

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO
DEPARTAMENTO DE SANEAMENTO E AMBIENTE**

**SISTEMA COMBINADO TRATANDO ESGOTO SANITÁRIO
CONTENDO FORMALDEÍDO: TOXICIDADE REMANESCENTE
AVALIADA EM DIFERENTES NÍVEIS TRÓFICOS**

Eloisa Maria dos Reis dos Santos

Campinas
2011

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO
DEPARTAMENTO DE SANEAMENTO E AMBIENTE**

**SISTEMA COMBINADO TRATANDO ESGOTO SANITÁRIO
CONTENDO FORMALDEÍDO: TOXICIDADE REMANESCENTE
AVALIADA EM DIFERENTES NÍVEIS TRÓFICOS**

Eloisa Maria dos Reis dos Santos

Dissertação de Mestrado apresentada à Comissão de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração de Saneamento e Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. Edson Aparecido Abdul Nour

Co-orientadora: Dra. Angela dos Santos Barretto

Campinas
2011

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE -
UNICAMP

Sa59s Santos, Eloisa Maria dos Reis dos
Sistema combinado tratando esgoto sanitário
contendo formaldeído: toxicidade remanescente avaliada
em diferentes níveis tróficos / Eloisa Maria dos Reis dos
Santos. --Campinas, SP: [s.n.], 2011.

Orientadores: Edson Aparecido Abdul Nour, Angela
dos Santos Barretto.

Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e
Urbanismo.

1. Formaldeído. 2. Tratamento de efluentes. 3.
Ecotoxicologia. 4. Toxicidade - testes. 5. Organismos
aquáticos. I. Nour, Edson Aparecido Abdul . II.
Barretto, Angela dos Santos. III. Universidade Estadual
de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil,
Arquitetura e Urbanismo. IV. Título.

Título em Inglês: Combined system treating wastewater containing formaldehyde:
toxicity remaining assessed at different trophic levels.

Palavras-chave em Inglês: Formaldehyde, Wastewater treatment, Ecotoxicology,
Toxicity - Testes, Aquatic organisms

Área de concentração: Saneamento e Ambiente

Titulação: Mestre em Engenharia Civil

Banca examinadora: Cassiana Maria Reganhan Coneglian, Ederio Dino Bidoia

Data da defesa: 29-08-2011

Programa de Pós Graduação: Engenharia Civil

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E
URBANISMO**

**SISTEMA COMBINADO TRATANDO ESGOTO SANITÁRIO
CONTENDO FORMALDEÍDO: TOXICIDADE
REMANESCENTE AVALIADA EM DIFERENTES NÍVEIS
TRÓFICOS**

Eloisa Maria dos Reis dos Santos

Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:



**Prof. Dr. Edson Aparecido Abdul Nour
Presidente e Orientador**

Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo (FEC/UNICAMP)



**Prof. Dra. Cassiana Maria Reganhan Coneglian
Faculdade de Tecnologia (FT/UNICAMP)**



Prof. Dr. Ederio Dino Bidoia

Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP) – Rio Claro

Campinas, 29 de agosto de 2011

Aos meus pais Eleonora e Wilson
e meu irmão André.

Agradecimentos

À Deus pela força e iluminação.

Aos meus pais Eleonora e Wilson e irmão André, pelo amor, confiança, apoio, paciência e compreensão das minhas ausências para a realização deste trabalho.

À toda minha família pelo amor e incentivo.

Ao professor Edson Aparecido Abdul Nour pela orientação, paciência e confiança na realização deste trabalho.

À professora Ângela dos Santos Barretto pela orientação, confiança na realização deste trabalho e pelo apoio nos dias de teste.

À mestre Ligia Maria Domingues pela amizade, apoio, paciência, confiança, ensinamentos, prontidão e disponibilidade em me ajudar, por toda ajuda nas coletas de esgoto e análises principalmente de formol e microscopia.

Ao biólogo Fernando Candello, pelo apoio, paciência, amizade, confiança, ensinamentos na parte de ecotoxicologia, revezamento na manutenção dos organismos e coletas de peixes, e por carregar as bombonas da coleta de esgoto.

Ao químico Enelton Fagnani, pelo apoio, ensinamentos e por carregar as bombonas da coleta de esgoto.

À todos da equipe que participaram integralmente do trabalho Professores Edson e Angela e técnicos Ligia, Fernando e Enelton, faço um agradecimento especial por todo apoio, conhecimento e momentos compartilhados, pois vocês foram extremamente importantes para a realização deste trabalho

Ao motorista Saul, por toda a prestatividade, amizade e imensurável auxílio na realização das coleta de esgoto.

À FEAGRI por ceder o efluente utilizado neste trabalho.

Ao Departamento de Saneamento e Ambiente da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo pela oportunidade e à todos os funcionários que de alguma forma colaboraram para o desenvolvimento desse trabalho.

Aos pesquisadores e professores: José Roberto Guimarães pela participação na qualificação, Cassiana Maria Reganhan Coneglian e Ederio Dino Bidoia na defesa.

Aos bolsistas que me acompanharam no início do projeto: Ana T. Gomes e Guilherme A. Silva, pela amizade, ajuda no monitoramento dos reatores e manutenção dos organismos, e por revezar no abastecimento do sistema aos finais de semana.

Ao doutorando Mario Foco pela amizade, por revezar no abastecimento do sistema aos finais de semana.

À Noely B Silva, pela amizade desde a graduação em Limeira, paciência e imenso apoio nesses anos de graduação e mestrado.

À mestranda Luciana Vecchi e às bolsistas iniciação científica/trabalho Fernanda, Lidiane e Dayane pela amizade, por toda ajuda e “força” nas coletas de esgoto e apoio na fase final do projeto.

A todos os amigos da pós-graduação da FEC/UNICAMP: Caio, Iza Bela, Cristal, Mithys, Obadias, Daniele Tonon, Juliane, Jorge Paixão, Giuliano, Talita, Mayara, Andréia, Guilherme Lopes, pelas trocas de experiências e apoio.

Aos amigos da república de Campinas: Débora, Mayra, Silvana, Erika, Feres, Yuri e Ana pelo companheirismo e momentos de diversão.

Às amigas da república de Limeira: Marisa, Layza, Andreza e Luisa pela amizade e me abrigarem sempre que preciso.

Á todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	IX
LISTA DE TABELAS	XXI
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS	XXIII
RESUMO	XXV
ABSTRACT	XXVII
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVO	5
2.1 Objetivo Geral	5
2.2 Objetivos Específicos	5
3 REVISÃO DA LITERATURA.....	7
3.1 Formaldeído	7
3.2 Tratamento de Esgoto por Biomassa Aderida.....	9
3.2.1 Filtro Anaeróbio (FA)	11
3.2.2 Biofiltro Aeróbio Submerso (BAS).....	12
3.2.3 Sistemas Combinados de Tratamento de Esgoto	13
3.3 Processo convencional de nitrificação	14
3.4 Ecotoxicologia	17
3.5 Organismos-teste	20
3.5.1 <i>Pseudokirchneriella subcapitata</i>	21
3.5.2 <i>Daphnia similis</i>	22
3.5.3 <i>Poecilia reticulata</i>	24
3.5.4 <i>Girardia tigrina</i>	25
4 MATERIAL E MÉTODOS.....	27
4.1 Sistema cominado de tratamento e controle operacional	27
4.1.1 Coleta do afluente bruto.....	32

4.1.2	Etapas do estudo.....	33
4.2	Métodos analíticos.....	34
4.2.1	Análise microbiológica do lodo do decantador.....	36
4.3	Quantificação do formaldeído e tratamento dos interferentes	36
4.3.1	Pré-tratamento de amostra contendo nitrito e nitrato	37
4.4	Testes de Toxicidade.....	38
4.4.1	<i>Pseudokirchneriella subcapitata</i>	39
4.4.2	<i>Daphnia similis</i>	41
4.4.3	<i>Poecilia reticulata</i>	43
4.4.4	<i>Girardia tigrina</i>	45
4.5	Testes de Sensibilidade	48
5	RESULTADOS.....	49
5.1	Operação e monitoramento do sistema: variáveis físicas e químicas	49
5.1.1	Fase 1: concentração de 100 mg L ⁻¹ de formaldeído	49
5.1.2	Fase 2: concentração de 200 mg L ⁻¹ de formaldeído	63
5.1.3	Fase 3: concentração de 400 mg L ⁻¹ de formaldeído	75
5.1.4	Fase 4: concentração de 500 mg L ⁻¹ de formaldeído	87
5.1.5	Índice Volumétrico de Lodo (IVL).....	98
5.1.6	Microscopia da Biomassa Aeróbia	100
5.1.7	Avaliação geral do desempenho do sistema combinado	106
5.2	Testes de toxicidade.....	109
5.2.1	Fase 1: concentração de 100 mg L ⁻¹ de formaldeído	110
5.2.2	Fase 2: concentração de 200 mg L ⁻¹ de formaldeído	124
5.2.3	Fase 3: concentração de 400 mg L ⁻¹ de formaldeído	136
5.2.4	Fase 4: concentração de 500 mg L ⁻¹ de formaldeído	149
5.2.5	Avaliação geral da toxicidade do efluente	160
6	CONCLUSÕES	165
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	171

LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1: (a) Barrilete e fundo falso; (b) reator montado com o fundo falso (CASTAGNATO, 2006).	28
Figura 4.2: (a) Pontas porosas no fundo do reator; (b) reator preenchido com anéis de Raschig (CASTAGNATO, 2006).	28
Figura 4.3: Cestos para coleta de anéis de Raschig ao longo do reator (CASTAGNATO, 2006).	29
Figura 4.4: Sistema combinado FA/BAS (NOUR <i>et al.</i> , 2011).	30
Figura 4.5: Sistema combinado de tratamento FA/BAS.	31
Figura 4.6: Ponto de coleta de esgoto bruto na FEAGRI: (A) SITRAE; (B) Indicação do ponto de coleta de esgoto bruto.	33
Figura 4.7: Alga <i>P. subcapitata</i> : (a) Suspensão de algas (Fonte: Algae Resource Database); (b) Teste de toxicidade.	40
Figura 4.8: Microcrustáceo <i>D. similis</i> : (a) Organismo (Fonte: IPEN); (b) Câmara incubadora com teste de toxicidade aguda.	42
Figura 4.9: Peixe <i>P. reticulata</i> : (a) Organismo (Fonte: P & P Aquarium); (b) Condições do teste de toxicidade.	44
Figura 4.10: Planária <i>G. tigrina</i> : (a) Organismo, Barros (2006); (b) Condições do teste de toxicidade.	46
Figura 5.1: Concentrações de oxigênio dissolvido nos pontos de amostragem do sistema – Fase 1.	51
Figura 5.2: Concentração de formaldeído nos pontos de amostragem do sistema – Fase 1.	52
Figura 5.3: Valores de eficiência na redução da concentração de formaldeído – Fase 1.	53
Figura 5.4: Valores de pH nos pontos de amostragem do sistema – Fase 1.	54
Figura 5.5: Variação da alcalinidade parcial nos pontos de amostragem do sistema – Fase 1.	54
Figura 5.6: Variação da alcalinidade total nos pontos de amostragem do sistema – Fase 1.	54
Figura 5.7: Relação Al/AP no Ponto 2 (FA) – Fase 1.	56
Figura 5.8: Variação da concentração de ácidos orgânicos voláteis nos pontos de amostragem do sistema – Fase 1.	57
Figura 5.9: Variação do valor de DQO total nos pontos de amostragem do sistema – Fase 1.	58
Figura 5.10: Variação do valor de DQO filtrada nos pontos de amostragem do sistema – Fase 1.	58
Figura 5.11: Variação temporal da redução da concentração de DQO total - Fase 1.	59
Figura 5.12: Variação da concentração de Sólidos suspensos totais nos pontos de amostragem do sistema – Fase 1.	60
Figura 5.13: Variação da concentração de Sólidos suspensos voláteis nos pontos de amostragem do sistema – Fase 1.	60
Figura 5.14: Concentração de nitrogênio amoniacal nos pontos de amostragem do sistema – Fase 1.	61

