros metros do canal e um efeito de circulação do fluxo ao redor da entrada. Neste mesmo sentido, Shilton e Harrison (2003b) acharam que, quando a entrada da lagoa estava alinhada com a saída, o fluxo se movia em até aproximadamente um terço do seu comprimento e então retornava em contracorrente de forma bastante acentuada pelo meio da lagoa, como se um defletor invisível estivesse no local (lagoa em laboratório,  $L/B = 3$ ). Comportamento análogo foi observado nos modelos deste trabalho.

Para fins de comparação do efeito global na hidrodinâmica das duas diferentes configurações de operação, simulações foram feitas para comparação de um mesmo modelo em CFD para as lagoas com esta única diferença (jato de entrada contra e a favor do sentido do escoamento preferencial). Os resultados foram comparados por meio da injeção do traçador virtual em condições transientes de um modelo simplificado na lagoa 2 com e sem chicanas (sem transferência de calor, sem influência do lodo acumulado, propriedades constantes do fluido e sem consideração do vento atuando na superfície), submetidas às mesmas condições de contorno em cada lagoa nos dois cenários distintos. Portanto, a intenção foi de isolar unicamente o efeito da direção do jato de entrada, aferido pela curva de traçador na saída.

Tem-se, para os dois cenários, a seguinte definição de modelagem:

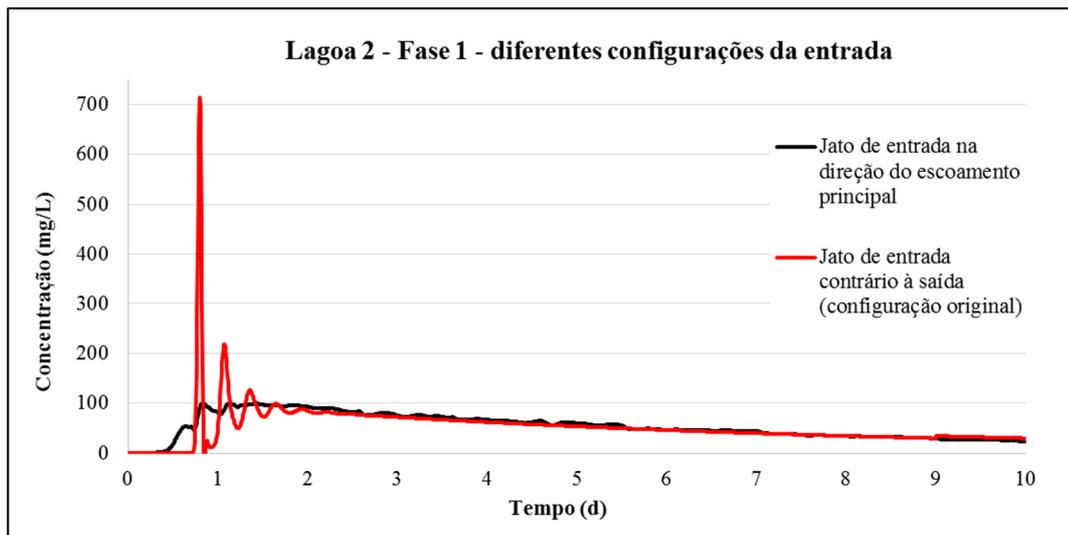
- Regime transiente
- Condições iniciais obtidas a partir do modelo estacionário (melhoria da convergência)
- Duração total (tempo físico) = 240 h
- Passo de tempo = 10 min
- Isotérmico
- Sem atuação do vento
- Modelo de turbulência  $k-\varepsilon$

- Injeção de pulso de traçador após 24h do início do escoamento (para a simulação atingir condições estáveis)

Condições de contorno:

- Entrada → fluxo mássico correspondente a uma vazão de 19 m<sup>3</sup>/d (lagoa 2, fase 1, sem chicanas e de 31 m<sup>3</sup>/d (lagoa 2, fase 2, chicaneada).
- Taludes → parede sem deslizamento (rugosidade suave)
- Superfície → parede com deslizamento
- Fundo → parede sem deslizamento, com rugosidade definida para o lodo de 20 mm
- Saída → fluxo mássico

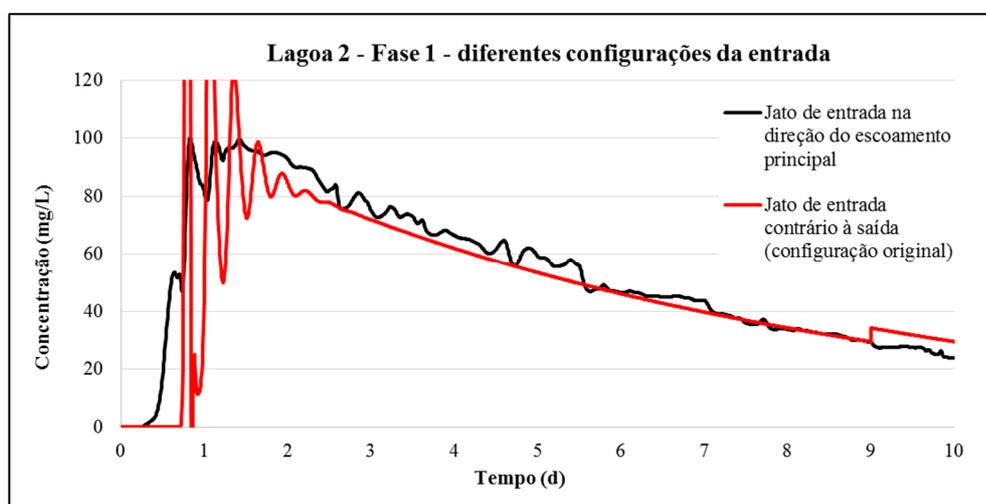
A FIG. 5.113 apresenta o resultado das curvas do traçador virtual monitorado na saída da lagoa 2 sem chicanas, nas duas configurações distintas do dispositivo de entrada (contra e a favor do escoamento principal).



**FIGURA 5.113:** Comparação entre as concentrações efluentes do traçador virtual nos modelos da lagoa 2 na fase 1 - vazão de 19m<sup>3</sup>/d e pulso de traçador de 221 kg/m<sup>3</sup>. Modelo transiente simplificado.

O TDH real médio e o número de dispersão obtidos para a lagoa 2 sem chicanas (fase 1) foram de TDH = 4,3d e  $d = 0,25$  no cenário com o jato de entrada no sentido contrário à saída (condição original) e TDH = 5,8d e  $d = 0,44$  no cenário com o jato de entrada no sentido da saída (condição hipotética). As duas condições de entrada proporcionaram resultados semelhantes quanto ao número equivalente de tanques em série ( $n = 2$  para ambas as lagoas, de

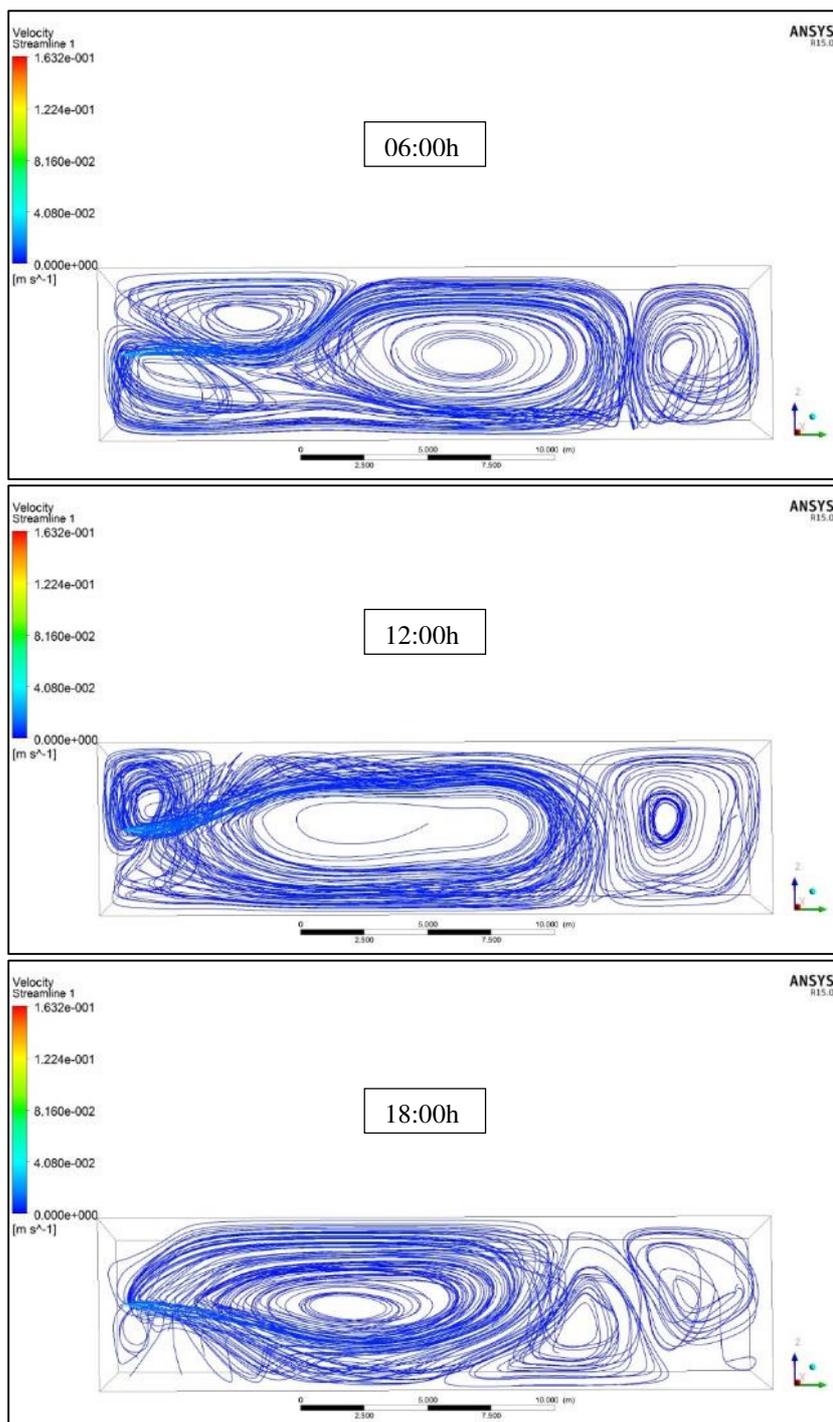
acordo com o método de ajuste à função gama e para dispersão de grande intensidade de Levenspiel (2000)), e uma diferença de 70 minutos da chegada do pico principal do traçador após a injeção do pulso (após 1020 min na condição de entrada no sentido da saída e após 1150 min na condição de sentido contrário). Uma grande diferença pode ser vista quanto a concentração do traçador no pico principal, para a qual foi obtido um valor consideravelmente maior quando o jato de entrada estava direcionado para o talude, no sentido contrário à saída. Este resultado é pode ser explicado pelo fenômeno de canalização do fluxo de entrada proporcionado pelo escoamento junto aos taludes, fazendo com que menor dispersão ocorra com as parcelas mais concentradas e que essas cheguem à saída com maior concentração do traçador. Portanto, neste caso, a provisão de pequenos defletores localizados nas paredes, tal como sugerido por Shilton e Harrison (2003b), pode de certa forma bloquear esse fluxo e promover um maior espalhamento. Na configuração de jato de entrada direcionado no sentido da saída, além de picos de menor concentração, parece haver mais rápida homogeneização do fluxo (maior dispersão também) e o efeito de recirculações secundárias parece ser menor. Tais comportamentos na curva indicam maior dispersão e tendência de mistura nesta configuração. Ao se analisar o mesmo gráfico da FIG 5.113 com escala diferente no eixo das ordenadas (FIG 5.114, abaixo), nota-se que o comportamento de “cauda” do traçador nas duas situações é semelhante.