Figura 5.15: Concentração de nitrito nos pontos de amostragem do sistema – Fase 1.....	62
Figura 5.16: Concentração de nitrato nos pontos de amostragem do sistema – Fase 1.	62
Figura 5.17: Concentrações de oxigênio dissolvido nos pontos de amostragem do sistema – Fase 2.65	
Figura 5.18: Concentração de formaldeído nos pontos de amostragem do sistema – Fase 2.	66
Figura 5.19: Valores de eficiência na redução da concentração de formaldeído – Fase 2.	67
Figura 5.20: Valores de pH nos pontos de amostragem do sistema – Fase 2.	67
Figura 5.21: Variação da alcalinidade parcial nos pontos de amostragem do sistema – Fase 2.	68
Figura 5.22: Variação da alcalinidade total nos pontos de amostragem do sistema – Fase 2.....	68
Figura 5.23: Relação Al/AP no Ponto 2 (FA) – Fase 2.	69
Figura 5.24: Variação da concentração de ácidos orgânicos voláteis nos pontos de amostragem do sistema – Fase 2.	70
Figura 5.25: Variação do valor de DQO total nos pontos de amostragem do sistema – Fase 2.	70
Figura 5.26: Variação do valor de DQO filtrada nos pontos de amostragem do sistema – Fase 2.	71
Figura 5.27: Variação temporal da redução da concentração de DQO total - Fase 2.	71
Figura 5.28: Variação da concentração de Sólidos suspensos totais nos pontos de amostragem do sistema – Fase 2.	73
Figura 5.29: Variação da concentração de Sólidos suspensos voláteis nos pontos de amostragem do sistema – Fase 2.	73
Figura 5.30: Concentração de nitrogênio amoniacal nos pontos de amostragem do sistema – Fase 2.	74
Figura 5.31: Concentração de nitrito nos pontos de amostragem do sistema – Fase 2.....	74
Figura 5.32: Concentração de nitrato nos pontos de amostragem do sistema – Fase 2.	74
Figura 5.33: Concentrações de oxigênio dissolvido nos pontos de amostragem do sistema – Fase 3.77	
Figura 5.34: Concentração de formaldeído nos pontos de amostragem do sistema – Fase 3.	78
Figura 5.35: Valores de eficiência na redução da concentração de formaldeído – Fase 3.	79
Figura 5.36: Valores de pH nos pontos de amostragem do sistema – Fase 3.	79
Figura 5.37: Variação da alcalinidade parcial nos pontos de amostragem do sistema – Fase 3.	80
Figura 5.38: Variação da alcalinidade total nos pontos de amostragem do sistema – Fase 3.....	80
Figura 5.39: Relação Al/AP no Ponto 2 (FA) – Fase 3.	81
Figura 5.40: Variação da concentração de ácidos orgânicos voláteis nos pontos de amostragem do sistema – Fase 3.	82
Figura 5.41: Variação do valor de DQO total nos pontos de amostragem do sistema – Fase 3.	82
Figura 5.42: Variação do valor de DQO filtrada nos pontos de amostragem do sistema – Fase 3.	83
Figura 5.43: Variação temporal da redução da concentração de DQO total - Fase 3.	83

Figura 5.44: Variação da concentração de Sólidos suspensos totais nos pontos de amostragem do sistema – Fase 3.	84
Figura 5.45: Variação da concentração de Sólidos suspensos voláteis nos pontos de amostragem do sistema – Fase 3.	85
Figura 5.46: Concentração de nitrogênio amoniacal nos pontos de amostragem do sistema – Fase 3.	86
Figura 5.47: Concentração de nitrito nos pontos de amostragem do sistema – Fase 3.	86
Figura 5.48: Concentração de nitrato nos pontos de amostragem do sistema – Fase 3.	86
Figura 5.49: Concentrações de oxigênio dissolvido nos pontos de amostragem do sistema – Fase 4.	89
Figura 5.50: Concentração de formaldeído nos pontos de amostragem do sistema – Fase 4.	89
Figura 5.51: Valores de eficiência na redução da concentração de formaldeído – Fase 4.	90
Figura 5.52: Valores de pH nos pontos de amostragem do sistema – Fase 4.	91
Figura 5.53: Variação da alcalinidade parcial nos pontos de amostragem do sistema – Fase 4.	91
Figura 5.54: Variação da alcalinidade total nos pontos de amostragem do sistema – Fase 4.	91
Figura 5.55: Relação AI/AP no Ponto 2 (FA) – Fase 4.	93
Figura 5.56: Variação da concentração de ácidos orgânicos voláteis nos pontos de amostragem do sistema – Fase 4.	93
Figura 5.57: Variação do valor de DQO total nos pontos de amostragem do sistema – Fase 4.	94
Figura 5.58: Variação do valor de DQO filtrada nos pontos de amostragem do sistema – Fase 4.	94
Figura 5.59: Variação temporal da redução da concentração de DQO total - Fase 4.	95
Figura 5.60: Variação da concentração de Sólidos suspensos totais nos pontos de amostragem do sistema – Fase 4.	96
Figura 5.61: Variação da concentração de Sólidos suspensos voláteis nos pontos de amostragem do sistema – Fase 4.	96
Figura 5.62: Concentração de nitrogênio amoniacal nos pontos de amostragem do sistema – Fase 4.	97
Figura 5.63: Concentração de nitrito nos pontos de amostragem do sistema – Fase 4.	97
Figura 5.64: Concentração de nitrato nos pontos de amostragem do sistema – Fase 4.	97
Figura 5.65: Fotos de microscopia óptica com aumento de 10X: (a) Amebas com teca - <i>Arcella</i> ; (b) Amebas com teca – <i>Euglypha</i>	102
Figura 5.66: Fotos de microscopia óptica com aumento de 10X: (a) Nematóide - <i>Rhabditis</i> ; (b) ciliados.	102
Figura 5.67: Fotos de microscopia óptica com aumento de 10X: (a) Floco bacteriano com rotíferos; (b) Micrometazoário do grupo dos tardígrados.	103

Figura 5.68: Fotos de microscopia óptica com aumento de 10X: (a) Rotífero e protozoário flagelado; (b) Micrometazoário do grupo dos anelídeos e ameba nua.	104
Figura 5.69: Fotos de microscopia óptica com aumento de 10X: (a) Rotífero; (b) Zooglea.	105
Figura 5.70: Fotos de microscopia óptica com aumento de 10X: (a) <i>Vorticella</i> ; (b) Bactéria espiralada.	105
Figura 5.71: Fotos de microscopia óptica com aumento de 10X: (a) <i>Zooglea</i> e ciliado grande; (b) Filamentos e ciliado grande.	106
Figura 5.72: Valor do pH, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.	110
Figura 5.73: Concentração de OD, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.	110
Figura 5.74: Condutividade elétrica, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.	111
Figura 5.75: Valor da Temperatura, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.	111
Figura 5.76: Concentração de Formaldeído, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.	111
Figura 5.77: Concentração de inibição do Ponto 1 a 50% dos organismos, obtida nos ensaios utilizando <i>P. subcapitata</i> durante 96 h de exposição, a cada 20 dias na Fase 1.	112
Figura 5.78: Concentração de inibição do Ponto 2 a 50% dos organismos, obtida nos ensaios utilizando <i>P. subcapitata</i> durante 96 h de exposição, a cada 20 dias na Fase 1.	113
Figura 5.79: Concentração de inibição do Ponto 3 a 50% dos organismos, obtida nos ensaios utilizando <i>P. subcapitata</i> durante 96 h de exposição, a cada 20 dias na Fase 1.	114
Figura 5.80: Valor do pH, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.	115
Figura 5.81: Concentração de OD, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.	115
Figura 5.82: Condutividade elétrica, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.	115
Figura 5.83: Valor da Temperatura, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.	115
Figura 5.84: Concentração da Dureza, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.	116
Figura 5.85: Concentração do Formaldeído, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.	116

Figura 5.86: Concentração efetiva do Ponto 1 a 50% dos organismos, obtida nos ensaios utilizando <i>Daphnia similis</i> durante 96 h de exposição, a cada 20 dias na Fase 1.....	116
Figura 5.87: Concentração efetiva do Ponto 2 a 50% dos organismos, obtida nos ensaios utilizando <i>Daphnia similis</i> durante 96 h de exposição, a cada 20 dias na Fase 1.....	117
Figura 5.88: Valor do pH, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.	118
Figura 5.89: Concentração de OD, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.....	118
Figura 5.90: Condutividade elétrica, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.....	118
Figura 5.91: Valor da Temperatura, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.....	118
Figura 5.92: Concentração da Dureza, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.....	119
Figura 5.93: Concentração do Formaldeído, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.....	119
Figura 5.94: Concentração letal do Ponto 1 a 50% dos organismos, obtida nos ensaios utilizando <i>P. reticulata</i> durante 96 h de exposição, a cada 20 dias na Fase 1.....	119
Figura 5.95: Concentração letal do Ponto 2 a 50% dos organismos, obtida nos ensaios utilizando <i>P. reticulata</i> durante 96 h de exposição, a cada 20 dias na Fase 1.....	120
Figura 5.96: Concentração letal do Ponto 3 a 50% dos organismos, obtida nos ensaios utilizando <i>P. reticulata</i> durante 96 h de exposição, a cada 20 dias na Fase 1.....	120
Figura 5.97: Valor do pH, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.	121
Figura 5.98: Concentração de OD, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.....	121
Figura 5.99: Condutividade elétrica, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.....	122
Figura 5.100: Valor da Temperatura, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.....	122
Figura 5.101: Concentração da Dureza, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.....	122
Figura 5.102: Concentração do Formaldeído, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.....	122

Figura 5.103: Concentração letal do Ponto 1 a 50% dos organismos, obtida nos ensaios utilizando <i>G. tigrina</i> durante 96 h de exposição, a cada 20 dias na Fase 1.....	123
Figura 5.104: Concentração letal do Ponto 2 a 50% dos organismos, obtida nos ensaios utilizando <i>G. tigrina</i> durante 96 h de exposição, a cada 20 dias na Fase 1.....	123
Figura 5.105: Valor do pH, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.....	124
Figura 5.106: Concentração de OD, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.....	124
Figura 5.107: Condutividade elétrica, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.....	124
Figura 5.108: Valor da Temperatura, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.....	124
Figura 5.109: Concentração de Formaldeído, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.....	125
Figura 5.110: Concentração de inibição do Ponto 1 a 50% dos organismos, obtida nos ensaios utilizando <i>P. subcapitata</i> durante 96 h de exposição, a cada 20 dias na Fase 2.....	125
Figura 5.111: Concentração de inibição do Ponto 2 a 50% dos organismos, obtida nos ensaios utilizando <i>P. subcapitata</i> durante 96 h de exposição, a cada 20 dias na Fase 2.....	126
Figura 5.112: Concentração de inibição do Ponto 3 a 50% dos organismos, obtida nos ensaios utilizando <i>P. subcapitata</i> durante 96 h de exposição, a cada 20 dias na Fase 2.....	127
Figura 5.113: Valor do pH, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.....	128
Figura 5.114: Concentração de OD, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.....	128
Figura 5.115: Condutividade elétrica, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.....	128
Figura 5.116: Valor da Temperatura inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.....	128
Figura 5.117: Concentração da Dureza, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.....	128
Figura 5.118: Concentração do Formaldeído, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.....	128
Figura 5.119: Concentração efetiva do Ponto 1 a 50% dos organismos, obtida nos ensaios utilizando <i>Daphnia similis</i> durante 96 h de exposição, a cada 20 dias na Fase 2.....	129

Figura 5.120: Concentração efetiva do Ponto 2 a 50% dos organismos, obtida nos ensaios utilizando <i>Daphnia similis</i> durante 96 h de exposição, a cada 20 dias na Fase 2.....	129
Figura 5.121: Valor do pH, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.....	130
Figura 5.122: Concentração de OD, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.....	130
Figura 5.123: Condutividade elétrica, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.....	131
Figura 5.124: Valor da Temperatura, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.....	131
Figura 5.125: Concentração da Dureza, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.....	131
Figura 5.126: Concentração do Formaldeído, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.....	131
Figura 5.127: Concentração de efetiva do Ponto 1 a 50% dos organismos, obtida nos ensaios utilizando <i>P. reticulata</i> durante 96 h de exposição, a cada 20 dias na Fase 2.....	132
Figura 5.128: Concentração letal do Ponto 2 a 50% dos organismos, obtida nos ensaios utilizando <i>P. reticulata</i> durante 96 h de exposição, a cada 20 dias na Fase 2.	132
Figura 5.129: Concentração letal do Ponto 3 a 50% dos organismos, obtida nos ensaios utilizando <i>P. reticulata</i> durante 96 h de exposição, a cada 20 dias na Fase 2.	132
Figura 5.130: Valor do pH, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.....	133
Figura 5.131: Concentração de OD, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.....	133
Figura 5.132: Condutividade elétrica, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.....	134
Figura 5.133: Valor da Temperatura, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.....	134
Figura 5.134: Concentração da Dureza, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.....	134
Figura 5.135: Concentração do Formaldeído, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.....	134
Figura 5.136: Concentração letal do Ponto 1 a 50% dos organismos, obtida nos ensaios utilizando <i>G. tigrina</i> durante 96 h de exposição, a cada 20 dias na Fase 2.....	135

Figura 5.137: Concentração letal do Ponto 2 a 50% dos organismos, obtida nos ensaios utilizando <i>G. tigrina</i> durante 96 h de exposição, a cada 20 dias na Fase 2.....	135
Figura 5.138: Concentração letal do Ponto 3 a 50% dos organismos, obtida nos ensaios utilizando <i>G. tigrina</i> durante 96 h de exposição, a cada 20 dias na Fase 2.....	135
Figura 5.139: Valor do pH, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.....	136
Figura 5.140: Concentração de OD, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.....	136
Figura 5.141: Condutividade elétrica, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.....	137
Figura 5.142: Valor da Temperatura, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.....	137
Figura 5.143: Concentração de Formaldeído, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.....	137
Figura 5.144: Concentração de inibição do Ponto 1 a 50% dos organismos, obtida nos ensaios utilizando <i>P. subcapitata</i> durante 96 h de exposição, a cada 20 dias na Fase 3.....	138
Figura 5.145: Concentração de inibição do Ponto 2 a 50% dos organismos, obtida nos ensaios utilizando <i>P. subcapitata</i> durante 96 h de exposição, a cada 20 dias na Fase 3.....	139
Figura 5.146: Concentração de inibição do Ponto 3 a 50% dos organismos, obtida nos ensaios utilizando <i>P. subcapitata</i> durante 96 h de exposição, a cada 20 dias na Fase 3.....	140
Figura 5.147: Valor do pH, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.....	140
Figura 5.148: Concentração de OD, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.....	140
Figura 5.149: Condutividade elétrica, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.....	141
Figura 5.150: Valor da Temperatura, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.....	141
Figura 5.151: Concentração da Dureza, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.....	141
Figura 5.152: Concentração do Formaldeído, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.....	141
Figura 5.153: Concentração efetiva do Ponto 1 a 50% dos organismos, obtida nos ensaios utilizando <i>Daphnia similis</i> durante 96 h de exposição, a cada 20 dias na Fase 3.....	142

Figura 5.154: Concentração efetiva do Ponto 2 a 50% dos organismos, obtida nos ensaios utilizando <i>Daphnia similis</i> durante 96 h de exposição, a cada 20 dias na Fase 3.....	142
Figura 5.155: Valor do pH, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.....	143
Figura 5.156: Concentração de OD, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.....	143
Figura 5.157: Condutividade elétrica, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.....	143
Figura 5.158: Valor da Temperatura, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.....	143
Figura 5.159: Concentração da Dureza, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.....	144
Figura 5.160: Concentração do Formaldeído, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.....	144
Figura 5.161: Concentração letal do Ponto 1 a 50% dos organismos, obtida nos ensaios utilizando <i>P. reticulata</i> durante 96 h de exposição, a cada 20 dias na Fase 3.	144
Figura 5.162: Concentração letal do Ponto 2 a 50% dos organismos, obtida nos ensaios utilizando <i>P. reticulata</i> durante 96 h de exposição, a cada 20 dias na Fase 3.	145
Figura 5.163: Concentração letal do Ponto 3 a 50% dos organismos, obtida nos ensaios utilizando <i>P. reticulata</i> durante 96 h de exposição, a cada 20 dias na Fase 3.	146
Figura 5.164: Valor do pH, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.....	146
Figura 5.165: Concentração de OD, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.....	146
Figura 5.166: Condutividade elétrica, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.....	147
Figura 5.167: Valor da Temperatura, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.....	147
Figura 5.168: Concentração da Dureza, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.....	147
Figura 5.169: Concentração do Formaldeído, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.....	147
Figura 5.170: Concentração letal do Ponto 1 a 50% dos organismos, obtida nos ensaios utilizando <i>G. tigrina</i> durante 96 h de exposição, a cada 20 dias na Fase 3.....	148

Figura 5.171: Concentração letal do Ponto 2 a 50% dos organismos, obtida nos ensaios utilizando <i>G. tigrina</i> durante 96 h de exposição, a cada 20 dias na Fase 3.....	148
Figura 5.172: Concentração de efetiva do Ponto 3 a 50% dos organismos, obtida nos ensaios utilizando <i>G. tigrina</i> durante 96 h de exposição, a cada 20 dias na Fase 3.....	149
Figura 5.173: Valor do pH, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.	150
Figura 5.174: Concentração de OD, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.	150
Figura 5.175: Condutividade elétrica, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.	150
Figura 5.176: Valor da Temperatura, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.	150
Figura 5.177: Concentração de Formaldeído, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.....	150
Figura 5.178: Concentração de inibição do Ponto 1 a 50% dos organismos, obtida nos ensaios utilizando <i>P. subcapitata</i> durante 96 h de exposição, a cada 20 dias na Fase 4.....	151
Figura 5.179: Concentração de inibição do Ponto 2 a 50% dos organismos, obtida nos ensaios utilizando <i>P. subcapitata</i> durante 96 h de exposição, a cada 20 dias na Fase 4.....	152
Figura 5.180: Concentração de inibição do Ponto 3 a 50% dos organismos, obtida nos ensaios utilizando <i>P. subcapitata</i> durante 96 h de exposição, a cada 20 dias na Fase 4.....	153
Figura 5.181: Valor do pH, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.	154
Figura 5.182: Concentração de OD, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.	154
Figura 5.183: Condutividade elétrica, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.	154
Figura 5.184: Valor da Temperatura, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.	154
Figura 5.185: Concentração da Dureza, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.....	154
Figura 5.186: Concentração do Formaldeído, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.....	154
Figura 5.187: Concentração efetiva a 50% dos organismos, obtida nos ensaios utilizando <i>Daphnia similis</i> durante 96 h de exposição, a cada 20 dias na Fase 4: (a) Ponto 1; (b) Ponto 2.	155

Figura 5.188: Valor do pH, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.....	156
Figura 5.189: Concentração de OD, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.....	156
Figura 5.190: Condutividade elétrica, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.....	156
Figura 5.191: Valor da Temperatura, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.....	156
Figura 5.192: Concentração da Dureza, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.....	156
Figura 5.193: Concentração do Formaldeído, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.....	156
Figura 5.194: Concentração letal a 50% dos organismos, obtida nos ensaios utilizando <i>P. reticulata</i> durante 96 h de exposição, a cada 20 dias na Fase 4: (a) Ponto 1; (b) Ponto 2; (c) Ponto 3.	157
Figura 5.195: Valor do pH, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.....	158
Figura 5.196: Concentração de OD, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.....	158
Figura 5.197: Condutividade elétrica, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.....	158
Figura 5.198: Valor da Temperatura, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.....	158
Figura 5.199: Concentração da Dureza, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.....	159
Figura 5.200: Concentração do Formaldeído, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.....	159
Figura 5.201: Concentração letal a 50% dos organismos, obtida nos ensaios utilizando <i>G. tigrina</i> durante 96 h de exposição, a cada 20 dias na Fase 4: (a) Ponto 1; (b) Ponto 2.	159
Figura 5.202: Concentração letal do Ponto 3 a 50% dos organismos, obtida nos ensaios utilizando <i>G. tigrina</i> durante 96 h de exposição, a cada 20 dias na Fase 4.....	160

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1: Características do sistema combinado anaeróbio-aeróbio	27
Tabela 4.2: Concentração média real de formaldeído em cada faixa de concentração aplicada.....	34
Tabela 4.3: Métodos analíticos utilizados no procedimento experimental.....	35
Tabela 5.1 Valores médios obtidos para as variáveis físicas e químicas durante a Fase 1	50
Tabela 5.2: Valores médios obtidos para as variáveis físicas e químicas durante a Fase 2.....	64
Tabela 5.3 Valores médios obtidos para as variáveis físicas e químicas durante a Fase 3.....	76
Tabela 5.4 Valores médios obtidos para as variáveis físicas e químicas durante a Fase 4.....	88
Tabela 5.5: Resultados de IVL obtidos em cada fase de operação	99
Tabela 5.6: Valores finais do efluente do sistema.....	107

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

AI – Alcalinidade intermediária

AOV – Ácidos Orgânicos Voláteis

AP – Alcalinidade Parcial

AT – Alcalinidade Total

BAS – Biofiltro Aerado Submerso

CE50 – Concentração causadora de efeito adverso efetivo médio a 50% dos organismos estudados.