**FIGURA 5.114:** Comparação entre as concentrações efluente do traçador virtual nos modelos da lagoa 2 na fase 1 - vazão de  $19\text{m}^3/\text{d}$  e pulso de traçador de  $221\text{ kg/m}^3$ , com alteração da escala no eixo das ordenadas para destaque ao fenômeno de cauda

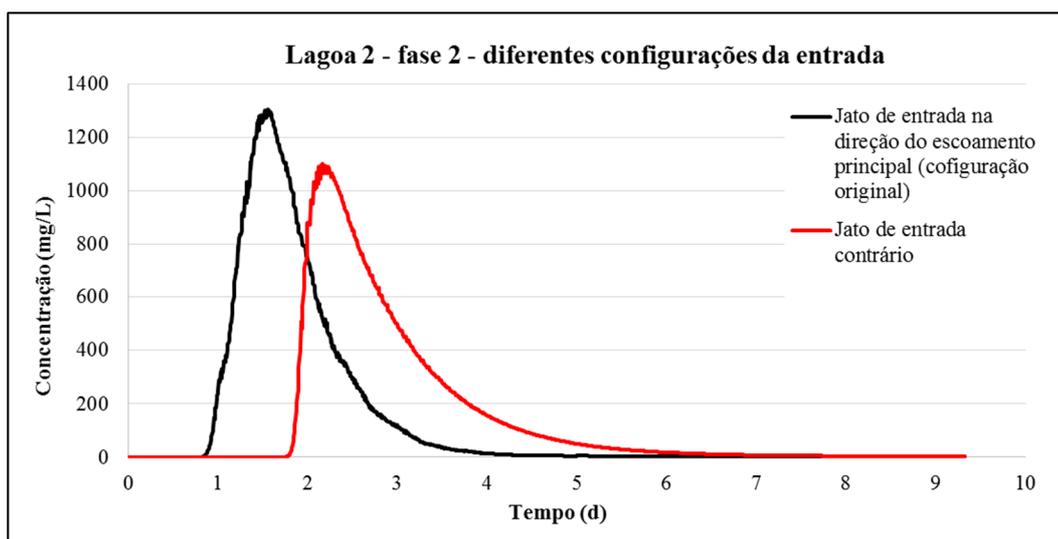
A mais rápida mistura e dispersão na configuração de jato de entrada em direção à saída pode ser explicada pela turbulência natural provocada pela interação do fluxo de entrada com o

próprio meio (tendência natural de mistura) e pela ausência do efeito de canalização nos taludes laterais, observado na outra configuração. A FIG 5.115 ilustra linhas de fluxo no plano horizontal da lagoa, em diferentes momentos do dia (06:00h, 12:00h, 18:00h) na simulação do cenário com o jato de entrada na direção da saída. Nota-se claramente a tendência natural de formação de zonas de mistura ao longo da lagoa, com divisão aproximada da unidade em duas ou três regiões - predominantemente duas grandes zonas de mistura. Registra-se novamente que o número equivalente de tanques em série foi de  $N = 2$  nos métodos da variância normalizada; de Levenspiel (2000) para dispersão de grande intensidade e também com base no ajuste à função gama (este com  $R^2 = 0,86$ ).



**FIGURA 5.115:** Linhas de fluxo no plano horizontal da lagoa 2 em diferentes momentos do dia (06:00h, 12:00h, 18:00h) na simulação do cenário com configuração do jato de entrada na direção da saída

A FIG. 5.116 apresenta o resultado das curvas do traçador virtual monitorado na saída da lagoa 2 com chicanas (fase 2), nas duas configurações distintas do dispositivo de entrada (contra e a favor do escoamento principal).



**FIGURA 5.116:** Comparação entre as concentrações efluentes do traçador virtual nos modelos da lagoa 2 na fase 2 - vazão de  $31\text{ m}^3/\text{d}$  e pulso de traçador de  $267\text{ kg}/\text{m}^3$ . Modelo transiente simplificado.

O TDH real médio e o número de dispersão obtidos para a lagoa 2 com chicanas (fase 2) foram de  $\text{TDH} = 2,9\text{d}$  e  $d = 0,06$  no cenário com o jato de entrada no sentido contrário ao escoamento principal (condição hipotética) e  $\text{TDH} = 1,9\text{d}$  e  $d = 0,09$  no cenário com o jato de entrada no sentido do escoamento principal (condição original). As duas condições de entrada proporcionaram resultados semelhantes quanto ao número equivalente de tanques em série ( $n = 14$  e  $12$ , respectivamente, de acordo com o método de ajuste à função gama e para dispersão de grande intensidade de Levenspiel (2000)), e apresentaram uma diferença de 850 minutos da chegada do pico principal do traçador após a injeção do pulso (após 3100 min na condição de entrada no sentido contrário ao escoamento principal e após 2250 min na condição de sentido contrário). Portanto, no caso da lagoa chicaneada, apesar da maior dispersão ter ocorrido na condição de jato de entrada no sentido do escoamento principal, o TDH foi menor nesta condição, bem como resultou em considerável antecipação do pico (este também mais concentrado).

De forma geral, pode-se sugerir que, em situações onde o fluxo já tem a tendência de ser canalizado, tal como no caso da lagoa chicaneada (elevada relação  $L/B$ ), há certa vantagem hidrodinâmica na definição do sentido de entrada contrário à direção do fluxo principal, visto que reduz a concentração do pico, diminui a ocorrência de curto-circuito e aumenta o TDH. Já em lagoas sem chicanas, de menor relação  $L/B$ , a locação do jato de entrada no sentido contrário ao da saída pode provocar o efeito de canalização do fluxo junto aos taludes, gerando correntes que sofrem menor dispersão em curto-circuito na direção da saída. Pode provocar,

por exemplo, chegada de picos de contaminantes em maior concentração na saída da lagoa, o que não é requerido. Neste caso, a locação do jato de entrada em direção à saída pode propiciar maior mistura do efluente, sem necessariamente reduzir o TDH (que, inclusive, foi aumentado nas condições simuladas).

#### 5.3.2.8 Síntese conclusiva / pontos mais relevantes

- Os números de Reynolds médios obtidos nas simulações estiveram na ordem de  $10^4$ , o que indicam grande turbulência nas lagoas, principalmente devido às suas grandes dimensões. Durante a etapa de processamento, observou-se grande oscilação nos erros residuais, bem como na velocidade em um ponto de monitoramento definido no meio das lagoas. Esta oscilação persistente na convergência pode indicar a natureza dinâmica do escoamento, demandando execução de simulações transientes, o que já era esperado. De forma global, a velocidade média da massa fluida na lagoa se situou na faixa dos  $10^{-3} - 10^{-4}$  m/s, tal como relatado em literatura e obtido nos ensaios de campo com *drogues* e com o ADV.
- Notou-se nas simulações das lagoas na fase 1 um padrão de fluxo ditado pelo dispositivo de entrada, que, por lançar o fluido em sentido contrário ao da saída (sentido do talude), provoca a divisão do fluxo em duas correntes que avançam pelas laterais da lagoa em direção à saída, fazendo com que o restante do fluxo passe a seguir em direção contrária, no sentido da entrada, em contrafluxo. Tal comportamento provoca uma grande recirculação na lagoa no plano horizontal. Nas camadas mais inferiores o padrão é invertido, e é possível observar que vetores de fluxo se apresentam no sentido da saída. Este padrão de fluxo foi visualizado em campo durante os ensaios com corantes, com os *drogues* e até mesmo com as medições de velocidade com uso do ADV.
- As simulações na lagoa 1 com a geometria do lodo aproximada a formas geométricas simples forneceram resultados semelhantes ao modelo com geometria obtida a partir do levantamento batimétrico, o que indica a possibilidade dessa substituição no processo de geração da geometria na modelagem em CFD. Este resultado é particularmente importante se considerados os casos em que recursos de avaliação em campo para batimetria não estão disponíveis ou demandarão muito tempo (sistemas maiores, por exemplo), ou em casos em que a intenção é estudar diferentes tipos de conformação do lodo e seu impacto na hidrodinâmica. Neste último caso a prática da modelagem se torna mais simples, visto que tempo considerável é geralmente gasto na definição da geometria do problema. Entretanto,

é importante a tentativa de máxima aproximação possível com a realidade do volume a ser considerado para o lodo e também de sua conformação, buscando sempre a literatura e relatos de casos semelhantes para auxiliar nessas estimativas.

- Os resultados dos modelos na lagoa com lodo e comparações com os demais indicam que o volume acumulado do lodo no caso em questão (cerca de 35% do volume útil da lagoa 1) não reduziu proporcionalmente o TDH real da unidade, nem antecipou consideravelmente a ocorrência do pico de traçador. Também não houve mudança significativa no grau de dispersão, comparado com a lagoa sem lodo. Por outro lado, a conformação geométrica de acumulação do lodo parece ter particular influência no comportamento hidrodinâmico, visto que o campo de velocidade na lagoa é alterado, podendo resultar em zonas locais de recirculação e mistura e menor ou maior grau de turbulência. Portanto, a despeito do menor impacto do efeito de redução do volume útil pelo lodo, a avaliação específica, caso-a-caso, das características de conformação geométrica do mesmo torna-se importante quando se deseja conhecer mais detalhadamente o comportamento hidrodinâmico de sistemas de lagoas (em aplicações com CFD, por exemplo), a fim de melhor orientar modificações operacionais no sistema.
- De modo geral, a simulação em regime transiente com vento em condições de velocidade média e direção predominante demonstrou grande influência do mesmo na superfície da lagoa, ditando a direção dos vetores de velocidade em até aproximadamente 20% da profundidade do fluido. Abaixo do plano de influência direta do vento observou-se linhas de contrafluxo, causando retromistura. Após aproximadamente 2h do início do escoamento, já se estabelece na lagoa um equilíbrio dinâmico entre as forças inerciais do jato de entrada e as forças de cisalhamento do vento, principalmente na superfície da lagoa. A partir deste momento, passam a coexistir na lagoa fenômenos de recirculação nas três dimensões, linhas de fluxo ditadas predominantemente pelo vento e linhas de fluxo ditadas predominantemente pelo dispositivo de entrada. Os modelos com atuação dinâmica do vento corroboram essa grande influência na superfície da lagoa, inclusive com indução de linhas de contrafluxo. Entretanto, tal influência vai reduzindo à medida que os ventos se tornam menos intensos, quando o jato de entrada passa a determinar predominantemente o comportamento hidrodinâmico da lagoa. O padrão de alternância (maior influência do vento *versus* maior influência da entrada) se repete em ciclos diários e, portanto, tal efeito não pôde ser observado no modelo em condições constantes de vento, no qual se observou

dominância do mesmo no escoamento de modo permanente (o que raramente se encontra na realidade). Portanto, os resultados obtidos demonstraram ser possível adotar modelos de lagoas com vento em condições dinâmicas e a grande importância de se considerar tal critério; aspecto ainda não devidamente explorado na literatura. A inclusão do vento pareceu aproximar os resultados simulados de padrões observados em campo, tal como zonas de mistura não captadas em modelos sem consideração do vento.

- No cenário de simulação mais básico, as velocidades obtidas na lagoa 2, fase 2, variaram de 0 a 0,46 m/s, com a maior velocidade obtida, naturalmente, na saída do dispositivo de entrada na lagoa. Este jato de entrada foi responsável por impulsionar o fluxo adiante na lagoa; não necessariamente em linha reta, como se poderia intuir, mas formando zonas de recirculação com dimensões características da mesma ordem de grandeza da largura do canal. Mais três zonas de recirculação foram observadas no primeiro canal e mais duas no final de cada chicana, bem como pequenas zonas estagnadas junto à parede das chicanas. Pôde-se também inferir neste cenário que o efeito da entrada na lagoa é mais pronunciadamente sentido até os primeiros 8 a 10 metros ao longo do seu comprimento, após os quais o fluxo passa a se mover em velocidade constante e de menor magnitude.
- Os resultados do modelo transiente com balanço térmico corresponderam bem aos resultados obtidos em campo. Os ciclos diários de estratificação e desestratificação observados nos monitoramentos com as sondas foram obtidos nas suas condições médias no modelo CFD. Observa-se pelo comportamento geral do fluido nas simulações que nas situações de estratificação e desestratificação há tendência de movimento convectivo provocado pela diferença de temperatura entre as camadas do fluido (associado ao empuxo), que concorre com os movimentos horizontais do campo de escoamento, impulsionados pelo jato de entrada e pela ação do vento, e com a própria tendência de estabilidade devido às propriedades viscosas do fluido e à difusão térmica. Todo este cenário confirma a grande complexidade e dinamismo do escoamento em lagoas, distanciando ainda mais da possibilidade de descrição definitiva do comportamento hidrodinâmico por meio de equações teóricas mais simplificadas, quando a intenção for de estudar e analisar os fenômenos que ocorrem no interior da unidade de tratamento. O que pode ser generalizado é um comportamento médio de mistura completa, com a ressalva de que fenômenos distintos ocorrem simultaneamente em diferentes regiões da lagoa. Os resultados obtidos também demonstraram ser possível adotar modelos de lagoas com

balanço térmico completo em condições dinâmicas e a grande importância de se considerar tal critério na prática da modelagem.