CI50 – Concentração de inibição média a 50% dos organismos estudados.

CL50 – concentração letal média a 50% dos organismos estudados.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio

DQO – Demanda Química de Oxigênio

EBSF – Esgoto Bruto sem adição de formaldeído

FA – Filtro Anaeróbio

FEAGRI – Faculdade de Engenharia Agrícola

FEC – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo

LABSAN – Laboratório de Saneamento

Na₂CO₃ – Carbonato de sódio

NH₃ – amônia livre ou não ionizada

NH₄⁺ - amônia ionizada

NO₂⁻ – nitrito

NO₃⁻ – nitrato

OD – Oxigênio Dissolvido

pH – potencial hidrogeniônico

SCT – Sistema Combinado de Tratamento

TDH – Tempo de Detenção Hidráulico

RESUMO

SANTOS, E.M.R. **Sistema combinado tratando esgoto sanitário contendo formaldeído: Toxicidade remanescente avaliada em diferentes níveis tróficos.** Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 170f, 2011.

O presente estudo teve como objetivo avaliar a eficiência na redução da concentração de formaldeído do efluente de um sistema de tratamento combinado: filtro anaeróbio (FA), seguido de biofiltro aerado submerso (BAS) e decantador, por meio de testes de toxicidade utilizando as espécies *Pseudokirchneriella subcapitata*, *Daphnia similis*, *Poecilia reticulata* e *Girardia tigrina*. O experimento foi desenvolvido nas dependências do Laboratório de Saneamento da FEC/UNICAMP. Os 3 pontos de coleta foram: efluente bruto mais formaldeído, saída do FA e saída do decantador, correspondendo ao efluente tratado pelo sistema. O estudo foi dividido em quatro fases diferenciadas pela concentração teórica de formaldeído aplicada: Fase 1 (F1) – 100 mg L⁻¹, Fase 2 (F2) – 200 mg L⁻¹, Fase 3 (F3) – 400 mg L⁻¹ e Fase 4 (F4) – 500 mg L⁻¹. A água residuária que foi utilizada neste estudo apresentava características condizentes às de um esgoto sanitário de média concentração em termos de matéria orgânica. Em cada fase de operação, a concentração média e a porcentagem de redução do formaldeído no efluente tratado pelo sistema foram de 0,1 mg L⁻¹ e 99,9% (F1); 0,1 mg L⁻¹ e 100% (F2); 0,7 mg L⁻¹ e 99,8% (F3) e 3,8 e 99,2% (F4). O valor médio da concentração e da porcentagem de remoção de DQO total para o efluente tratado pelo sistema, durante o período de estudo foi de 53 mg L⁻¹ e 87% (F1), 41 mg L⁻¹ e 93% (F2), 62 mg L⁻¹ e 93% (F3) e 131 mg L⁻¹ e 90% (F4). O efluente do sistema combinado não apresentou toxicidade aguda para *D. similis* em todas as concentrações teóricas afluentes aplicadas. Na F1 o efluente do sistema apresentou toxicidade aguda pouco significativa para *P. subcapitata* e *P. reticulata*; na F2 para *G. tigrina* e *P. reticulata*, na F3 para *P. subcapitata*, *P. reticulata*; e *G. tigrina*. Na F4 o efluente foi significativamente tóxico aos organismos: *P. subcapitata*, *P. reticulata* e *G. tigrina*. As espécies estudadas indicaram serem organismos-teste adequados a estudos de toxicidade de esgoto sanitário contendo formaldeído tratado pelo sistema combinado alvo do estudo. Pelos resultados obtidos, o sistema combinado, na configuração utilizada neste estudo, foi considerado adequado à redução da toxicidade para as concentrações de formaldeído presentes, exceto para a concentração de 500 mg L⁻¹, tóxica a três organismos-teste, sendo necessário um período maior de monitoramento para garantir a adaptação da biomassa a fim de reduzir a toxicidade do efluente.

Palavras chave: Formaldeído; Tratamento de efluentes; Ecotoxicologia; Toxicidade – testes; Organismos aquáticos.

ABSTRACT

SANTOS, E.M.R. **Combined system treating wastewater containing formaldehyde: Toxicity remaining assessed at different trophic levels.** Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 170f, 2011.

This study aimed to evaluate the efficiency in reducing formaldehyde concentration in the effluent of a system of combined treatment: anaerobic filter (AF), followed by aerated submerged biofilter (BAS) and decanter through toxicity tests using species *Pseudokirchneriella subcapitata*, *Daphnia similis*, *Poecilia reticulata* and *Girardia tigrina*. The experiment was developed in the Sanitation Laboratory FEC / UNICAMP. The three collection points were raw effluent more formaldehyde, AF output and output of the decanter, corresponding to the effluent treated by the system. The study was divided into four phases distinguished by the theoretical concentration of formaldehyde applied: Phase 1 (F1) - 100 mg L⁻¹, Phase 2 (F2) - 200 mg L⁻¹, Phase 3 (F3) - 400 mg L⁻¹ and Phase 4 (F4) - 500 mg L⁻¹. The wastewater which was used in this study had characteristics consistent with those of an average concentration of sewage in terms of organic matter. At each stage of operation, the average concentration and percentage reduction of formaldehyde in the effluent treated by the system was 0.1 mg L⁻¹ and 99.9% (F1), 0.1 mg L⁻¹ and 100% (F2) 0 , 7 mg L⁻¹ and 99.8% (F3) and 3.8 and 99.2% (F4). The average concentration and percentage of total COD removal for the treated effluent through the system, Section 3, during the study period was 53 mg L⁻¹ and 87% (F1), 41 mg L⁻¹ and 93% (F2), 62 mg L⁻¹ and 93% (F3) and 131 mg L⁻¹ and 90% (F4). The effluent of the combined system showed no acute toxicity to *D. similis* in all concentrations applied theoretical tributaries. In F1, F2 and F3, the effluent of the system showed little significant acute toxicity to *P. subcapitata*, *P. reticulata*, and *G. tigrina*. F4 in the effluent was significantly toxic to organisms: *P. subcapitata*, *P. reticulata* and *G. tigrina*. The species indicated that the test organisms suitable for toxicity studies of formaldehyde containing wastewater treated by the combined system of the target study. From the results, the combined system, the configuration used in this study was considered appropriate to reduce the toxicity of formaldehyde concentrations present, except for the concentration of 500 mg L⁻¹, toxic to three test organisms, requiring a longer period of adaptation of the system to reduce effluent toxicity.

Keywords: Formaldehyde, Wastewater treatment, Ecotoxicology, Toxicity - Testes, Aquatic organisms.

1 INTRODUÇÃO

Os corpos d'água são receptores finais de diversas fontes de poluição difusa, decorrentes do escoamento, da infiltração e percolação de água no solo, carreando aos lençóis freáticos ou diretamente aos rios contaminantes presentes no solo ou líquidos provenientes de derramamentos; ou pontual decorrente do lançamento de efluentes, tanto industriais como domésticos. Esses impactos podem ser avaliados por meio de variáveis físicas e químicas, tais como o teor de Carbono Orgânico Dissolvido (COD) ou a Demanda Química de Oxigênio (DQO), as quais não fornecem informações precisas e consistentes sobre os possíveis efeitos causados no ecossistema aquático.

O lançamento de efluentes, principalmente quando contém substâncias com caráter tóxico aos organismos, podem afetar a biodiversidade do ecossistema aquático causando desequilíbrio por meio de alterações gradativas ou bruscas na qualidade da água, provocando mudanças no ciclo dos organismos e reduzindo o número de espécies ao longo do tempo.

Dentre as substâncias que apresentam caráter tóxico encontra-se o formaldeído, composto orgânico que apresenta alto fator de risco ambiental e à saúde humana. Ele está presente no ambiente, em pequenas concentrações, e em diversos processos industriais: na produção de madeira, de resinas, de colas, sendo seu uso mais conhecido como conservante de cadáveres e peças anatômicas nos laboratórios de anatomia e, mais recentemente nos salões de beleza para alisamento capilar.

A toxicidade do formaldeído é estudada em diversas áreas e devido à exposição direta a contaminação ocupacional em humanos apresenta maior número de pesquisas. Com isso, há relatos que além de danos nas vias respiratórias e pele, dentre outros, o formaldeído apresenta caráter genotóxico, podendo causar danos celulares e carcinogênicos, ou seja, possui potencial cancerígeno.

O efluente gerado pelo uso do formaldeído apresenta preocupação, pois nos corpos d'água pode afetar seriamente o ecossistema local, visto que pequenas

concentrações já provocam efeito tóxico considerado nos organismos. Lançado na rede coletora pode trazer sérios problemas às estações de tratamento de esgotos devido ao choque provocado na biomassa presente nos sistemas de tratamento.

O tratamento biológico de efluentes contendo formaldeído é uma alternativa viável, no entanto faz-se necessário o emprego de tecnologias de tratamento adaptadas a biodegradar efluentes com características tóxicas, dentre elas pode ser destacados os reatores com biomassa aderida, utilizando tanto o metabolismo anaeróbio como o aeróbio.

Reatores anaeróbios, como o filtro anaeróbio (FA), apresentam baixo custo operacional, capacidade de suportar cargas tóxicas e a baixa geração de lodo. Porém este sistema não promove total degradação da matéria orgânica e não é eficiente na conversão de macronutrientes, necessitando de um pós-tratamento.