- Foi verificado também em CFD o efeito do lodo de fundo no perfil térmico da lagoa, demonstrando a importância do mesmo no balanço térmico e modelagem hidrodinâmica de lagoas. Gradientes negativos, observados em campo nas medições do perfil vertical, foram também obtidos via CFD. Trata-se de uma abordagem inédita na literatura.
- É razoável assumir, até mesmo durante a estratificação, a existência de uma instabilidade hidrodinâmica nas lagoas, de forma que a ocorrência da mistura vertical se torna dependente dos fenômenos de condução e convecção no perfil da lagoa, bem como das velocidades dessas transferências térmicas. Os perfis térmicos ao longo de planos transversais na lagoa sugerem a existência de células de recirculação estratificadas em aproximadamente duas camadas ao longo do perfil vertical. Já durante a desestratificação, o comportamento dos vetores de velocidade no plano longitudinal demonstrou a tendência de circulação vertical com a equalização da temperatura, sugerida também pelos dados de monitoramento em campo. Parâmetros adimensionais avaliados no momento de estratificação também indicam a tendência à transferência de calor por convecção natural no interior da lagoa, conseqüentemente a ocorrência da mistura vertical, bem como corroboram a importância do empuxo e a necessidade de tratamento da termodinâmica na lagoa em regime transiente, tal como realizado neste trabalho.
- De modo geral, o comportamento hidrodinâmico da lagoa 1 no modelo unificado pode ser caracterizado por uma mistura completa, ao longo das três dimensões. Ao longo do comprimento, a tendência geral é de que linhas de fluxo partam em direção à saída pelas laterais e principalmente pelo fundo da lagoa, junto ao lodo, e linhas de fluxo em sentido contrário (no sentido da entrada) ocorram mais nas camadas superficiais. Este comportamento provoca uma mistura completa ao longo do comprimento e caracteriza uma grande célula de recirculação, que coexiste com células menores e em outras direções e regiões da lagoa. Nos momentos do dia correspondentes à maiores velocidades do vento, que coincidem com períodos em que a lagoa se encontra estratificada, o vento parece induzir mais pronunciadamente a mistura no sentido da largura da lagoa (condizente com a direção de atuação do mesmo), de forma que se verificam vetores de velocidade na superfície apontados no sentido do vento e vetores no sentido inverso nas camadas mais

profundas, principalmente na parte com menor acúmulo de lodo (maior camada líquida). Entretanto, tal comportamento foi menos evidente em comparação ao modelo com vento isotérmico. Há também uma tendência de formação de uma “célula” de mistura completa no primeiro terço da lagoa, junto à entrada, com largura e comprimento semelhantes à largura da lagoa. A tendência de predomínio do jato de entrada como principal condicionador do fluxo ocorre alternando com o vento, de acordo com a dinâmica deste último. Em tempos de ventos mais fortes, a influência do jato de entrada forçando o fluido pelas laterais deixa de ser visível na superfície, mas a condição de equilíbrio que é atingida mesmo com a intensificação do vento conta com a quantidade de movimento fornecida pela entrada para promover o fluxo subsuperficial do efluente e também promover a mistura na zona de entrada da lagoa. Os ciclos diários de estratificação e desestratificação observados em campo foram obtidos nas suas condições médias no modelo, que sugere estratificação térmica seguida de desestratificação mesmo em períodos de maior atuação do vento, com uma diferença média de 6°C entre a temperatura de um ponto na superfície e um ponto no fundo da lagoa, em uma região com menor lodo acumulado (maior camada de fluido).

- Na lagoa 2, os resultados do modelo unificado sugeriram mistura nos três canais formados pelas chicanas, com a influência do jato de entrada ditando predominantemente o fluxo por meio da indução de células de recirculação em até 10m da entrada, tal como sugerido também no cenário básico. Tal comportamento foi observado tanto em horários de maior atuação do vento quanto em horários de calmaria. Distinção pode ser observada com relação aos vetores de velocidade nas demais porções da lagoa, passados os primeiros metros da entrada, para os quais se observa que o vento fornece tensão superficial suficiente para ditar o comportamento dos vetores de velocidade na superfície da lagoa nos horários em que sua velocidade é maior (foi possível observar um padrão). Os mesmos ciclos de estratificação térmica seguida de desestratificação observados no modelo da lagoa 1 foram obtidos na lagoa 2. Tanto as variações de temperatura quanto os momentos de estratificação e mistura vertical do modelo em CFD corresponderam bem às condições gerais de perfil vertical obtidas em campo também na lagoa 2. Em relação a se considerar a temperatura do jato de entrada variável ou não, notou-se pequena diferença global entre a resposta dos dois modelos na curva de um traçador virtual, sugerindo a viabilidade da simplificação caso não seja possível atribuir temperaturas variáveis como condição de contorno de entrada ou na indisponibilidade de dados. Ademais, os resultados sugerem que

a lagoa chicaneada não se comporta estritamente como isotérmica ao longo do comprimento e largura, de forma que as diferenças podem ser significativas em lagoas maiores.

- Os resultados obtidos com a aplicação da equação de radiação solar (irradiação) derivada a partir da série de Fourier indicam que avanços nos ajustes da equação poderão ser empreendidos, a fim de se chegar ao melhor modelo. Após tal, espera-se que a proposta possa ser aproveitada na modelagem de lagoas ou no seu balanço térmico, sem a necessidade de subprogramações ou inclusão funções complementares que podem não estar disponíveis em softwares de modelagem.
- Pode-se sugerir que, em situações onde o fluxo já tem a tendência de ser canalizado, tal como no caso da lagoa chicaneada (elevada relação  $L/B$ ), há certa vantagem hidrodinâmica na definição do sentido de entrada contrário à direção do fluxo principal, visto que reduz a concentração do pico, diminui a ocorrência de curto-circuito e aumenta o TDH. Já em lagoas sem chicanas, de menor relação  $L/B$ , a locação do jato de entrada no sentido contrário ao da saída pode provocar o efeito de canalização do fluxo junto aos taludes, gerando correntes que sofrem menor dispersão em curto-circuito na direção da saída. Pode provocar, por exemplo, chegada de picos de contaminantes em maior concentração na saída da lagoa, o que não é requerido. Neste caso, a locação do jato de entrada em direção à saída pode propiciar maior mistura do efluente, sem necessariamente reduzir o TDH (que, inclusive, foi aumentado nas condições simuladas).

## 6 CONCLUSÕES

Resultados de ensaios e monitoramento de campo, bem como um modelo CFD 3D dinâmico e unificado foram apresentados neste trabalho, com o objetivo principal de contribuir com a prática de estudos hidrodinâmicos e modelagem de lagoas e com o avanço do conhecimento desses sistemas.

A partir dos principais resultados obtidos com os ensaios de campo, monitoramento e cenários do modelo em CFD, algumas conclusões principais podem ser sumarizadas:

- Foi possível observar com os dados apresentados que, de forma geral, há eventos periódicos diários de estratificação térmica seguidos de desestratificação e mistura vertical, em ambas as lagoas e fases de operação, independentemente do local de monitoramento no plano horizontal e da época do ano, sugerindo que mesmo em lagoas rasas é comum o acontecimento desse fenômeno, inclusive com gradientes bastante elevados. A mistura vertical foi confirmada a partir de dados de qualidade da água monitorados ao mesmo tempo.
- Os dados sugerem que a mistura vertical está muito mais relacionada ao resfriamento da temperatura do ar que à ação do vento. Entretanto, apesar de não serem determinantes, ventos mais fortes parecem contribuir com a antecipação dessa mistura. A turbulência causada pelo fluido na região de entrada da lagoa também não foi capaz de evitar a estratificação
- Gradientes térmicos negativos observados neste estudo apontam a camada de lodo como fator crucial ao balanço térmico de lagoas, devendo ser considerada em modelos matemáticos e computacionais que levem em consideração essa variável. Além disso, o monitoramento no perfil do lodo revelou que as camadas mais profundas apresentam maior temperatura que as camadas mais superficiais, aparentemente sem provocar movimentação vertical com ascensão do material sedimentado. A partir de tais constatações, é possível imaginar cenários em que a camada do lodo poderia ser utilizada como ferramenta de projeto para evitar a estratificação térmica, via associação, por exemplo, com outros materiais e procedimentos operacionais para aproveitamento do calor acumulado com vistas a provocar a convecção forçada em momento de estratificação. Gradientes negativos obtidos em ensaios sem a presença do lodo evidenciaram a grande interferência de ensaios com traçadores salinos no perfil térmico da lagoa, e também a recíproca, alertando para a

necessidade de cuidados na interpretação dos dados desses testes quando ocorrem simultaneamente.

- Os resultados reforçam a grande aplicabilidade dos *drogues* como ferramenta para estudos hidrodinâmicos em lagoas, revelando tendências de comportamento e padrões observados nos testes com os corantes, ADV e nos modelos CFD, em ambas as lagoas. Velocidades médias nas lagoas também puderam ser calculadas pelas trajetórias dos *drogues* e estiveram dentro das faixas obtidas nos modelos em CFD. A utilização da variação dos *drogues* com GPS embutido é mais recomendada em lagoas maiores.
- Os resultados obtidos com os molinetes hidráulicos desencorajam o uso da técnica para medições de velocidade nas lagoas, já o medidor acústico ADV mostrou ser capaz de captar as baixas velocidades comumente encontradas, além de possibilitar a obtenção da direção e o sentido das linhas de fluxo em cada ponto. Entretanto, deve-se planejar com cautela os experimentos com o ADV, preferencialmente prevendo métodos para medição de menor interferência no fluxo.
- Os corantes se mostraram extremamente úteis na avaliação visual da hidrodinâmica de lagoas (ao menos de lagoas de porte semelhante às da presente pesquisa), e revelaram tendências de fluxo nas camadas mais superficiais observadas também a partir dos outros métodos aplicados no presente estudo.
- Os testes com traçadores sugeriram uma tendência geral de mistura completa nas lagoas, com elevada dispersão e curtos-circuitos. Os resultados com o sal de cozinha como traçador e as dificuldades de utilização registradas no trabalho permitiram a conclusão de que o mesmo não constitui bom traçador para sistemas de lagoas em escala real. Os testes com traçador fluorescente foram mais facilmente executados e aparentaram possuir maior confiabilidade, com a ressalva de que se deve ter em mente as perdas possíveis deste traçador nos testes.
- As simulações na lagoa 1 com a geometria do lodo aproximada a formas geométricas forneceram resultados semelhantes ao modelo com geometria obtida a partir do levantamento batimétrico, o que indica a possibilidade dessa substituição no processo de geração da geometria de lagoas na modelagem em CFD, podendo tornar a prática da modelagem consideravelmente mais simples. Entretanto, é importante a tentativa de máxima aproximação possível com a realidade do volume a ser considerado para o lodo e também de

sua conformação, buscando sempre a literatura e relatos de casos semelhantes para auxiliar nessas estimativas.

- Notou-se no modelo da lagoa 1 o mesmo padrão de fluxo ditado pelo dispositivo de entrada em alternância com o vento, efeitos de canalização do fluxo junto aos taludes e regiões de recirculação; fenômenos também visualizados em campo durante os ensaios com corantes, com os *drogues* e até mesmo com as medições de velocidade com uso do ADV. Os ciclos diários de estratificação e desestratificação observados em campo foram obtidos nas suas condições médias no modelo.
- Os resultados dos modelos na lagoa 1 e comparações com os demais indicam que o volume acumulado do lodo no caso em questão não reduziu proporcionalmente o TDH real da unidade, nem antecipou consideravelmente a ocorrência do pico de traçador. Também não houve mudança significativa no grau de dispersão, comparado com a lagoa sem lodo. Por outro lado, a conformação geométrica de acumulação do lodo parece ter particular influência no comportamento hidrodinâmico, visto que o campo de velocidade na lagoa é alterado, podendo resultar em zonas locais de recirculação e mistura e menor ou maior grau de turbulência. Portanto, a despeito do menor impacto do efeito de redução do volume útil pelo lodo, a avaliação específica, caso-a-caso, das características de conformação geométrica do mesmo torna-se importante quando se deseja conhecer mais detalhadamente o comportamento hidrodinâmico de sistemas de lagoas (em aplicações com CFD, por exemplo), a fim de melhor orientar modificações operacionais no sistema.
- Fenômenos hidrodinâmicos na lagoa 2 também puderam ser observados via CFD, revelando efeitos do jato de entrada, de chicanas, linhas de recirculação e demais comportamentos corroborados também pelos dados de campo. Os ciclos diários de estratificação e desestratificação observados nos monitoramentos com as sondas também foram obtidos no modelo CFD.
- Os resultados demonstraram ser possível adotar modelos de lagoas com vento em condições dinâmicas e a grande importância de se considerar tal critério; aspecto ainda não devidamente explorado na literatura. A inclusão do vento revelou tendências de formação de vetores de velocidade na superfície e indução de vetores em contrafluxo. O modelo com vento dinâmico pareceu aproximar os resultados simulados de padrões observados em campo, tal como zonas de mistura não captadas em modelos sem consideração do vento.

- Observou-se, pelo comportamento geral do fluido nas simulações, que nas situações de estratificação e desestratificação há tendência de movimento convectivo provocado pela diferença de temperatura entre as camadas do fluido (associado ao empuxo), que concorre com os movimentos horizontais do campo de escoamento, impulsionados pelo jato de entrada e pela ação do vento, e com a própria tendência de estabilidade devido às propriedades viscosas do fluido e à difusão térmica. Todo este cenário confirma a grande complexidade e dinamismo do escoamento em lagoas, distanciando ainda mais da possibilidade de descrição definitiva do comportamento hidrodinâmico por meio de equações teóricas mais simplificadas, quando a intenção for de estudar e analisar os fenômenos que ocorrem no interior da unidade de tratamento. Os resultados obtidos também demonstraram ser possível adotar modelos de lagoas com balanço térmico completo em condições dinâmicas e a grande importância de se considerar tal critério na prática da modelagem.
- Foi verificado também em CFD o efeito do lodo de fundo no perfil térmico da lagoa, demonstrando a importância do mesmo no balanço térmico e modelagem hidrodinâmica de lagoas. Gradientes negativos, observados em campo nas medições do perfil vertical, foram também obtidos via CFD. Trata-se de uma abordagem inédita na literatura.
- Os resultados obtidos com a aplicação da equação de radiação solar (irradiação) derivada a partir da série de Fourier indicam que avanços nos ajustes da equação poderão ser empreendidos, a fim de se chegar ao melhor modelo. Após tal, espera-se que a proposta possa ser aproveitada na modelagem de lagoas ou no seu balanço térmico, sem a necessidade de subprogramações ou inclusão funções complementares que podem não estar disponíveis em softwares de modelagem.
- Pode-se sugerir que, em situações onde o fluxo já tem a tendência de ser canalizado, tal como no caso da lagoa chicaneada (elevada relação L/B), há certa vantagem hidrodinâmica na definição do sentido de entrada contrário à direção do fluxo principal, visto que reduz a concentração do pico, diminui a ocorrência de curto-circuito e aumenta o TDH. Já em lagoas sem chicanas, de menor relação L/B, a locação do jato de entrada no sentido contrário ao da saída pode provocar o efeito de canalização do fluxo junto aos taludes, gerando correntes que sofrem menor dispersão em curto-circuito na direção da saída. Pode provocar, por exemplo, chegada de picos de contaminantes em maior concentração na saída da lagoa, o que não é requerido. Neste caso, a locação do jato de entrada em direção à saída pode

propiciar maior mistura do efluente, sem necessariamente reduzir o TDH (que, inclusive, foi aumentado nas condições simuladas).

Nota-se que foi alcançado neste trabalho um modelo dinâmico e unificado que produziu resultados satisfatórios quanto ao comportamento hidrodinâmico das lagoas quando sujeitas às condições de contorno comumente encontrada na maioria dos sistemas: lodo acumulado, fluido com características distintas da água e influência das condições ambientais externas de temperatura, evaporação, ação do vento e radiação solar. Apesar das limitações dos métodos de validação de campo utilizados, em geral, as tendências observadas nos ensaios com *drogues*, corantes, traçadores e ADV concordaram bem entre si e com os resultados dos modelos em CFD, atestando a favor da validação do mesmo.

Este trabalho reforça a grande utilidade e potencial de aplicação dessa ferramenta na modelagem de lagoas de estabilização, contribuindo com uma tendência que vem sendo consolidada em pesquisas na área ao longo dos últimos 20 anos. A partir dos modelos desenvolvidos, estudos e análises mais aprofundadas a respeito do comportamento hidrodinâmico das lagoas em estudo puderam ser realizados, bem como possibilitou prognósticos operacionais. Apesar de aplicado em lagoas com condições específicas e dimensões mais reduzidas, o modelo proposto pode ser adaptado para lagoas em outras escalas e submetidas a diferentes condições ambientais, com vistas à avaliação e diagnóstico de unidades existentes, orientação de melhorias operacionais para aumento da eficiência ou mesmo como auxiliar em projetos de novas unidades. A associação com modelos de qualidade da água e de remoção de poluentes dotaria o modelo hidrodinâmico obtido de ainda maior completude, possivelmente viabilizando a predição de eficiência na remoção de parâmetros de interesse ou o estudo de alternativas para a sua melhoria.

## 7 RECOMENDAÇÕES

Recomenda-se, para continuação deste trabalho:

- Realização de monitoramento do perfil vertical das lagoas considerando parâmetros físicos, químicos e microbiológicos adicionais e mais pontos ao longo da profundidade. Preferencialmente em diversas regiões da lagoa ao mesmo tempo.
- Realização de testes de estímulo-resposta com uso de outros traçadores (ex: químicos, radioativos), de preferência em simultâneo com os mesmos traçadores utilizados nesta pesquisa.
- Realização de testes de estímulo-resposta com uso de outros traçadores com a lagoa coberta, a fim de atenuar o efeito do vento e dos raios solares e obter informações adicionais a respeito da influência desses dois parâmetros na hidrodinâmica.
- Analisar mais profundamente interferências relacionadas ao uso do ADV nas medições de campo.
- Refinamento do modelo do traçador virtual em CFD, a fim de contemplar características específicas adicionais do traçador que está sendo modelado (ex: perdas, efeito da densidade etc.).
- Utilização do modelo hidrodinâmico unificado desenvolvido nesta pesquisa em conjunto com modelos de qualidade da água aplicáveis em lagoas.
- Avanços nos ajustes da equação da irradiação solar derivada da série de Fourier.
- Em futuras publicações, acredita-se que uma boa descrição de um modelo em CFD deveria conter, minimamente, informações detalhadas da geometria (principalmente dos dispositivos de entrada e saída; grandes condicionadores do fluxo); informações estatísticas dos elementos de malha, tipo, processo de refinamento e dimensões características; detalhes dos critérios de processamento, como o tempo total de simulação e o passo de tempo adotado; detalhes dos critérios de convergência e da estabilidade do modelo; informações sobre as condições de contorno utilizadas e valores atribuídos; relações de equações e modelos adicionais utilizados, bem como os valores das constantes, coeficientes e parâmetros adotados; menção às simplificações assumidas e métodos utilizados para análise de sensibilidade, calibração e validação. Tais informações dotariam os trabalhos de maior

reprodutibilidade e possibilitariam comparações entre diferentes modelos, contribuindo com o processo de consolidação de metodologias e práticas da modelagem em CFD.

## 8 REFERÊNCIAS

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

ABBASSI, H.; KHAN, F.; HAWBOLDT, K. A methodology of finding dispersion coefficient using Computational Fluid Dynamics (CFD). *International Journal of Water Resources and Environmental Engineering*, v. 2, n. 5, p. 114-120, 2010.

ABIS, K. L.; MARA, D. D. Research on waste stabilization ponds in the United Kingdom: sludge accumulation in pilot scale primary facultative ponds. *Environmental Technology*, v. 26, n. 4, p. 449-457, 2005.

ABIS, K. L.; MARA, D. D. Temperature measurement and stratification in facultative waste stabilisation ponds in the UK climate. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 114, n. 1-3, p. 35-47, 2006.

ADAMSSON, A.; PERSSON, J.; LYNGFELT, S. Numerical simulation and large-scale physical modelling of flow in a detention basin. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON URBAN STORM DRAINAGE, 8, 1999, Sydney. [*Proceedings...*] Sydney, 1999.

AGUNWAMBA, J. C. Boundary conditions for the waste stabilization pond. *Water, Air & Soil Pollution*, v. 52, n. 3-4, p. 237-245, 1990.

AGUNWAMBA, J. C. Effect of the location of the inlet and outlet structures on short-circuiting: Experimental investigation. *Water Environment Research*, v. 78, n. 6, p. 580-589, 1990.

AGUNWAMBA, J. C.; EGBUNIWE, N.; ADEMILUYI, J. O. Prediction of the dispersion number in waste stabilization ponds. *Water Research*, v. 26, n. 1, p. 85-89, 1992.

AGUNWAMBA, J. C. Prediction of bacterial population in WSPs using multiple depth layer model, I.E. (1), *Journal- EN*, v. 77, p. 42- 48, 1997.

ALDANA, G. J.; LLOYD, B. J.; GUGANESHARAJAH, K.; BRACHO, N. The development and calibration of a physical model to assist in optimising the hydraulic performance and design of maturation ponds. *Water Science and Technology*, v. 51, n. 12, p. 173-181, 2005.

ALEXANDER, C. E.; QUINLAN, J. F. *Practical tracing of groundwater, with emphasis on karst terranes*, 2nd ed, Short course manual from the Annual Meeting of the Geological Society of America, Cincinnati, Ohio, 1992. 38 p.

ALVARADO, A. *Advanced dynamic modelling of wastewater treatment ponds*. 2013. 189 p. PhD Thesis (PhD in Applied Biological Sciences) – Ghent University, Belgium, 2013.

ALVARADO, A.; SANCHEZ, E.; DURAZNO, G.; VESVIKAR, M.; NOPENS, I. (2012a) CFD analysis of sludge accumulation and hydraulic performance of a waste stabilization pond. *Water Science and Technology*, v. 66, n. 11, p. 2370-2377, 2012.

ALVARADO, A.; VEDANTAM, S.; DURAZNO, A.; NOPENS, I. Hydraulic assessment of waste stabilization ponds: Comparison of computational fluid dynamics simulations against tracer data. *MASKANA*, v. 2, n. 1, p. 81-89, 2011.

ALVARADO, A.; VEDANTAN, S.; GOETHALS, P.; NOPENS, I. (2012b) A compartmental model to describe hydraulics in a full-scale waste stabilization pond. *Water Research*, v. 46, n. 2, p. 521–530, 2012.

ALVARADO, A.; VESVIKAR, M.; CISNEROS, J. F.; MAERE, T.; GOETHALS, P.; NOPENS, I. CFD study to determine the optimal configuration of aerators in a full-scale waste stabilization pond. *Water Research*, v. 47, n. 13, p. 4528–4537, 2013.

ANDRADA, J. G. B. *Utilização de Filtros Grosseiros para Remoção de Algas Presentes em Efluentes de Lagoas de Polimento*. 2005. 115p. Dissertação (Mestrado em Saneamento Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

ANSYS. *Help viewer*, ANSYS Europe Ltd. v. 15.0, 2013.

APHA; AWWA; WEF. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 20 ed. Washington: APHA, 1998.

APHA. AWWA. WEF. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. Washington, D.C.: American Public Health Association. American Water Works Association, Water Pollution Control Federation. 2005.

ARAÚJO, J. C.; CORREA, M. M. S.; SILVA, E. C.; GODINHO, V. M.; VON SPERLING, M.; CHERNICHARO, C. A. L. Investigation of aerobic and anaerobic ammonium-oxidizing bacteria presence in a small full-scale wastewater treatment system comprised by UASB reactor and three polishing ponds. *Water Science and Technology*, v. 61, n. 3, p. 737–743, 2010.

ARAR, A. *Background to treatment and use of sewage effluent*. Ch. 2, Treatment and Use of Sewage Effluent for Irrigation. Pescod, M. e Arar, A. (eds), Butterworths, Sevenoaks, Kent, 1988.

ARCEIVALA, J. S. Hydraulic modeling for waste stabilization ponds. *Journal of Environmental Engineering - ASCE*, v. 109, n. 1, 265–268, 1983.

ARCEIVALA, S. J. *Wastewater treatment and disposal*. New York: Marcel Dekker, 1981. 892 p.

ASSUNÇÃO, F. A. L. *Estudo da remoção de nitrogênio, com ênfase na volatilização de amônia, em lagoas de polimento de efluentes de reatores UASB tratando esgotos urbanos de Belo Horizonte/MG*. 2009. 114p. Dissertação (Mestrado em Saneamento Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

ASSUNÇÃO, F. A. L.; VON SPERLING, M. Importance of the ammonia volatilization rates in shallow maturation ponds treating UASB reactor effluent. *Water Science and Technology*, v. 66, n. 6, p. 1239-1246, 2012.

ASSUNÇÃO, F. A. L.; VON SPERLING, M. Influence of temperature and pH on nitrogen removal in a series of maturation ponds treating anaerobic effluent. *Water Science and Technology*, v. 67, n. 10, p. 2241–2248, 2013.

BOUZA-DEAÑO, R.; SALAS-RODRÍGUEZ, J. J. Distribution and spatial variability of sludges in a wastewater stabilization pond system without desludging for a long period of time. *Ecological Engineering*, v. 50, p. 5–12, 2013.

BADROT-NICO, F.; GUINOT, V.; BRISSAUD, F. Taking wind into account in the design of waste stabilisation ponds. *Water Science and Technology*, v. 61, n. 4, p. 937–944, 2010.

BALÉO, J-N.; HUMEAU, P.; CLOIREC, P. Numerical and experimental hydrodynamic studies of a lagoon pilot. *Water Research*, v. 35, n. 9, p. 2268-2276, 2001.

BANDA, C. G.; SLEIGH, P. A.; MARA, D. D. (2006a). 3D-CFD modelling of *E. coli* removal in baffled primary facultative ponds: classical design optimization. In: IWA SPECIALIST CONFERENCE ON WASTE STABILIZATION PONDS, 7, 2006, Bangkok. [Anais...] Bangkok: IWA, 2006.

BANDA, C. G.; SLEIGH, P. A.; MARA, D. D. (2006b). CFD-Based design of waste stabilization ponds: significance of wind velocity. In: IWA SPECIALIST CONFERENCE ON WASTE STABILIZATION PONDS, 7, 2006, Bangkok. [Anais...] Bangkok: IWA, 2006.

BARTER, P. J. Investigation of pond velocities using dye and small drogues: a case study of the Nelson City waste stabilisation pond. *Water Science and Technology*, v. 48, n. 2, p. 145–151, 2003.

BATCHELOR, G. K. *An Introduction to Fluid Dynamics*. United Kingdom: Cambridge University Press, 2000. 658 p.

BEYENE, D.; RAO, P. V. V. P. Analysis of hydraulic performance of a facultative waste stabilisation pond treating brewery effluent using tracer study - the case of Meta Abo brewery waste stabilisation ponds, Sebeta, Ethiopia. *National monthly refereed journal of research in science & technology*, v. 2, n. 10, p. 1–14, 2013.

BIRD, R. B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. *Transport Phenomena*. 2 ed. John Wiley & Sons, 2006. 905 p.

BOKIL, S.; AGRAWAL, G. Stratification in laboratory simulations of shallow stabilization ponds. *Water Research*, v. 11, n. 12, p. 1025-1030, 1997.