O tratamento complementar realizado em biofiltros aeróbios submersos (BAS) mostra-se uma importante alternativa, pois também possui biomassa aderida, gerando menos lodo, conferindo ao sistema maior estabilidade na presença de cargas tóxicas aplicadas, além da elevada eficiência na redução da matéria orgânica e conversão dos compostos nitrogenados.

A combinação de ambos os reatores confere ao sistema alta capacidade de degradação e estabilidade operacional. No entanto, esta eficiência avaliada por meio de variáveis físicas e químicas não garante que a degradação obtida do formaldeído tenha correlação direta na redução de sua toxicidade. Os produtos da biodegradação do formaldeído podem apresentar toxicidade maior, decorrente da geração de subprodutos tóxicos ao longo do tratamento, os quais podem provocar a ocorrência de danos ambientais quando do seu lançamento no corpo d'água, danos esses que provavelmente não são mensuráveis pelas variáveis físicas e químicas normalmente utilizadas.

Nesse sentido além as legislações estão se tornando mais restritas quanto aos padrões de lançamento de efluentes e esgoto, como a CONAMA 430/2011 principalmente em relação à Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e a concentração de nitrogênio amoniacal, e também estabelecendo a necessidade de

realização de testes de toxicidade com objetivo de avaliar o impacto do lançamento do efluente no ambiente aquático.

Por estas razões, uma série de ensaios com o uso de organismos representativos do ambiente vem sendo empregada, permitindo a comprovação do efeito causado por um determinado composto ou sua mistura. Assim, o monitoramento do sistema no tratamento biológico de esgoto contendo formaldeído pode ser realizado por meio de testes de toxicidade utilizando esses organismos.

A realização destes testes deve seguir as normas e protocolos vigentes de padronização, garantindo a confiabilidade dos resultados. Os organismos indicadores a serem utilizados devem ser representativos do meio que irá receber o despejo da substância tóxica, apresentar sensibilidade ante a exposição de substâncias e serem bons modelos para estudos experimentais, ou seja, fácil aquisição, manipulação e manutenção em laboratório.

Visando o monitoramento da qualidade do efluente a literatura recomenda o uso de mais de uma espécie, a fim de permitir melhor avaliação do impacto. Com isso, buscou-se realizar os ensaios com quatro organismos de diferentes níveis tróficos: alga (*Pseudokirchneriella subcapitata*), microcrustáceo (*Daphnia similis*), peixe (*Poecilia reticulata*) e planária (*Girardia tigrina*).

Dessa forma o presente trabalho avaliou a toxicidade de um esgoto sanitário bruto contendo formaldeído, bem como o do efluente que recebeu tratamento por processos biológicos combinados (FA seguido por BAS), utilizando organismos representativos do ecossistema aquático em diferentes níveis tróficos, permitindo estimar a eficiência no tratamento biológico e possíveis impactos causados pelo lançamento deste efluente no ambiente.

2 OBJETIVO

2.1 Objetivo Geral

Avaliação do tratamento de esgoto sanitário contendo formaldeído em um sistema combinado de tratamento esgoto e monitoramento da toxicidade do efluente em organismos de diferentes níveis tróficos: alga (*Pseudokirchneriella subcapitata*), microcrustáceo (*Daphnia similis*), peixe (*Poecilia reticulata*) e planária (*Girardia tigrina*).

2.2 Objetivos Específicos

- A) Avaliar a tratabilidade de esgoto doméstico contendo formaldeído no sistema de tratamento, composto por filtro anaeróbio (FA) e biofiltro aerado submerso (BAS), por meio do monitoramento utilizando variáveis físicas e químicas.
- B) Monitorar o impacto das concentrações de 100, 200, 400 e 500 mg L⁻¹ de formaldeído aplicado ao sistema de tratamento FA/BAS em cada etapa de estudo.
- C) Avaliar a redução do efeito tóxico do esgoto com formaldeído por meio de testes de toxicidade aguda ao longo do tratamento utilizando microorganismos de quatro diferentes níveis tróficos.
- D) Por meio dos testes ecotoxicológicos avaliar as respostas dos organismos *Pseudokirchneriella subcapitata* (CI50-96h), *Daphnia similis* (CE50-48h), *Poecilia reticulata* (CL50-96h) e *Girardia tigrina* (CL50-96h) ante a exposição do formaldeído em diferentes concentrações no esgoto sanitário.
- E) Verificar qual ou quais dos organismos-testes utilizados melhor representa o possível impacto causado pelo formaldeído.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Formaldeído

O formaldeído (aldeído fórmico, metanal, formalina, oximetileno), é um composto orgânico volátil, de fórmula molecular CH_2O , denominado metanal pela IUPAC e é identificado internacionalmente pelo número de registro CAS 50-00-0. À temperatura ambiente, é um gás incolor inflamável, de forte odor característico, comercialmente utilizado em solução aquosa a 37% em massa, contendo metanol como estabilizador, a fim de reduzir a polimerização (ATSDR, 1999; IARC, 2006).

O formaldeído ocorre naturalmente no ambiente, sendo produzido em pequenas quantidades pela maioria dos organismos vivos como parte de processos metabólicos normais (ATSDR, 1999).

Utilizado em grande escala na indústria, suas principais aplicações são (ATSDR, 1999; CARVALHO, 2009; INCA, 2009; MOUSSAVI *et al.*, 2009):

- Produção de resinas uréia-formol, fenol-formol;
- Produtos prensados de madeira;
- Manufatura de papéis;
- Colas e adesivos;
- Tintas e corantes;
- Tecidos de imprensa permanente;
- Revestimentos de produtos de papel;
- Pesticidas e fungicidas na agricultura;
- Agente esterilizante;
- Agente preservante de produtos cosméticos e de limpeza;
- Conservante em alguns alimentos;
- Conservante de cadáveres e peças anatômicas;
- Laboratórios de análises químicas.

A produção e o uso do formaldeído fazem com que esteja presente no ambiente em concentrações variáveis. A exposição ao formaldeído é um fator de risco importante e segundo Moussavi *et al.* (2009), devido a sua toxicidade, o formaldeído pode prejudicar seriamente a saúde humana e impor problemas ambientais.

Os principais sintomas agudos da exposição em humanos são de leve a moderada irritação dos olhos, pele e trato respiratório, quando esta é prolongada ou repetitiva pode causar efeitos pulmonares adversos, dermatites e conjuntivites (FARAH, 2007). Em animais o formaldeído pode causar danos nas vias respiratórias, sangue, músculos, ossos, rins, sistema endócrino, pele, massa corpórea, sistema imunológico, neurológico e reprodutivo. Em relação à genotoxicidade o formaldeído pode causar efeitos nocivos em vários organismos e células, sendo capaz de reagir diretamente com o DNA quando as capacidades de biotransformação são excedidas (ATSDR, 1999).

O potencial cancerígeno do formaldeído foi avaliado internacionalmente por várias instituições de pesquisa. Na International Agency for Research on Cancer (IARC, 2006) pertence ao Grupo 1, classificado como carcinogênico para humanos. A United States Environmental Protection Agency (EPA), a Occupational Safety and Health Administration (OSHA) e o National Toxicology Program dos EUA (Fourth Annual Report on Carcinogens) também confirmam a possível carcinogenicidade aos humanos e alguns animais (INCA, 2009).

O limite de exposição contínua no ar permitido segundo a OSHA é de 5 ppm. O Criteria Document publicado pelo National Institute for Occupational Safety and Health dos EUA (NIOSH) recomenda que o limite máximo presente no ar seja de 0.1 ppm e que seja feito o uso de luvas e máscaras durante a manipulação do produto (INCA, 2009). O Anexo 11 da Norma Regulamentadora – NR 15, do que trata de agentes químicos, estabeleceu como limite de tolerância 1,6 ppm e 2,3 mg m⁻³ para jornadas de trabalho de até 48 h por semana e caracterizou-o com máximo grau de insalubridade (BRASIL, 2011b).

No Brasil, a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), determinou por meio da Resolução RDC 35 e 37/2008, a proibição do uso de formaldeído como conservante em saneantes e esterilizantes. Não há uma legislação brasileira limitando o lançamento do formaldeído, porém segundo a CONAMA 430/2011 o efluente não deverá causar ou possuir potencial para causar efeitos tóxicos aos organismos aquáticos no corpo receptor (BRASIL, 2011a).

A toxicidade do formaldeído foi avaliada em diferentes espécies para determinar a concentração causadora de efeito tóxico em 50% dos organismos: encontram-se para alga *Scenedesmus subspicatus*, CE50-24h de 14,7 mg L⁻¹; em microcrustáceos foi de 5,8 mg L⁻¹ (CE50-48h) para *Daphnia pulex*, 29 mg L⁻¹ (CE50-48h) para *Daphnia magna*; em peixes de água doce 24,1 mg L⁻¹ (CL50-96h) para *Pimephales promelas* e 24,8 mg L⁻¹ (CL50-96h) e para *Ictalurus melas* e 2,3 mg L⁻¹ (CL50-48h) pra planária *Dugesia tigrina* (HOHREITER, 2001; MARTINS *et al.*, 2007; OECD SIDIS, 2002). Estes estudos realizados com organismos aquáticos comprovam que o formaldeído provoca relevante toxicidade, visto pelas baixas concentrações em que foram obtidas as concentrações causadoras do efeito tóxico.

Devido a sua ampla aplicação, há o lançamento de grande quantidade de formaldeído para o ambiente por meio de efluentes industriais. Para evitar problemas associados com o formaldeído, águas residuais que contenham esta substância devem ser tratadas de forma eficaz antes do efluente ser lançado no ambiente e o monitoramento por meio de bioensaios deve ser realizado a fim de avaliar a eficiência de redução da toxicidade do composto.

3.2 Tratamento de Esgoto por Biomassa Aderida

Sistemas convencionais de tratamento de esgoto estão baseados na degradação de matéria orgânica, para isto a atividade e a população dos micro-organismos são essenciais para seu funcionamento. No entanto a presença de substâncias tóxicas no afluente pode resultar na desestabilização da atividade da biomassa. Para Soupilas (2008), esta é uma das principais causas do fracasso das

instalações de tratamento biológico e resulta em não conformidade com os limites de lançamento nos corpos d'água. Como forma de controle, pode ser necessário aumentar o tempo de detenção hidráulica no sistema e conseqüentemente o tempo de retenção celular a fim de recuperar a eficiência requerida.

Segundo Chernicharo (2007) sistemas de alta taxa são capazes de reter grande quantidade de biomassa em elevada atividade, mesmo que operados com baixo tempo de detenção hidráulica, e podem suportar a aplicação de altas cargas se for garantido o contato suficiente entre o substrato e a biomassa que pode estar na forma dispersa ou aderida.