BORGES, A. C.; MATOS, A. T.; CALIJURI, M. C.; OLIVEIRA, G. H. H.; ROLDÃO, J. S. F. Uso de traçadores para avaliação da hidrodinâmica de sistemas tropicais. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v. 29, n. 2, p. 301-310, 2009.

BRACHO, N.; BRISSAUD, F.; VASEL, J. L. Hydrodynamic of ponds Part II: Practice. In: IWA CONFERENCE ON WASTE STABILISATION PONDS, 8, 2009, (lecture). Belo Horizonte: IWA, 2009.

BRISSAUD, F.; LAZAROVA, V.; DUCOUP, C.; JOSEPH, C.; LEVINE, B.; TOURNOUD, M. Hydrodynamic behaviour and faecal coliform removal in a maturation pond. *Water Science and Technology*, v. 42, n. 10-11, p. 119-126, 2000.

BRISSAUD, F.; TOURNOUD, M. G.; DRAKIDES, C.; LAZAROVA, V. Mixing and its impact on faecal coliform removal in a stabilization pond. *Water Science and Technology*, v. 48, n. 2, p. 75-80, 2003.

BRITO, M. C. S. O.; VON SPERLING, M.; CHERNICHARO, C. A. L. Característica do lodo acumulado em uma lagoa de polimento. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 23, 2005, Rio de Janeiro. [Anais...] Rio de Janeiro: ABES, 1999.

CAMARGO VALERO, M. A.; MARA, D. Nitrogen removal in maturation ponds: tracer experiments with <sup>15</sup>N-labelled ammonia. *Water Science & Technology*, v. 55, n. 11, p. 81-85, 2007.

CAMARGO VALERO, M. A.; MARA, D. The influence of algal biomass on tracer experiments in maturation ponds. *Desalination and Water Treatment – Science and Engineering*, v. 4, n.1-3, p. 89-92, 2009.

CAMPOS, J. R.; DIAS, H. G. Potencialidade do filtro anaeróbio. *Revista DAE*, v. 49, n 154, p. 23-29, 1999.

CASAROTTI, E. G.; MATSUMOTO, T.; ALBERTIN, L. L. Avaliação da influência do vento na circulação de uma lagoa de estabilização. *Revista Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 17, n 4, p. 401-412, 2012.

CATUNDA, P. F. C.; VAN HAANDEL, A.; LETTINGA, G. Post treatment of anaerobically treated sewage in waste stabilization ponds. In: *Anaerobic digestion, 7<sup>th</sup> Symposium*, Capetown, South Africa, p. 405-415, 1994.

CAVALCANTI, P. F. F. Integrated application of the UASB reactor and ponds for domestic sewage treatment in tropical region, 2003, 138 p. Tese (Doutorado) – Wageningen University, Wageningen (The Netherlands), 2003.

CAVALCANTI, P. F. F.; MAYER, M. das G. R.; MOREIRA, E. A.; HAANDEL, A. Van (2001a). Lagoas de polimento para o pós-tratamento de esgoto digerido – parte 2: remoção de patógenos. In: CHERNICHARO, C. A. L. (coord.) *Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios: coletânea de trabalhos técnicos - volume 2*, PROSAB/ABES, Belo Horizonte, [s.n.]. p. 79-86.

CAVALCANTI, P. F. F.; VAN HAANDEL, A.; KATO, M. T.; VON SPERLING, M.; LUDUVICE, M. L.; MONTEGGIA, L. O. (2001b) Pós-tratamento de Efluente Anaeróbios por Lagoas de Polimento. In: CHERNICHARO, C. A. L. (coord.) *Pós-Tratamento de Efluente de Reatores Anaeróbios*, PROSAB/ABES, Rio de Janeiro, p. 105-170, 2001.

CAVALCANTI, P. F. F.; VAN HAANDEL, A.; LETTINGA, G. Sludge accumulation in polishing ponds treating anaerobically digested wastewater. *Water Science and Technology*, v. 45, n.1, p. 75–81, 2002.

CHAPPLE, L. *A Study of Bacterial Kinetics and Hydraulic Shortcircuiting* 1985. Masterate Thesis - Department of Civil Engineering, University of Queensland; Brisbane, Australia. 1985.

CHAZARENC, F.; MERLIN, G.; GONTHIER, Y. Hydrodynamics of horizontal subsurface flow constructed wetlands, *Ecological Engineering*, v. 21, n. 2-3, p. 165–173, 2003.

CHERNICHARO, C. A. L.; AQUINO, S. F.; VON SPERLING, M.; STUETZ, R. M.; SANTOS, L. V.; MABUB, M. O. A.; MOREIRA, M. A.; VASCONCELOS, O. M. S. R.; GLÓRIA, R. M. Conceptual analysis of the UASB/Polishing Pond system regarding the removal of specific constituents and control of gaseous emissions. *Water Science and Technology*, v. 61, n. 5, p. 1211–1219, 2010.

CHARRU, F. *Hydrodynamic Instabilities*. [S.l.]: Cambridge University Press, 2011.

CHAUVON, G.; JUPSIN, H.; VAN DE WOUVER, A.; VON SPERLING, M.; VASEL, J-L. Dynamic modeling of a complete pond system. In: IWA SPECIALIST GROUP CONFERENCE ON WASTE STABILISATION PONDS, 11, 2016, Leeds. [*Anais...*] Leeds: IWA, 2016.

CHIATTI, F. C. F.; VON SPERLING, M. Influence of retention time, number of ponds and pond depth on nitrogen removal in shallow maturation ponds treating UASB reactor effluent. In: WORLD CONGRESS OF IWA - INTERNATIONAL WATER ASSOCIATION, 8, 2012. [*Anais...*] Busan: IWA, 2012.

CHOW, VEN TE. *Open-Channel Hydraulics*. New York: McGraw Hill, 1959, 680 p.

CHRYSIKOPOULOS, C. V.; KRUGER, P. *Chelated Indium Activable Tracers for Geothermal Reservoirs*. Califórnia: Stanford Geothermal Program, Stanford University, 1986. 94 p.

CHU, C. R.; SOONG, C. K. Numerical simulation of wind-induced entrainment in a stably stratified water basin. *Journal of Hydraulic Research*, v. 35, n. 1, p. 21-41, 1997.

COGGINS, L. X.; GHISALBERTI, M.; GHADOUANI, A. Sludge accumulation and distribution impact the hydraulic performance in waste stabilisation ponds. *Water Research*, v. 110, p. 354-365, 2017.

COSSIO, F. Y. *Lagunas de estabilización: teoría, diseño, evaluación y mantenimiento*. Quito: Opas/OMS, 1993. 421 p.

COSTA, M. C.; SANTOS, J.; SABOEIRO, F.; REIS, M. P.; NUNES, L.; CARVALHO DILL, A. Influência da maré no escoamento e no transporte observada durante o ensaio de traçadores com bacteriófagos no aquífero superior de Tróia. In: CONGRESSO DA ÁGUA, 6, 2002, Porto. [*Anais...*] Porto: APRH-Associação Portuguesa de Recursos Hídricos, 2002.

CRITES, R. W. Design criteria and practice for constructed wetlands. *Water Science and Technology*, v. 29, n. 4, p. 1-6, 1994.

DA-RIN, B. P. E.; NASCIMENTO, G. P. L. Acumulação de lodo em lagoas de estabilização. In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 21, 1988. v. 2. [Anais...], p. 216 – 228. 1988.

DAIGGER, G. T. A practitioner's perspective on the uses and future developments for wastewater treatment modeling. *Water Science and Technology*, v. 63, n. 3, p. 516-526, 2011.

D'CASTRO FILHO, F. J.; FLORÊNCIO, L.; GAVAZZA, S.; TAKAYUKI KATO, M. Característica do lodo acumulado em uma lagoa de polimento. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 23, 2005. [Anais...] Campo Grande: ABES, 2005.

DIAS, D. F. C.; PASSOS, R. G.; RODRIGUES, V. A. J.; MATOS, M. P.; SANTOS, C. R. S.; VON SPERLING, M. Performance evaluation of a natural treatment system for small communities, composed of a UASB reactor, maturation ponds (baffled and unbaffled) and a granular rock filter in series. *Environmental Technology*, Publicado online: 24 Mar 2017, p. 1-13, 2017.

DIAS, D. F. C.; POSSMOSER-NASCIMENTO, T. E.; RODRIGUES, V. A. J.; VON SPERLING, M. Overall performance evaluation of shallow maturation ponds in series treating UASB reactor effluent: ten years of intensive monitoring of a system in Brazil. *Ecological Engineering*, v. 71, p. 206-214, 2014.

DIERBERG, F. E.; DEBUSK, T. A. An evaluation of two tracers in surface-flow wetlands: rhodamine-WT and lithium, *wetlands*, v. 25, n. 1, p. 8-25, 2005.

DOR, I.; FURER, O.; ADIN, A.; BEN-YOSEF, N. Turbidity related to surface temperature in oxidation ponds: studies toward development of a remote sensing method. *Water Science and Technology*, v. 27, n. 7-8, p. 37-44, 1993.

DOREGO, N. C.; LEDUC, R. Characterization of hydraulic flow patterns in facultative aerated lagoons. *Water Science and Technology*, v. 34, n. 11, p. 99-106, 1996.

FARES, Y. R.; LLOYD, B. *Wind effects on residence time in waste stabilisation lagoons*. London: HYDRA 2000; Thomas Telford, 1995.

FARES, Y. R. Mixing processes in waste stabilization lagoon systems. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON HYDROSCIENCE AND ENGINEERING (ICHE-98), 3, 1998.

FERRARA, R. A.; HARLEMAN, D. R. Hydraulic modeling for waste stabilization ponds. *Journal of the Environmental Engineering Division - ASCE*, v. 107, n. 4, p. 817-830, 1981.

FINNEY, B.; MIDDLEBROOKS, E. Facultative waste stabilization pond design. *Journal of the Water Pollution Control Federation*, v. 51, n. 1, p. 134-147, 1980.

FONTANA, E. *Análise de Estabilidade da Convecção de Rayleigh-Bénard-Poiseuille Estratificada*. Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química - Florianópolis, SC, 2014. 235 p.

FREDERICK, G.; LLOYD, B. An evaluation of retention time and short-circuiting in waste stabilisation ponds using *Serratia marcescens* bacteriophage as a tracer. *Water Science and Technology*, v. 33, n.7, p. 49-56, 1996.

FRITZ, J. J.; MEREDITH, D. D.; MIDDLETON, A. C. Non-steady state bulk temperature determination for stabilization ponds. *Water Research*, v. 14, n. 5, p. 413–420, 1980.

FYFE, J. S.; HAGARE, D.; SIVAKUMAR, M. Physical and hydrodynamic characteristics of a dairy shed waste stabilisation pond system. *Water Science and Technology*, v. 55, n.11, p. 11-20, 2007.

GEBHART, B. *Heat conduction and mass diffusion*. New York: McGraw-Hill, 1993. 634 p.

GILLILAND, H. E.; CONLEY, F. R. Pilot Flood Mobilizes Residual Oil. *Oil and Gas J.*, v. 1, p. 43-48, 1976

GLOYNA, E. F. *Estanques de estabilización de águas residuales*. Organização Mundial da Saúde (Ed.), Genebra - Série de Monografias, n 60, 1973.

GLOYNA, E. F. *Waste Stabilization Ponds*. Geneva, WHO, 1971.

GODINHO, V. M.; NASCIMENTO, F. M. S.; SILVA, S. Q.; VON SPERLING, M.. 2011a. Occurrence and decay of pathogenic bacteria in a system comprised by a UASB reactor and polishing (maturation) ponds in series. In: IWA SPECIALIST GROUP CONFERENCE ON WASTE STABILISATION PONDS, 9, 2011, Adelaide. [Anais...] Adelaide: IWA, 2011a.

GODINHO, V. M.; SILVA, S. Q.; VON SPERLING, M.. 2011b. Quantification of *Escherichia coli* by fluorescent in-situ hybridization and chromogenic substrate techniques in a sewage treatment system comprised by a UASB reactor and polishing ponds in series. In: IWA SPECIALIST GROUP CONFERENCE ON WASTE STABILISATION PONDS, 9, 2011, Adelaide. [Anais...] Adelaide: IWA, 2011b.

GONÇALVES, R. F.(coordenador). *Gerenciamento do lodo de lagoas de estabilização não mecanizadas* – PROSAB/FINEP. Rio de Janeiro: ABES, 1999. 80p.

GONÇALVES, R. F.; NASCIMENTO, C. G.; FERRARI, G. F.; MULLER, P. S. G. Lodos de lagoas de estabilização em operação no espírito santo: formação e características. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 19, 1997, Foz do Iguaçu. [Anais...] Foz do Iguaçu: ABES, 1997.

GRANGER, R. A. *Fluid Mechanics*. New York: Dover Publications, 1995. 928 p.

HARVEY, R. W. Microorganisms as tracers in groundwater injection and recovery experiments: a review. *Microbiol. Rev.*, v. 20, n. 3-4, p. 461-472, 1997.

- HEADLEY, T. R.; KADLEC, R. H. Conducting hydraulic tracer studies of constructed wetlands: a practical guide. *Ecohydrology and Hydrobiology*, v. 7, n. 3-4, p. 269-282, 2007.
- HERDIANTO, R.; FALLOWFIELD, H.; CROMAR, N.; NIXON, J.; SWEENEY, D. Modeling the Hydraulics of Waste Stabilization Ponds with Computational Fluid Dynamics (CFD): A Predicting Tool for Algal Removal. *POLI REKAYASA*, v. 5, n. 2, p. 109-115, 2010.
- INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. *Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa*. 6 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. 644p.
- JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A. *Tratamento de Esgotos Domésticos*. 6 ed. Rio de Janeiro: ABES, 2011. 1050 p.
- JOSANTO, V.; SARMA, R. V. Coastal circulation off Bombay in relation to wastewater disposal. *Mahasagar – Bulletin of the National Institute of Oceanography*, v. 18, n. 2, p. 333 – 345, 1985.
- KADLEC, R. H.; WALLACE, R. D. *Treatment Wetlands*. 2 ed. Florida: CRC Press, 2009, 1016 p.
- KARTERIS, A.; PAPADOPOULOS, A.; BALAFOUTAS, G. Modeling the temperature pattern of a covered anaerobic pond with computational fluid dynamics. *Water Air and Soil Pollution*, v. 162, n. 1-4, p. 107-125, 2005.
- KAYOMBO, S.; MBWETTE, T. S. A.; KATIMA, J. H. Y.; LADEGAARD, N.; JORGENSEN, S. E. *Waste Stabilization Ponds and Constructed Wetlands Design Manual*. Dar es Salaam/Copenhagen: United Nations Environmental Program - International Environmental Technology Centre (UNEP-IETC) and Danish International Development Agency (Danida), 2004.
- KEEFE, S. H.; BARBER, L. B.; RUNKEL, R. L.; RYAN, J. N.; MCKNIGHT, D. M.; WASS, R. D. Conservative and reactive solute transport in constructed wetlands. *Water Resources Research*, v. 40, n. 1, p. 1-12, 2004.
- KELLNER, E.; MOREIRA, J. F. V.; PIRES, E. C. Influência da estratificação térmica no volume útil e no comportamento hidrodinâmico de lagoa de estabilização: determinação experimental e teórica. *Revista Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 14, n. 1, p. 129 – 138, 2009.
- KELLNER, E.; PIRES, E. C. *Lagoas de estabilização: projeto e operação*. Rio de Janeiro: ABES, 1998. 244 p.
- KELLNER, E.; PIRES, E.C. The influence of thermal stratification on the hydraulic behavior of waste stabilization ponds. *Water Science and Technology*, v. 45, n. 1, p. 41-48, 2002.
- KHAN, A. A.; GAUZ, R. Z.; TYAGI, V. K.; LEW, B.; MEHROTRA, I; KAZMI, A. A. Sustainable options of post treatment of UASB effluent treating sewage: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 55, ed. 12, p. 1232-1251, 2011.

KUJAWA-ROELEVELD, K.; ZEEMAN, G. Anaerobic Treatment in Decentralised and Source-Separation-Based Sanitation Concepts. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, v. 5 n. 1, p. 115-139, 2006.

LANGE J.; SCHÜTZ T.; GREGOIRE C.; ELSÄSSER D.; SCHULZ R.; PASSEPORT E.; TOURNEBIZE J. Multi-tracer experiments to characterise contaminant mitigation capacities for different types of artificial wetlands. *International Journal of Environmental and Analytical Chemistry*, v. 91, n. 7-8, p. 768-785, 2011.

LANGMUIR, I. Surface motion of water induced by wind. *Science*, v. 87, n. 2250, p. 119-123, 1938.

LAUNDER, B. E.; SPALDING, D. B. The numerical computation of turbulent flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, v. 3, n. 2, p. 269-289, 1974

LAURENT, J.; SAMSTAG, J. M.; DUCOSTE, J. M.; GRIBORIO, A.; NOPENS, I. BATSTONE, D. J.; WICKS, J. D.; SAUNDERS, S.; POTIER, O. A protocol for the use of computational fluid dynamics as a supportive tool for wastewater treatment plant modelling. *Water Science and Technology*, v. 70, n. 10, p. 1575–1584, 2014.

LE MOULLEC, Y.; GENTRIC, C.; POTIER, O.; LECLERC, J. P. CFD Simulation of the hydrodynamics and reactions in an activated sludge channel reactor of wastewater treatment. *Chemical Engineering Science*, v. 65, n. 1, p. 492–498, 2010.

LEVENSPIEL, O. *Engenharia das Reações Químicas*. São Paulo: Edgard Blugher, 2000. 563p.

LIN, A. Y. C.; DEBROUX, J. F.; CUNNINGHAM, J. A.; REINHARD, M. Comparison of rhodamine WT and bromide in the determination of hydraulic characteristics of constructed wetlands. *Ecological Engineering*, v. 20, n. 1, p. 75–88, 2003.

LISEIKIN, V. D. *Grid generation methods*. 1 ed. Berlin: Springer, 1999.

LLOYD, B. J.; VORKAS, C. A.; GUGANESHARAJAH, R. K. Reducing hydraulic short-circuiting in maturation ponds to maximize pathogen removal using channels and wind breaks. *Water Science and Technology*, v. 48, n. 2, p. 153-162, 2003.

MACDONALD, R.; ERNST, A. Disinfection efficiency and problems associated with maturation ponds. *Water Science and Technology*, v. 18, n. 10, p. 19-29, 1986.

MACEDO, J. A. B. *Águas & Águas*, 3ª ed., CRQ-MG, 2007. 1043 p.

MANNEVILLE, P. Rayleigh-Bénard convection, thirty years of experimental, theoretical, and modeling work. In: Mutabazi, I.; Wesfreid, J. E.; Guyon, E. (Ed.) *Dynamics of Spatio-Temporal Cellular Structures - Henri Bénard Centenary Review*. New York: Springer, 2006. p. 41-65.

MANGELSON, K. *Hydraulics of Waste Stabilization Ponds and its Influence on Treatment Efficiency*. 1971. Thesis - Department of Civil Engineering, Utah State University; Utah, USA, 1971.

MANGELSON, K. A.; WATTERS, G. Z. Treatment efficiency of waste stabilization ponds. *Journal of the Sanitary Engineering Division - ASCE*, v. 98, n. 2, p. 407-425, 1972.

MAYO, A. W. Modeling coliform mortality in waste stabilization ponds. *Journal of Environmental Engineering*, v. 121, n. 2, p. 140-152, 1995.

MARA, D.; ALABASTER, G. P.; PEARSON, H. W.; MILLS, S. W. *Waste Stabilization Ponds: A Design Manual for Eastern Africa*. Lagoon Technology International, Leeds, England, 1992

MARA, D. D. *Domestic wastewater. treatment in developing countries*. London: Earthscan, 2004. 293 p.

MARA, D. D. Waste stabilization ponds: past, present and future. *Desalination and Water Treatment*, v. 4, n. 1-3, p. 85-88, 2009.

MARECOS DO MONTE, M. H. F. *Hydraulic Dispersion in Waste Stabilization Ponds in Portugal*. PhD Thesis; Department of Civil Engineering, University of Leeds; Leeds, 1985.

MARECOS DO MONTE, M. H. F.; MARA, D. D. The hydraulic performance of waste stabilization ponds in Portugal. *Water Science and Technology*. v. 19, n. 12, p. 219-277, 1987.

MARRIOTT, M. J.; JAYARATNE, R. Hydraulic roughness – links between Manning's coefficient, Nikuradse's equivalent sand roughness and bed grain size. In: *Proceedings of Advances in Computing and Technology, (AC&T) The School of Computing and Technology 5th Annual Conference*, pp. 27-32, University of East London, England, 2010.

MARSHALL, P.; JOHNS, M. R.; GREENFIELD, P. F. Is there a future for wastewater treatment ponds?. In: *Proceedings of the 15<sup>th</sup> Federal Convention of the AWWA*, pp. 516-522, Gold Coast, Australia, 1993.

MARTIN, K.; DUNLAP, J.; BRUNE, D. A technique for predicting advective transport in aquacultural ponds. In: INTERNATIONAL WINTER MEETING OF THE AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS, 1990, Chicago, Illinois. [*Proceedings...*], Chicago, 1990.

MARSKE, D. M.; BOYLE, J. D. Chlorine contact chamber design - a field evaluation. *Water and Sewage Works*, v. 120, n. 1, p. 70-77, 1973.

MATOS, M. P.; VON SPERLING, M.; MATOS, A. T.; PASSOS, R. G. Uso de traçador salino para avaliação da colmatação e das condições hidrodinâmicas em sistemas alagados construídos de escoamento horizontal subsuperficial. *Eng. Agríc., Jaboticabal*, v. 35, n. 6, p. 1137-1148, 2015.

MEIRELES, M. Estimativa da evapotranspiração real pelo emprego do algoritmo SEBAL e imagem Landsat 5-TM na bacia do Acaraú-CE. 2007. 89 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2007.

MENDONÇA, S. R. *Lagoas de estabilização e aeradas mecanicamente: novos conceitos*. João Pessoa, PB, 1990. 388 p.

MENESES, C. G. R. *Evolução da biodegradabilidade da matéria orgânica em um sistema de lagoas de estabilização*. 2006. 120 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2006.

MENTER, F. R. Influence of freestream value on k- $\omega$  turbulence model predictions. *American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal*, v. 30, n. 6, p. 1657- 1659, 1992.

METCALF E EDDY. *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*. 4 ed. New York: McGraw-Hill, 2003. 1819 p.

MORENO, M. D. A tracer study of the hydraulics of facultative stabilization ponds. *Water Research*, v. 24, n. 8, p. 1025-1030, 1990.

MURPHY, C. Quantifying the impact of sludge accumulation on the hydraulic performance of waste stabilisation ponds. Honours, The University of Western Australia, 2012.

NAMECHE, T.; CHABIR, D.; VASEL, J. L. Characterization of sediments in aerated lagoons and waste stabilization ponds. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, v. 68, n. 2, p. 257-279, 1997.

NAMECHE, T.; VASEL, J. Hydrodynamic studies and modelization for aerated lagoons and waste stabilization ponds. *Water Research*, v. 32, n. 10, p. 3039-3045, 1998.

NELSON, K. L.; CISNERO, B. J.; TCHOBANOGLIOUS, G.; DARBY, J. L. Sludge accumulation, characteristics, and pathogen inactivation in four primary waste stabilization ponds in central Mexico. *Water Research*, v. 38, n. 1, p. 111-127, 2004.

NICÁCIO, R. M. Evapotranspiração real e umidade do solo usando dados de sensores orbitais e a metodologia SEBAL na bacia do rio São Francisco. 2008. 337 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2008.

OAKLEY, S. M.; MENDOCA, L. C.; MENDOCA, S. R. Sludge removal from primary wastewater stabilization ponds with excessive accumulation: a sustainable method for developing regions. *Journal of Water, Sanitation, and Hygiene for Development*, v. 2, n. 2, p. 68-78, 2005.

OLIVEIRA, G.; MORAS, E. C.; SHIMABUKURU, Y. E.; RUDORFF, B. F. T.; ALVALÁ, R. C. S.; SANTOS, T. V. Avaliação do albedo em diferentes tipos de uso e cobertura da terra no sudoeste da Amazônia. In: XVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO - SBSR, 16, 2013, Foz do Iguaçu. [Anais...] Foz do Iguaçu: INPE, 2013.

OLIVEIRA, R.; PEARSON, H. W.; SILVA, J. V. N.; SOUSA, J. T.; LEITE, V. D.; LOPES, W. S. Baffled primary facultative ponds with inlets and outlets set at different levels treating domestic wastewater in northeast Brazil. *Water Science and Technology*, v. 63, n. 6, p. 1183-1187, 2011.

OLIVEIRA, S. M. A. C.; VON SPERLING, M. Assessment of classical surface organic loading design equations based on the actual performance of primary and secondary facultative ponds. *Water Science and Technology*, v. 61, n. 4, p. 971-977, 2010.

OLIVEIRA, S. M. A. C.; VON SPERLING, M. Performance evaluation of different wastewater treatment technologies operating in a developing country. *Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development*, v. 1, n. 1, p. 37-56, 2011.

OLUKANNI, D. O.; DUCOSTE, J. J. Optimization of waste stabilization pond design for developing nations using computational fluid dynamics. *Ecological Engineering*, v. 37, n. 11, p. 1878 – 1888, 2011.

OUEDRAOGO, F. R.; ZHANG, J.; CORNEJO, P. K.; ZHANG, Q.; MIHELICIC, J. R.; TEJADA-MARTINEZ, A. E. Impact of sludge layer geometry on the hydraulic performance of a waste stabilization pond. *Water Research*. v. 99, p. 253-262, 2016.

PASSOS, R. G. *Avaliação de desempenho de lagoas de estabilização por meio de dados de monitoramento e modelagem em fluidodinâmica computacional (CFD)*. Belo Horizonte: UFMG, 2012. 278 p. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, 2012.

PASSOS, R. G.; RIBEIRO, T. B.; VON SPERLING, M. Avaliação da acumulação e distribuição espacial de lodo em um sistema composto por lagoa facultativa e lagoa de maturação após 27 anos de operação. In: XV SILUBESA - CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 15, 2012, Belo Horizonte. [Anais...] Belo Horizonte: ABES, 2012.