Nos sistemas de tratamento que utilizam crescimento disperso de biomassa, esta cresce sem nenhuma estrutura de sustentação e, para garantir a eficiência no tratamento, dependem da capacidade de formar flocos. Neste caso o tempo médio de residência de sólidos no reator é suficientemente elevado para manter o crescimento de uma biomassa densa com elevada atividade (VON SPERLING, 1996).

Os principais sistemas que utilizam este tipo de crescimento são o UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket), nele a biomassa anaeróbia em elevada atividade, está presente na forma de grânulos densos concentrados no fundo do reator (manta de lodo), assim em fluxo ascendente o esgoto passa por esta manta e o efluente sai pela parte superior do reator, que contém um separador de gases e sólidos para reter as partículas que sofreram arraste permitindo que estas retornem a manta de lodo (CHERNICHARO, 2007). Em meio aeróbio o sistema de lodos ativados é a configuração mais comum, ele consiste em duas unidades básicas: (1) um reator em que a biomassa responsável pelo tratamento está presente na forma de flocos que são mantidos em suspensão e aeração e (2) uma unidade de separação de líquidos de sólidos. Nesta unidade é feita a recirculação de parte dos sólidos sedimentados para a unidade de aeração, mantendo alta concentração de biomassa no tanque de aeração (KASSAB *et al.*, 2010).

A maior concentração de biomassa por elevados períodos de tempo faz com que o emprego de um suporte para a imobilização da biomassa (crescimento

aderido) agregue uma série de vantagens ao tratamento permitindo a este sistema, quando comparado àqueles com o crescimento disperso: (1) operar com tempos de detenção hidráulica menor que o tempo de retenção celular; (2) aumentar as velocidades globais de conversão dos substratos, devido às altas concentrações de biomassa e (3) a redução no volume dos reatores (PONTES, 2009; VON SPERLING, 1996). Além disso, outra característica que privilegia os sistemas de biomassa aderida é a redução na susceptibilidade a choques de cargas, temperatura e toxicidade (GONÇALVEZ *et al.*, 2001; PONTES, 2009).

Em relação à presença de compostos tóxicos, Gonçalves *et al.* (2001) relata que se a concentração ultrapassar subitamente o limite de inibição, a passagem do composto ao longo do biofilme atenua o impacto no tratamento e mesmo que as camadas mais externas do biofilme forem afetadas, as camadas internas continuam em atividade degradando os compostos em concentrações reduzidas pela resistência à difusão.

Dentre os sistemas de biomassa aderida pode ser utilizado: filtro biológico, biodisco, filtro anaeróbio, biofiltro aerado. Estes reatores de leito fixo submerso caracterizam-se pela compactidade, aspecto modular e pela simplicidade operacional.

3.2.1 Filtro Anaeróbio (FA)

A digestão anaeróbia é amplamente utilizada no tratamento da matéria orgânica de efluentes de difícil degradação devido a possibilidade de utilização em elevadas taxas de carregamento hidráulico, menor produção de lodo em relação aos processos aeróbios, baixo custo operacional e necessidade de energia, além de ser mais robusta às variações de cargas orgânicas, hidráulicas e tóxicas (ARAÚJO Jr. 2006; FONTANA, 2007).

Reatores anaeróbios de leito fixo, filtro anaeróbio (FA), utilizam o meio poroso do reator para suportar a biomassa sob a forma de filme microbiano facilitando a retenção de biomassa e alcançando maior tempo de residência celular, importante

para melhorar a eficiência e estabilidade no tratamento (BEUX *et al.*, 2007; BODKHE, 2008).

Apesar de alguns processos industriais aplicarem tratamentos físico-químicos ou aeróbios em efluentes contendo formaldeído, a busca de tecnologias anaeróbias é crescente, motivada especialmente pelo fator econômico (PEREIRA e ZAIATI, 2008).

Contudo, dificilmente esses reatores produzem efluentes que atendem aos padrões estabelecidos pela legislação ambiental brasileira, principalmente ao fato de na maioria dos casos, a Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) residual ser elevada para atender aos limites de lançamento. Além disso, os reatores promovem uma remoção insatisfatória de nutrientes, Nitrogênio e Fósforo (ARAÚJO JR, 2006; CHERNICHARO, 2007; FONTANA, 2007), o que implica a necessidade de um pós-tratamento, uma vez que o despejo de efluentes com altos níveis de nutrientes favorece o crescimento excessivo de algas e plantas aquáticas, gerando um desequilíbrio ecológico nos corpos d'água, fenômeno conhecido como eutrofização. E ainda a presença de altas concentrações de nitrogênio amoniacal pode ter efeitos tóxicos sobre os organismos aquáticos que são expostos no lançamento de efluentes (PONTES, 2009).

3.2.2 Biofiltro Aeróbio Submerso (BAS)

Segundo Fontana (2007) apesar da taxa de produção de lodo ser maior nestes processos, os sistemas aeróbios apresentam elevada eficiência de remoção de matéria orgânica e nitrogênio amoniacal. Neste contexto, a utilização de biofiltro aeróbio submerso no pós-tratamento do efluente proveniente de reator anaeróbio é uma alternativa tecnicamente viável.

Notadamente, dois fatores favorecem a sua utilização como pós-tratamento anaeróbio: (i) a redução relativa na produção de lodo, uma vez que a maior parte da fração orgânica já foi removida na unidade anaeróbia antecedente, e; (ii) o desempenho mais uniforme da unidade aeróbia, pelo fato das freqüentes oscilações

(orgânicas, hidráulicas e tóxicas) dos despejos sanitários serem assimilados pelo reator anaeróbio (GONÇALVEZ *et al.*, 2001).

No biofiltro aerado submerso, o tratamento biológico é realizado por micro-organismos aderidos ao meio suporte inerte com alta superfície específica, favorecendo a transferência de massa e a grande formação de biomassa. Com isso, idades de lodo bastante elevadas são obtidas sem necessidade de clarificação e recirculação de biomassa (GONÇALVEZ *et al.*, 2001).

O BAS atua em três fases: (1) a sólida é constituída pelo meio suporte e pelos micro-organismos a ele aderidos, (2) a fase líquida é o próprio líquido em escoamento pelo meio poroso e (3) a fase gasosa é formada pela aeração artificial e pelos gases produzidos nos processos de biodegradação (FONTANA, 2007).

Mesmo reconhecendo as vantagens do emprego de sistemas combinados anaeróbio-aeróbio, muitos questionamentos ainda persistem como a eficiência do biofiltro na melhoria do efluente do reator anaeróbio, a ocorrência de nitrificação, a produção de lodo e viabilidade econômica de implantação em escala real (FONTANA, 2007).

3.2.3 Sistemas Combinados de Tratamento de Esgoto

Dentre as opções de tratamento de efluentes líquidos, a matéria orgânica pode ser removida por ambos os métodos de forma anaeróbia ou aeróbia. No entanto, a fim de obter efluentes que satisfaçam as legislações vigentes quanto às variáveis: matéria orgânica, sólidos em suspensão e macronutrientes, a combinação dos processos é considerada economicamente vantajosa por compensar ou reduzir suas limitações (ALMEIDA, 2010; GARBOSSA *et al.*, 2005).

Em sistemas combinados anaeróbio-aeróbio, uma grande fração da matéria orgânica biodegradável do afluente é degradada na fase anaeróbia. Comparado com afluentes que não são pré-tratados, os efluentes a partir desta fase requerem menor capacidade de oxidação na fase aeróbia tanto para a remoção de matéria orgânica residual do processo anaeróbio quanto para a nitrificação. Portanto, em comparação

com as plantas convencionais de tratamento aeróbio, sistemas combinados de tratamento anaeróbio-aeróbio de esgoto são promissores em termos de redução do consumo de energia e na produção de lodo (GARBOSSA *et al.*, 2005).

Segundo Pontes (2009) os sistemas combinados anaeróbio-aeróbio estão se destacando, devido ao fato de juntos promoverem tanto a redução da concentração de matéria orgânica como a conversão de nutrientes. Eles também apresentam vantagens quando comparados aos sistemas físico-químicos e aeróbios convencionais por lodos ativados, como redução da potência de aeração requerida na fase aeróbia, dos custos de implantação e operação (ARAÚJO Jr, 2006; PONTES, 2009).

Há diversos estudos sobre o tratamento de formaldeído sob variadas formas: anaeróbia (EIROA *et al.*, 2004, 2005a; MOTELEB *et al.*, 2002; OLIVEIRA *et al.*, 2004; PEREIRA e ZAIATI, 2008; PRIYA *et al.*, 2009), aeróbia (EIROA *et al.*, 2005b; GARRIDO *et al.*, 2001; MOUSSAVI *et al.*, 2009; MOUSSAVI e HEIDARIZADA, 2010 e 2011) e sistemas combinados de tratamento (CAMPOS *et al.*, 2003; KACZALA *et al.*, 2010; MELIAN *et al.*, 2008; MOTELEB *et al.*, 2002). Nos trabalhos apresentados foram obtidas boas taxas de degradação do formaldeído, incluindo em alguns casos a desnitrificação e conversão de outro composto tóxico como o fenol. No entanto, todos utilizam como substrato na degradação água residuária sintética, apresentando características diferentes de acordo com o objetivo do estudo.

É importante observar que estudos com amostras reais de águas residuárias contendo formaldeído ou compostos que contenham a substância, como resinas, não são comuns, assim como a realização de estudos para avaliação da redução da carga tóxica do efluente ao meio aquático e a possível formação de subprodutos tóxicos que podem ser gerados na degradação do formaldeído.

3.3 Processo convencional de nitrificação

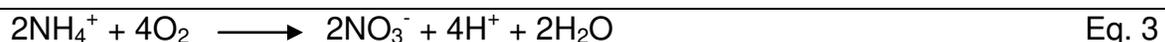
Os sistemas de tratamento aeróbios convencionais promovem a remoção biológica de nitrogênio das águas residuárias nos processos de amonificação,

nitrificação e desnitrificação, pelo consumo da biomassa e a remoção da fração inerte por meio do lodo excedente (PONTES, 2009; VON SPERLING, 2002).

O nitrogênio está presente nos efluentes brutos como constituinte da matéria orgânica, é encontrado na forma de proteínas, aminoácidos ou uréia (BERNET, 2000). Em meio anaeróbio e na presença de bactérias heterotróficas estes compostos orgânicos nitrogenados são convertidos à amônia no processo de amonificação (VON SPERLING, 2002), por isso, segundo Pontes (2009), a amônia é encontrada em maior quantidade nas águas residuárias proveniente de tratamentos anaeróbios.

A distribuição da amônia segue em função do pH, no qual pode ser encontrada na forma ionizada (NH_4^+), na faixa de pH próxima a neutralidade, e na forma livre (NH_3), que é tóxica em pH acima de 9,5 (VON SPERLING, 2002). Segundo Bernet *et al.*, (2000) e Constable *et al.* (2003), o lançamento de efluentes contendo amônia é indesejável, pois causa excessiva demanda de oxigênio nos corpos receptores e também pode ser tóxico ao meio aquático afetando a vida dos organismos, principalmente aos peixes. Estes riscos ecológicos estão inter-relacionados com a concentração da amônia e fatores como pH, temperatura e concentração do oxigênio dissolvido já que a alterações nestas variáveis pode induzir o aumento na concentração da forma livre da amônia.

Em meio aeróbio irá ocorrer a nitrificação, que é definida como a oxidação do nitrogênio amoniacal (N-NH_4^+) a nitrato (N-NO_3^-) via nitrito (N-NO_2^-) utilizando o oxigênio molecular (O_2) como receptor final de elétrons, conforme exemplificado nas Equações 1, 2 e 3 (ARAÚJO Jr. 2006).



As Equações 1 e 2 expressam, de forma simplificada, as etapas intermediárias da nitrificação, realizadas por bactérias autótrofas quimiossintetizantes

comumente do gênero *Nitrossomonas* e *Nitrobacter*, respectivamente. Na Equação 3 está representado o processo total de oxidação do N-amoniaco, que requer uma demanda de oxigênio igual $4,57 \text{ gO}_2/\text{gN}_{\text{oxidado}}$ com consumo de $7,14 \text{ g}$ de alcalinidade/ $\text{gN}_{\text{oxidado}}$ (TCHOBANOGLIOUS *et al.*, 2003). O consumo de alcalinidade ocorre devido à geração de íons H^+ na nitrificação e, dependendo da concentração, pode haver decréscimo da capacidade tampão do efluente favorecendo a redução do pH.

As reações de nitrificação podem ser afetadas por vários fatores ambientais incluindo temperatura, pH, alcalinidade, oxigênio dissolvido, substâncias tóxicas ou inibidoras, entre outros. De acordo com Araújo Jr. (2006), esses fatores podem ter uma ação direta na atividade enzimática e na velocidade de crescimento, ou indireta, na estrutura do biofilme, velocidade de difusão e solubilidade do oxigênio.

De acordo com von Sperling (2002) a faixa ótima para temperatura para que ocorra a nitrificação é de 25 a $36 \text{ }^\circ\text{C}$; pH $6,5$ a $7,2$, o oxigênio dissolvido mínimo deve ser de $2,0 \text{ mg L}^{-1}$. Com relação à toxicidade, os organismos nitrificantes são sensíveis a um amplo número de compostos orgânicos e inorgânicos, sendo que as concentrações inibitórias para eles são bem menores que para os organismos heterotróficos aeróbios. Dentre os compostos tóxicos estão incluídos os solventes orgânicos, aminas, proteínas, compostos fenólicos, alcoóis, cianetos, éteres, entre outros. Os metais também produzem efeito tóxico nas bactérias nitrificantes, sendo observada completa inibição da oxidação da amônia em concentrações de níquel, cromo e cobre da ordem de $0,25 \text{ mg L}^{-1}$, $0,25 \text{ mg L}^{-1}$ e $0,10 \text{ mg L}^{-1}$, respectivamente (TCHOBANOGLIOUS *et al.*, 2003; ARAÚJO Jr. 2006).

O formaldeído é um dos compostos orgânicos que podem desestabilizar a ação dos organismos nitrificantes. Batista (2007) observou o efeito da toxicidade do formaldeído na atividade dos organismos nitrificantes aplicando diferentes concentrações de formaldeído ao esgoto sanitário. Estes efeitos foram observados devido ao decréscimo da concentração de nitrito e nitrato até o 189º dia de operação, onde as concentrações estabilizaram em $0,53 \pm 0,58 \text{ mg L}^{-1}$ e $8 \pm 5 \text{ mg L}^{-1}$ respectivamente.

Segundo Campos *et al.* (2003), trabalhando com água residuária de alta concentração, uma das formas de controlar a eficiência de nitrificação seria variando o tempo de detenção hidráulica.

3.4 Ecotoxicologia

O controle de qualidade das águas residuárias, baseados em análises químicas globais como Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), sólidos suspensos, concentrações de metais e de outras substâncias de caráter orgânico ou inorgânico, cujos limites encontram-se estabelecidos nas legislações ambientais, não é suficiente para avaliar o potencial risco ambiental, pois tais análises não representam o real efeito tóxico ao ecossistema aquático, por este ser uma resposta biológica. Esta avaliação é necessária e para isto, faz-se o uso de ensaios biológicos que podem fornecer uma medida direta e adequada dos impactos dos contaminantes no ambiente (HERNANDO *et al.*, 2005; COSTA *et al.*, 2008).

Compreendida pela toxicologia, a ecotoxicologia estuda os efeitos de substâncias naturais ou sintéticas sobre os organismos vivos, populações e comunidades, animais e vegetais, constituintes do ecossistema e da biosfera, incluindo assim a interação das substâncias com o meio nos quais os organismos vivem num contexto integrado. Porém, ao contrário da toxicologia ambiental, não abrange os efeitos causados aos seres humanos. A ecotoxicologia aquática vem neste contexto fazendo o uso de espécies representativas da coluna d'água (COSTA *et al.*, 2008; NEWMAN e UNGER, 2010; ZAGATTO e BERTOLETTI, 2008).

Nos estudos ecotoxicológicos o principal instrumento é o teste de toxicidade que pode fornecer uma medida de todo o impacto tóxico de uma substância, composto ou efluente. Neste último caso o efeito adverso é devido a uma mistura complexa de substâncias químicas que integra diferentes fatores, tais como pH, solubilidade, antagonismo ou sinergismo, biodisponibilidade, etc. (COSTA *et al.*, 2008).

Os métodos de ensaio de toxicidade incluem testes agudos, crônicos, de bioacumulação, biodegradação e biomarcação que podem ser realizados sob condições controladas, tanto em laboratório como em campo. Estes bioensaios podem ter como indicador da toxicidade da substância testada um efeito biológico, que é medido por meio do crescimento, reprodução, letalidade, modificações comportamentais e fisiológicas, assim como alterações bioquímicas, genéticas ou teratogênicas (COSTA *et al.*, 2008; ZAGATTO e BERTOLETTI, 2008).

Ensaio de toxicidade crônica permitem avaliar os efeitos adversos mais sutis aos organismos estudados. Nestes testes, os indivíduos são expostos a níveis subletais do agente químico que pode não provocar a morte, mas causar distúrbios fisiológicos e/ou comportamentais em longo prazo (ZAGATTO e BERTOLETTI, 2008).

Os ensaios de toxicidade aguda procuram estimar a concentração da substância-teste que causa efeito a 50% da população exposta durante um período de tempo determinado: 24, 48, 72 ou 96 horas (ZAGATTO e BERTOLETTI, 2008). Os resultados são obtidos por meio de cálculos estatísticos expressos em unidades numéricas, tais como Concentração Letal Mediana – CL50 ou Concentração Efetiva Mediana – CE50: concentração do efluente que causa efeito deletério (geralmente imobilidade) a 50% dos organismos nas condições de ensaio, e Concentração de Efeito Não Observado – CENO: maior concentração do efluente que não causa efeito deletério estatisticamente significativo na sobrevivência e reprodução dos organismos nas condições de ensaio (BRASIL, 2011a; WALKER *et al.*, 2006; ZAGATTO e BERTOLETTI, 2008).

Dentre os métodos estatísticos para determinação da CL50 e CE50 encontram-se os métodos Spearman-Kärber e Trimmed Spearman-Kärber, que são não paramétricos com boas propriedades estatísticas, são fáceis de usar e recomendados para cálculos precisos com intervalo de confiança de 95%. Eles são válidos para curvas dose-resposta simétricas e assimétricas. A limitação desses métodos é que devem ser utilizados para os ensaios de toxicidade aguda (COSTA *et al.*, 2008).

Segundo Costa *et al.* (2008) as informações obtidas pelos estudos ecotoxicológicos são essenciais para:

- Avaliar a qualidade da água;
- Determinar os níveis de contaminantes no ambiente e seus destinos;
- Estimar o grau de periculosidade dos contaminantes e seus metabólitos para os organismos vivos;
- Indicar os níveis máximos permitidos para os contaminantes, ou seja, os padrões a serem mantidos;
- Diagnosticar e prognosticar os efeitos dos contaminantes no ambiente, bem como o efeito das medidas tomadas;
- Controlar a emissão de efluentes; e
- Avaliar os riscos ecológicos.

A aceitação de um teste de toxicidade como instrumento eficaz de análise exige garantias de normalização e validação do procedimento experimental para avaliar a sua sensibilidade, exatidão ou precisão (HERNANDO, 2005). Há diversos testes normalizados por entidades de padronização, alguns destes órgãos são: United States Environmental Protection Agency – EPA, American Society for Testing and Materials – ASTM, Organisation for Economic Co-operation and Development – OECD, Environment Canada, dentre outros. No Brasil, os órgãos responsáveis pela padronização de testes são a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB).

Além da normalização, a execução do bioensaio também necessita da definição dos organismos a serem utilizados, já que quando estes são expostos a uma substância química podem apresentar respostas variadas dependendo da sensibilidade. Por isso, para que os testes sejam ferramentas eficientes, essenciais na prevenção de riscos ambientais e também representativos do ecossistema, não é recomendado o uso de apenas uma espécie e sim uma bateria de bioensaios envolvendo uma variedade de espécies de diferentes níveis tróficos (FARRÉ e BARCELÓ, 2003).

Hernando *et al.* (2005), em testes de toxicidade com os organismos *Vibrio fischeri*, *Daphnia magna* e *Pseudokirchneriella subcapitata*, verificou que os organismos apresentavam respostas diferentes quando expostos ao mesmo efluente de uma estação de tratamento de esgoto, visto que a bactéria *V. fischeri* não apresentou toxicidade, enquanto que para os demais organismos o efluente foi tóxico. Nesse sentido, a recém publicada Resolução CONAMA 430/2011, determina que os ensaios ecotoxicológicos realizados em efluentes utilizem organismos aquáticos de pelo menos dois níveis tróficos diferentes (BRASIL, 2011a).

Com a associação dos métodos físicos e químicos, que identificam e quantificam as concentrações das substâncias tóxicas e ecotoxicológicos, avaliando o efeito dessas substâncias sobre sistemas biológicos, é possível obter uma avaliação de risco ambiental mais completa, com visão geral dos possíveis impactos causados no meio ambiente estudado e assim buscar medidas mais efetivas para o controle e redução destes.

3.5 Organismos-teste

Segundo Zagatto e Bertolletti (2008) a seleção dos organismos a serem utilizados nos testes deve receber uma atenção especial a fim de garantir a confiabilidade dos resultados obtidos. Por isso, devem-se escolher espécies pertencentes a certos grupos representativos do ecossistema, como os produtores, consumidores e decompositores.