PASSOS, R. G.; VON SPERLING, M.; RIBEIRO, T. B. (2014a) Hydrodynamic evaluation of a full-scale facultative pond by computational fluid dynamics (CFD) and field measurements. *Water Science and Technology*, v. 70, n. 3, 569–575, 2014.

PASSOS, R. G.; VON SPERLING, M.; RIBEIRO, T. B. (2014b) Performance evaluation and spatial sludge distribution at facultative and maturation ponds treating wastewater from an international airport. *Water Science and Technology*, v. 70, n. 2, 226–233, 2014.

PEARSON, H. W.; MARA, D. D.; ARRIDGE, H. M. The influence of pond geometry and configuration on facultative and maturation waste stabilisation pond performance and efficiency. *Water Science and Technology*, v. 31, n.12, p. 129-139, 1995.

PEDAHZUR, R.; NASSER, A. M.; DOR, I.; FATTAL, B.; SHUVAL, H. I. The effect of baffle installation on the performance of a single-cell stabilization pond. *Water Science and Technology*, v. 27, n. 7–8, p. 45–52, 1993.

PEÑA, M.; MARA, D. D. *Waste Stabilisation Ponds*. IRC, International Water and Sanitation Centre, 2004.

PEÑA, M.; MARA, D. D.; SANCHEZ, A. Dispersion studies in anaerobic ponds: implications for design and operation. *Water Science and Technology*, v. 42, n.10, p. 273–282, 2000.

PERSSON, J.; SOMES, N. L. G.; WONG, T. H. F. Hydraulics efficiency of constructed wetlands and ponds. *Water Science and Technology*, v. 40, n. 3, p. 291–300, 1999.

PERSSON, J. The hydraulic performance of ponds of various layouts. *Urban Water*, v. 2, n. 3, p. 243-250, 2000.

- PETERSON, E. L.; HARRIS, J. A.; WADHWA, L. C. CFD modelling pond dynamic processes. *Aquacultural Engineering*, v. 23, n. 1-3, p. 61-93, 2000.
- PICOT, B.; SAMBUCCO, J. P.; BROUILLET, J. L.; RIVIERE, Y. Wastewater stabilisation ponds: sludge accumulation, technical and financial study on desludging and sludge disposal case studies in France. *Water Science and Technology*, v. 51, n. 12, p. 227-234, 2005.
- PIEGL, L.; TILLER, W. *The NURBS Book*. 2 ed. New York: Springer, 1997. 646p.
- PINHEIRO, L. A. R.; CUNHA, A. C.; CUNHA, H. F. A.; SOUZA, L. R.; BIHALVA, J. S.; BRITO, D. C.; BRASIL JÚNIOR, A. C. P. Aplicação de simulação computacional à dispersão de poluentes no baixo Rio Amazonas: potenciais riscos à captação de água na orla de Macapá-Amapá. *Amazônia: Ciência. & Desenvolvimento*, v. 4, n. 7, p. 7-24, 2008.
- POLPRASERT, C.; BHATTARAI, K. K. Dispersion model for waste stabilization ponds. *Journal of Environmental Engineering*, v. 111, n. 1, p. 45-59, 1985.
- POSSMOSER-NASCIMENTO, T. E. *Lodo em lagoas de polimento: acúmulo e implicações no comportamento hidrodinâmico e no desempenho do sistema*. 2014. 117 p. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.
- POSSMOSER-NASCIMENTO, T. E.; RODRIGUES, V. A. J.; VON SPERLING, M. Acumulação e distribuição espacial do lodo em um sistema de lagoas de polimento em série. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 27, 2013, Goiânia. [Anais...] Goiânia: ABES, 2013.
- POSSMOSER-NASCIMENTO, T. E.; RODRIGUES, V. A. J.; VON SPERLING, M.; VASEL, J-L.; Sludge accumulation in shallow maturation ponds treating UASB reactor effluent: results after 11 years of operation. *Water Science and Technology*, v. 70, n. 2, p. 321-328, 2014.
- RACAULT, Y.; BOUTIN, P.; DOUAT, J. Etude par tracage du comportement hydraulique d'une lagune d'épuration: influence de la géométrie du bassin. *Revue Française des Sciences de L'eau*, v. 3, n. 2, p. 197-218, 1984.
- REED, S. H.; CRITES, R. W.; MIDDLEBROOKS, E. J. *Natural systems for waste management and treatment*. 2<sup>nd</sup> ed. New York: McGraw-Hill, 1995.
- REICHERT, P.; BORCHARDT, D.; HENZE, M.; RAUCH, W.; SHANAHAN, P.; SOMLYODY, L.; VANROLLEGHEM, P. River water quality model no.1: biochemical process equations. *Water Science and Technology*, v. 43, n. 5, p. 11-30, 2001.
- RHINOCEROS 3D® v. 4.0 – NURBS modeling for windows, v. 4.0 SR9, 2011.
- RODRIGUES, V. A. J.; POSSMOSER-NASCIMENTO, T. E.; DIAS, D. F. C.; PASSOS, R. G.; VON SPERLING, M.; VASEL, J-L.; Performance comparison between two equal stabilization ponds operating with and without sludge layer. *Water Science and Technology*, v. 71, n. 6, p. 929-937, 2015.

ROSSI, P.; DÖRFLIGER, N.; KENNEDY, K.; MÜLLER, I.; ARAGNO, M. Bacteriophages as surface and ground water tracers. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 2, n. 1, p. 101-110, 1998.

SAH, L.; ROUSSEAU, D. P. L.; HOOIJMANS, C. M.; LENS, P. N. L. 3D model for a secondary facultative pond. *Ecological Modelling*, v. 222, n. 9, p. 1592-1603, 2011.

SAH, L.; ROUSSEAU, D. P. L.; HOOIJMANS, C. M. Numerical modelling of waste stabilization ponds: where do we stand?. *Water Air and Soil Pollution*, v. 223, n. 6, p. 3155-3171, 2012.

SALTER, H. E. *Enhancing the Pathogen Removal Performance of Tertiary Lagoons*. Thesis - Centre for Environmental Health Engineering, University of Surrey, Guildford, 1999.

SALTER, H. E.; TA, C. T.; WILLIAMS, S. C. Three-dimensional computational fluid dynamic modelling of a facultative lagoon. *Water Science and Technology* v. 42, n. 10-11, p. 335-342, 2000.

SANTOS, A. B.; MOTA, S.; BEZERRA, F. M. Fruits produced with wastewater treated in stabilization ponds systems: evaluation in a quality prospective. International Water Association, In: IWA SPECIALIST CONFERENCE ON WASTE STABILIZATION PONDS, 86, 2009, Belo Horizonte. [Anais...] Belo Horizonte: IWA, 2009.

SARAIVA, L. B.; MENESES, C. G. R.; MELO, H. N. S.; ARAÚJO, A. L. C.; PEARSON, H. Determination of the sedimentation constants for total suspended solids and the algal component in a full-scale primary facultative pond operating at high wind velocities under tropical conditions. *Water Science and Technology*, v. 51, n. 12, p. 213-216, 2005.

SASSAKI, R. A. *Distribuição de tempos de residência em sistemas alimentados com vazão variável*. 2005. 89 p. Dissertação (Mestrado em Ciências – Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

SCHÄFER, T.; GECKEIS, H.; BOUBY, M.; FANGHÄNEL, T. U, Th, Eu and colloid mobility in a granite fracture under near-natural flow conditions. *Radiochimica Acta/International journal for chemical aspects of nuclear science and technology*, v. 92, n. 9-11, p. 731-737, 2004.

SCHLICHTING, H. *Experimental Investigation of the Problem of Surface Roughness*, NACA TM-832, National Advisory Committee on Aeronautics, 1936.

SCHLICHTING, H.; GERSTEN, K. *Boundary-layer theory*, 8 ed. Berlin: Springer, 2003.

SENZIA, M. A.; MAYO, A. W.; MBWETTE, T. S. A.; KATIMA, J. H. Y.; JORGENSEN, S. E. Modelling nitrogen transformation and removal in primary facultative ponds. *Ecological Modelling*, v. 154, p. 207-215, 2002.

SHAW, J. K. E.; WATT, W. E.; MARSALEK, J.; ANDERSON, B. C. Flow pattern characterization in an urban stormwater detention pond and implications for water quality. *Journal of Water Quality Research*, v. 32, n. 1, p. 53-71, 1997.

- SHILTON, A.; BAILEY, D. Drogue tracking by image processing for the study of laboratory scale pond Hydraulics. *Flow Measurement and Instrumentation*, v. 17, n. 69–74, 2006.
- SHILTON, A.; GLYNN, D.; PHELPS, P. An inside look - the potential of CFD technology. *Water 21*, n. 1.1, p. 37-38, 1999.
- SHILTON, A.; HARRISON, J. (2003a) Development of guidelines for improved hydraulic design of waste stabilization ponds. *Water Science and Technology*, v. 48, n. 2, p. 173-180, 2003.
- SHILTON, A.; HARRISON, J. (2003b) *Guidelines for the Hydraulic Design of Waste Stabilization Ponds*. Institute of Technology and Engineering, Massey University. Palmerston North, 2003.
- SHILTON, A.; HARRISON, J. (2003c) Integration of coliform decay within a CFD (computational fluid dynamic) model of a waste stabilisation pond. *Water science and technology*, v. 48, n. 2, p. 205-210, 2003.
- SHILTON, A.; KERR, M. Field measurements of in-pond velocities by a drogue and survey technique. *Proceedings of the 4th IAWQ Specialist Group Conference on Waste Stabilisation Ponds*. Pearson, H. (Ed). Marrakech, Morrocos, 1999.
- SHILTON, A.; KREEGHER, S.; GRIGG, N. Comparison of computation fluid dynamics simulation against tracer data from a scale model and full-sized waste stabilization pond. *Journal of Environmental Engineering - ASCE*, v. 134, n. 10, p. 845-850, 2008.
- SHILTON, A.; MARA, D. D. CFD (computational fluid dynamics) modelling of baffles for optimizing tropical waste stabilization pond systems. *Water Science and Technology*, v. 51, n. 12, p. 103-106, 2005.
- SHILTON, A. *Pond treatment technology*. London: IWA Publishing, 2005. 479 p.
- SHILTON, A. Potential application of computational fluid dynamics to pond design. *Water Science and Technology*, v. 42, n. 10-11, p. 327-334, 2000.
- SHILTON, A. *Studies into the hydraulics of waste stabilisation ponds*. 2001. 280 p. PhD Thesis (PhD in Environmental Engineering) – Turitea Campus, Massey University, New Zealand, 2001.
- SHILTON, A.; WILKS, T.; SMYTH, J.; BICKERS, P. Tracer studies of a New Zealand waste stabilisation pond, analysis of treatment efficiency. *Water Science and Technology*, v. 42, n.10-11, p. 343-348, 2000.
- SHORT, M. D.; CROMAR, N. J.; FALLOWFIELD, H. J. Hydrodynamic performance of pilot-scale duckweed, algal-based, rock filter and attached growth media reactors used for waste stabilisation pond research. *Ecological Engineering*, v. 36, n. 12, p. 1700-1708, 2010.
- SIMI, A. L.; MITCHELL, C. A. Design and hydraulic performance of a constructed wetland treating oil refinery wastewater. *Water Science Technology*, v. 40, n. 9, p. 301-307, 1999.

SILVA, L. L.; DONNICI, C. L.; AYALA, J. D.; FREITAS, C. H.; MOREIRA, R. M.; PINTO, A. M. F. Traçadores: o uso de agentes químicos para estudos hidrológicos, ambientais, petroquímicos e biológicos. *Química Nova*, v. 32, n. 6, p. 1576-1585, 2009.

SILVA, S. A.; MARA, D. D. *Tratamento de águas residuárias – Lagoas de estabilização*. Rio de Janeiro: ABES, 1979.

SILVA, S. A. *On the treatment of domestic sewage in waste stabilization ponds in northeast Brazil*. 1982. 203 p. PhD Thesis - University of Dundee. U.K. 1982.

SMART, P. L. A review of the toxicity of twelve fluorescent dyes used for water tracing. *National Speleological Society Bulletin*, v. 46, n. 2, p. 21-33, 1984.

SMART, P. L.; LAIDLAW, I. M. S. Evaluation of some fluorescent dyes for water tracing, *Water Resources Research*, v. 13, n. 1, p. 15-33, 1977.

SNIS – SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. *Diagnóstico dos serviços de água e esgotos*. Brasília: MCIDADES, 2012.

SOARES, A. M. E.; VON SPERLING, M.; CHERNICHARO, C. A. L.; MELO, M. C. Avaliação da remoção de patogênicos em lagoas de estabilização com diferentes relações geométricas tratando efluente de um reator UASB compartimentado. In: C.A.L. Chernicharo (coord.), *Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios: Coletânea de Trabalhos Técnicos*, v. 1, p. 57-66, PROSAB/FINEP, Belo Horizonte, 2000.

SOBREMISANA, A. P.; DUCOSTE, J. J.; DE LOS REYES III, F. L. Combining CFD, flocc dynamics and biological reaction kinetics to model carbon and nitrogen Removal in activated sludge system. In: PROCEEDINGS OF THE 83RD ANNUAL WATER ENVIRONMENT FEDERATION TECHNICAL CONFERENCE AND EXPOSITION, Los Angeles, CA, EUA, 2011.

SOUZA, V. A. S.; HELBEL, A. F.; JANZEN, J. G.; DIAS, R. H. S.; COLTRE, H. C. S. Simulação computacional do comportamento hidrodinâmico em lagoas facultativas com chicanas. *Ciência & Engenharia (Science & Engineering Journal)*, v. 21, n. 1, p. 15-21, 2012.

STAFFORD, D.; HAWKES, D.; HORTON, R. *Methane Production from Waste Organic Matter*, CRC press, Florida, 1981. 285 p.

STAMOU, A. I.; ADAMS, E. W. Study of the hydraulic behavior of a model settling tank using flow through curve and flow patterns. Rep. No. SFB 210/E/36, Sonderforschungsbereich 210, Univ.Karlsruhe, Karlsruhe, Germany, 1988.

SUHOGUSOFF, A. V.; CROMAR, N. J.; HIRATA, R.; FERRARI, L. C. Adsorção do traçador fluorescente Uranina em sedimentos quaternários da bacia de São Paulo. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 35, n. 4, p. 551-558, 2005.

SWEENEY, D. G.; CROMAR, N. J.; NIXON, J. B.; TA, C. T.; FALLOWFIELD, H. J. The spatial significance of water quality indicators in waste stabilization ponds – limitations of residence time distribution analysis in predicting treatment efficiency. *Water Science and Technology*, v. 48, n. 2, p. 211-218, 2003

- SWEENEY, D. G. *Integrating biological and hydraulic aspects of waste stabilization ponds*. PhD Thesis - Flinders University, Adelaide, 2004.
- SWEENEY, D. G.; NIXON, J. B.; CROMAR, N. J.; FALLOWFIELD, H. J. Profiling and modelling of thermal changes in a large waste stabilisation pond. *Water Science and Technology*, v. 55, n. 11, p. 1-9, 2007.
- SWEENEY, D. G.; NIXON, J. B.; CROMAR, N. J.; FALLOWFIELD, H. J. Temporal and spatial variation of physical, biological, and chemical parameters in a large waste stabilization pond, and the implications for WSP modelling. *Water Science and Technology*, v. 51, n. 12, p. 163-172, 2005.
- TA, C. T.; BRIGNAL, W. J. Application of computational fluid dynamics technique to storage reservoir studies. *Water Science and Technology*, v. 37, n. 2, p. 219-226, 1998.
- TCHOBANOGLIOUS, G.; SCHROEDER, E. D. *Water quality: characteristics, modelling, modification*. Michigan: Addison-Wesley, 1985, 768 p.
- TEIXEIRA, E. C.; SIQUEIRA, R. N. Performance Assessment of Hydraulic Efficiency Indexes. *Journal of Environmental Engineering*, ASCE, v. 134, p. 851-859, 2008.
- THACKSTON, E.; SHIELDS, F.; SCHROEDER, P. Residence time distributions of shallow basins. *Journal of the Environmental Engineering Division - ASCE*, v. 113, n. 6, p. 1319-1333, 1987.
- THIRUMURTHI, D. A break-through in the tracer studies of sedimentation tanks. *J. Water Pollut. Control Fed.*, v. 41, n. 11, p. R405-R418, 1969.
- TOMS, I.; OWENS, M.; HALL, J.; MINDENHALL, M. Observations on the performance of polishing lagoons at a large regional works. *Water Pollution Control*, v. 74, n. 4, p. 383-401, 1975.
- TORRES, J. J.; SOLER, A. J.; SÁEZ, J.; ORTUNO, J. F. Hydraulic performance of a deep wastewater stabilization pond. *Water Research*, v. 31, n.4, p. 679-688, 1997.
- TORRES, J. J.; SOLER, A.; SÁEZ, L. M.; LEAL, M.; AGUILAR, M. I. Study of the internal hydrodynamics in three facultative ponds of two municipal WSPS in Spain. *Water Research*. v. 33, n. 5, p. 1133-1140, 1999.
- TORRES, J. J.; SOLER, A. J.; SÁEZ, J.; LLORENS, M. Hydraulic performance of a deep stabilization pond fed at 3.5m depth. *Water Research*, v. 34, n.3, p. 1042-1049, 2000.
- TU, J.; YEOH, G.; LIU, C. *Computational Fluid Dynamics - A Practical Approach*. 2 ed. United Kingdom: Butterworth-Heinemann, 2012. 440 p.
- TUNDISI, J. G.; TUNDISI, T. M. *Limnologia*. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.
- UEHARA, M. Y.; VIDAL, W.L. *Operação e manutenção de lagoas anaeróbias e facultativa*. São Paulo: CETESB, 1989. 89 p.

UHLMANN, D. BOD removal rates of waste stabilization ponds as a function of loading, retention time, temperature and hydraulic flow pattern. *Water Research*, v. 13, n. 2, p. 193–200, 1979.

UKPONG, E. C.; AGUNWAMBA, J. C.; EGBUNIWE, N. (2006a) Stratification in waste stabilization ponds I: effects on pond parameters. *Nigerian Journal of Technology*, v. 25, n. 2, p. 46-59, 2006.

UKPONG, E. C.; AGUNWAMBA, J. C.; EGBUNIWE, N. (2006b) Stratification in waste stabilization ponds II: modelling. *Nigerian Journal of Technology*, v. 25, n. 2, p. 46-59, 2006.

UKPONG, E. C. Modeling Wind Effect on Waste Stabilization Pond Performance. *International Journal of Applied Science and Technology*, v. 3, n. 4, p. 13-26, 2013.

ULUATAM, S.; KURUM, Z. Evaluation of the wastewater stabilisation pond at the METU treatment plant. *International Journal of Environmental Studies*, v. 41, n. 1-2, p. 71-80, 1992.

VAN DORN, W. Wind stress on an artificial pond. *Journal of Marine Research*, v. 12, n. 3, p. 249-276, 1953.

VEGA, G. P.; PEÑA, M. R.; RAMÍREZ, C. MARA, D. D. Application of CFD modelling to study the hydrodynamics of various anaerobic pond configurations. *Water Science and Technology*, v. 48, n. 2, p. 163-171, 2003.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. 2. ed. United Kingdom: Prentice Hall, 2007. 503 p.

VIDAL, W. L. Aperfeiçoamentos hidráulicos no projeto de lagoas de estabilização, visando redução da área de tratamento: uma aplicação prática. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 12, 1983, Balneário de Camburiú. [Anais...] Balneário de Camburiú: ABES, 1983.

VON SPERLING, M.; ANDRADA, J. G. B. Simple wastewater treatment (UASB reactor, shallow polishing ponds, coarse rock filter) allowing compliance with different reuse criteria. *Water Science and Technology*, v. 54, n. 11–12, p. 199–205, 2006.

VON SPERLING, M.; BASTOS, R. K. X.; KATO, M. T. Removal of *E. coli* and helminth eggs in UASB / polishing pond systems in Brazil. *Water Science and Technology*, v. 51, n. 12, p. 91-97, 2005.

VON SPERLING, M.; CHERNICHARO, C. A. L. *Biological Wastewater Treatment in Warm Climate Regions*. Two volumes. London: IWA Publishing, 2005.

VON SPERLING, M. Comparison of simple, small, full-scale sewage treatment systems in Brazil: UASB–maturation ponds–coarse filter; UASB–horizontal subsurface-flow wetland; vertical-flow wetland (first stage of French system). *Water Science and Technology*, v. 71, n. 3, p. 329–337, 2015.

VON SPERLING, M.; MASCARENHAS, L. C. A. M. Performance of very shallow ponds treating effluents from UASB reactors. *Water Science and Technology*, v. 51, n. 12, p. 83–90, 2005.

VON SPERLING, M. Modelling of coliform removal in 186 facultative and maturation ponds around the world. *Water Research*, 39, p. 5261-5273, 2005.

VON SPERLING, M.; OLIVEIRA, C. M.; ANDRADA, J. G. B.; GODINHO, V. M.; ASSUNÇÃO, A. L.; MELO JUNIOR, W. Performance evaluation of a simple wastewater treatment system comprised by UASB reactor, shallow polishing ponds and coarse rock filter. *Water Science and Technology*, v. 58, n. 6, p. 1313–1319, 2008.

VON SPERLING, M. Performance evaluation and mathematical modelling of coliform die-off in tropical and subtropical waste stabilization ponds. *Water Research*, v. 33, n.6, p. 1435-1448, 1999.

VON SPERLING, M. *Waste Stabilization Ponds*. London: IWA Publishing, 2007. 162 p.

VORKAS, C.; LLOYD, B. The application of a diagnostic methodology for the identification of hydraulic design deficiencies affecting pathogen removal. *Water Science and Technology*, v. 42, n. 10-11, p. 99-110, 2000.

WATSON, J. T.; HOBSON, J. A. *Hydraulic design considerations and control structures for constructed wetlands for wastewater treatment*. In D. A. HAMMER (Ed.), *Constructed wetlands for wastewater treatment municipal industrial and agricultural*. Chelsea, Michigan, USA: Lewis Publishers, 1989.

WATTERS, G.; MANGELSON, K.; GEORGE, R. *The Hydraulics of Waste Stabilization Ponds*. Research Report. Utah Water Research Laboratory, College of Engineering, Utah State University, USA, 1973.

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

WEN, X.; QIAN, Y. A Study on the Hydraulics of Waste Stabilization Pond. *Journal of Environmental Sciences*, v. 3, n. 2, p. 75-88, 1991.

WHITMER, S.; BAKER, L.; WASS, R. Loss of bromide in a wetland tracer experiment. *Journal of Environmental Quality*, v. 29, p. 2043-2045, 2000.

WHO. *UM-Water global analysis and assessment of sanitation and drinking –water (GLAAS-2014)*. Publicações da WHO, Genebra, Suíça. 2014.

WICHERN, M.; GEHRING, T.; LÜBKEN, M. Modeling of biological systems. In: *IWA Treatise on Water Science - Water-Quality Engineering*, v. 4, p. 231-263, 2011.

WICKLEIN, E.; BATSTONE, D. J.; DUCOSTE, J.; LAURENT, J.; GRIBORIO, A.; WICKS, J.; SAUNDERS, S.; SAMSTAG, R.; POTIER, O.; NOPENS, I. Good modelling practice in applying computational fluid dynamics for WWTP modelling. *Water Science and Technology*, v. 73, n.5, p. 969-981, 2016.

WILCOX, D. C. Comparison of two-equation turbulence models for boundary layers with pressure gradient. *AIAA Journal*, v. 31, n. 8, p. 1414-1421, 1993.

WILCOX, D. C. Reassessment of the scale-determining equation for advanced turbulence models. *AIAA Journal*, v. 26, n. 11, p. 1299-1310, 1988.

WILCOX, D. C. Simulation of Transition with a Two-Equation Turbulence Model, *AIAA Journal*, v. 32, n. 2, p. 247-255, 1994.

WILCOX, D. C. *Turbulence Modeling for CFD*, 3rd edition, La Canada CA: DCW Industries, Inc., 2006.

WILLIAMS, C. F.; NELSON, S. D. Comparison of Rhodamine-WT and bromide as a tracer for elucidating internal wetland flow dynamics. *Ecological Engineering*, v. 37, n. 10, p.1492–1498, 2011.

WONG, S; LLOYD, B. J. an experimental investigation of the impact of wind shielding on hydraulic retention time in Waste Stabilisation ponds (WSPs). In: IWA SPECIALIST CONFERENCE ON WASTE STABILIZATION PONDS, 6, 2004, Avignon. [Anais...] Avignon: IWA, 2004.

WOOD, M. G. *Development of Computational Fluid Dynamics Models for the Design of Waste Stabilization Ponds*. PhD Thesis - Department of Chemical Engineering, University of Queensland, Brisbane, 1997.

WOOD, M. G.; HOWES, T.; KELLER, J.; JOHNS, M. R. Technical note: Two dimensional computational fluid dynamic models for waste stabilisation ponds. *Water Research*, v. 32, n. 3, p. 958-963, 1998.

WOOD, M. G.; GREENFIELD, P. F.; HOWES, T.; JOHNS, M. R.; KELLER, J. Computational fluid dynamic modeling of waste-water ponds to improve design. *Water Science and Technology*, v. 31, n. 12, p. 111-118, 1995.

WPCF - Water Pollution Control Federation. *Manual of Practice, Natural Systems*, Wetlands Chapter, MOP FD-16 WPCF, USA, 1990.

XU, S.; LERI, A. C.; MYNENI, S. C. B.; JAFFE, P. R. Uptake of bromide by two wetland plants (*Typha latifolia* L. and *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud). *Environmental Science & technology*, v. 38, n. 21, p. 5642-5648, 2004.

YANEZ, F. *Lagunas de estabilizacion. Teoria, diseño y mantenimiento*. ETAPA, Cuenca, 1993. 421p.

YANEZ, F. Reduccion de organismos patógenos y diseño de lagunas de estabilizacion em países em desarrollo. In: SEMINARIO REGIONAL DE INVESTIGACION SOBRE LAGUNAS DE ESTABILIZACION, 1986, Lima. [Anais...] Lima: CEPIS, 1986.