Na escolha da espécie deve ser observado a sensibilidade, pois é preciso que o organismo seja bastante sensível a uma diversidade de agentes químicos para possibilitar a obtenção de resultados precisos com boa repetibilidade e reprodutibilidade. O controle da sensibilidade é realizado por meio de ensaios periódicos com determinadas substâncias de referência (substância recomendada para avaliação da precisão analítica dos métodos utilizados, como o cloreto de sódio), procedimento este que permite maior confiabilidade nos resultados obtidos ao longo do tempo (ZAGATTO e BERTOLETTI, 2008).

Para tanto é recomendável que as espécies a serem utilizadas devem ter a fisiologia, a genética, os hábitos alimentares, a reprodução e o comportamento conhecidos, a fim de facilitar a interpretação dos resultados. Além disso, devem apresentar as seguintes características: sensibilidade a baixas concentrações e a uma ampla variedade de compostos tóxicos, resposta relevante aos contaminantes, elevada disponibilidade e abundância, uniformidade e estabilidade genética nas populações, significado ambiental em relação à área de estudo, ampla distribuição no ambiente e, facilidade de obtenção, cultivo e de adaptação às condições de laboratório (COSTA *et al.*, 2008; RAMÍREZ e MENDOZA, 2008; ZAGATTO e BERTOLETTI, 2008).

Dentre alguns dos organismos aquáticos utilizados em bioensaios pertencentes a diferentes níveis tróficos tem-se: a bactéria *Vibrio fischeri*; algas *Spirillum volutans*, *Chlorella vulgaris*, *Scenedesmus subspicatus*, *Pseudokirchneriella subcapitata*; microcrustáceo *Daphnia similis*, *Daphnia magna*, *Ceriodaphnia dubia*, *Ceriodaphnia silvestrii*; peixes *Danio rerio*, *Pimephales promelas*, *Poecilia reticulata*; e planárias *Girardia schubarti*, *Girardia tigrina* e *Polycelis felina* (ALONSO e CAMARGO, 2011; COSTA *et al.*, 2008; ZAGATTO e BERTOLETTI, 2008).

3.5.1 *Pseudokirchneriella subcapitata*

As algas são componentes essenciais dos ecossistemas aquáticos por produzirem oxigênio, substâncias orgânicas e também por ser base da cadeia alimentar

A espécie *Pseudokirchneriella subcapitata* (antiga *Selenastrum capricornutum*) pertence à Divisão *Chlorophyta*. O Gênero *Pseudokirchneriella* faz parte da Classe *Chlorophyceae*, que inclui organismos unicelulares e fotoautotróficos com simetria externa radial ou próxima de radial. As espécies pertencentes a este gênero possuem células lunadas, isoladas ou em grupos constituindo colônias múltiplas (BICUDO e BICUDO, 1970 *apud* CALOTO-OLIVEIRA, 2007).

A ação de substâncias químicas tóxicas em algas pode afetar diretamente a estrutura e função de um ecossistema, resultando em depleção de oxigênio e diminuição da produtividade primária (MA *et al.*, 2007). Por isso, algumas microalgas, como a *P. subcapitata*, são consideradas modelos de estudo para a realização de bioensaios, pois apresentam alta sensibilidade a vários produtos químicos, suas necessidades nutricionais são conhecidas, têm uma alta taxa de crescimento permitindo conhecer em poucos dias, o efeito do agente tóxico, além de seu manuseio no laboratório ser relativamente simples (GAETE *et al.*, 2007).

Por possuírem distribuição cosmopolita em solos e corpos d'água, as algas da Divisão *Chlorophyta* têm sido amplamente utilizadas em estudos de ecotoxicidade de poluentes ambientais, além de serem recomendadas como organismo-teste no registro de agentes químicos e pesticidas por órgãos ambientais nacionais e internacionais (CALOTO-OLIVEIRA, 2007).

3.5.2 *Daphnia similis*

As espécies do gênero *Daphnia* (Filo: *Arthropoda*, Subfilo: *Crustacea*, Classe: *Branchiopoda*, Ordem: *Cladocera*) são microcrustáceos planctônicos filtradores, consumidores primários de algas, bactérias, protozoários e outras partículas em suspensão. Representam, juntamente, com outros grupos que compõem o zooplâncton, o elo intermediário da cadeia alimentar, através do qual a energia flui para os níveis tróficos superiores, chegando até peixes, aves aquáticas e o homem (DANTZGER, 2010; ROCHA e GÜNTZEL, 1999; SHAW *et al.*, 2008).

Os cladóceros são os microcrustáceos mais evoluídos, atingem maior diversificação ecológica, são vulgarmente conhecidos por pulgas d'água e têm grande representatividade nos corpos de água lânticos de todo o mundo. Caracterizam-se por apresentar segmentação reduzida do corpo, tórax e abdômen fundidos em um tronco, no qual estão inseridos quatro a seis pares de apêndices na porção anterior, os quais funcionam individualmente como brânquias e estruturas filtradoras de alimento. Apresentam carapaça única, dobrada na porção dorsal,

dando impressão de estrutura bivalve, a qual encerra todo tronco, mas usualmente não a parte cefálica. A maioria das espécies tem tamanho compreendido entre 0,5 a 3,0 mm (ROCHA e GÜNTZEL, 1999).

Os dafinídeos são capazes de se reproduzir por partenogênese, resultando na produção de animais geneticamente uniformes, fator que minimiza variabilidade analítica causada por instabilidade genética dos lotes. Sob condições adversas, tais como superpopulação, baixas temperaturas, redução do nível de água ou escassez de alimento, surgem geralmente os machos e fêmeas com ovos haplóides, podendo ocorrer a reprodução sexuada e a geração de ovos de resistência chamados de efípios (DANTZGER, 2010; SHAW *et al.*, 2008)

As espécies do gênero *Daphnia* estão bem estabelecidas como um organismo-teste, para investigar o impacto de substâncias tóxicas em água doce, inclusive com vários protocolos padronizados em agências internacionais de meio ambiente (FERRÃO-FILHO *et al.*, 2009).

Dentre os organismos padronizados para testes de toxicidade aguda, tem-se a *Daphnia magna* e *Daphnia similis*, sendo basicamente diferenciadas pelo tamanho. Segundo Costa *et al.* (2008), esta característica pode influenciar na toxicidade das substâncias, no entanto, estudos realizados por Beatrici *et al.* (2006) e Buratini *et al.* (2004) comparando a sensibilidade destas espécies mostram que ambas apresentam sensibilidade semelhante, sendo a *D. similis* mais sensível para algumas substâncias e efluentes.

Além da sensibilidade outras propriedades importantes desta espécie são a facilidade de manipulação e manutenção em laboratório, os baixos tempos de geração de aproximadamente uma semana de cultura (20 °C), a manutenção da cultura em meio relativamente simples e a alimentação com dietas que incluem concentrações controladas de algas e/ou bactérias (BEATRICI *et al.*, 2006; BURATINI *et al.*, 2004; SHAW *et al.*, 2008)

3.5.3 *Poecilia reticulata*

A espécie *Poecilia reticulata*, popularmente conhecido como guppy, lebiste ou guaru, habita as águas de canais, rios, lagoas e reservatórios na América do Sul (ARAÚJO *et al.*, 2008; MOREIRA *et al.*, 2010). Essa espécie caracteriza-se por ser vivípara, ter dimorfismo sexual com fêmeas maiores que os machos, fecundação interna e os machos apresentam uma nadadeira anal modificada. Embora algumas espécies da mesma família sejam piscívoras, a maioria é onívora, alimentando-se de invertebrados, detritos, algas e plantas (ARAÚJO *et al.*, 2009).

Ensaio ecotoxicológicos com peixes são tradicionalmente empregados em muitas partes do mundo, uma vez que estes desempenham um papel importante na cadeia alimentar. Devido à sua relevância tem-se desenvolvido uma variedade de bioensaios utilizando espécies de peixes que são sensíveis à presença de determinados agentes tóxicos (IANNACONE *et al.*, 2007).

Dependendo dos objetivos do estudo, dos recursos disponíveis, das exigências do organismo e as características da substância-teste (solubilidade, volatilidade, bioacumulação), diferentes formas de exposição do organismo ao agente tóxico podem ser utilizadas nos testes de toxicidade em laboratório (FARRÉ e BARCELÓ, 2003; ZAGATTO e BERTOLETTI, 2008).

Os testes podem ser realizados em sistema estático onde os organismos são expostos à mesma solução durante o período (de 48 até 96 horas); sistema semi-estático, realizando transferência dos organismos às novas soluções, ou faz-se troca parcial da solução-teste; e sistema de fluxo contínuo, neste a solução teste flui continuamente através dos recipientes onde estão os organismos-teste (ZAGATTO e BERTOLETTI, 2008). No entanto, devido à rapidez, facilidade de manutenção e baixo custo, os testes estáticos de toxicidade aguda são os mais utilizados (FARRÉ e BARCELÓ, 2003).

Os resultados de vários estudos, como os efetuados por Araújo *et al.* (2008) e Bertoletti (2009), mostram que a espécie *P. reticulata* é muito sensível, além de apresentar facilidade no cultivo e reprodução contínua ao longo do ano, portanto,

adequada para programas de biomonitoramento e também recomendada como um organismo-teste padrão nos ensaios ecotoxicológicos agudos com substâncias e efluentes.

3.5.4 *Girardia tigrina*

A espécie de água doce *Girardia tigrina*, é uma planária pertencente à infra-Ordem Paludicola (Platyhelminthes: Tricladida). São platelmintos acelomados de vida livre, morfologicamente simples, possuem simetria bilateral, um metabolismo complexo, bem como os tecidos e órgãos especializados (PRÁ *et al.*, 2005). Com ampla distribuição geográfica, habitam rios, córregos de leito arenoso, pedregoso e correnteza rápida, lagos, lagoas, brejos, represas, tanques e aquários, em água limpa, turva ou estagnada rica em vegetação e matéria orgânica (FORNERIS, 1999).

Por serem saprófagas (decompositoras), as planárias têm função muito importante nos ecossistemas aquáticos, realizando a transformação dos nutrientes, que são devolvidos para o ambiente, fechando o ciclo (BARROS *et al.*, 2006).

As planárias são indicadas para teste de toxicidade, devido a alta sensibilidade a substâncias químicas e agentes tóxicos, permitindo a avaliação dos efeitos por meio de vários biomarcadores. São utilizadas em diversos estudos toxicológicos de genotoxicidade, como carcinogênese, mutagênese e, pela alta taxa de proliferação celular e capacidade de regeneração, faz do organismo adulto um organismo apropriado a ser utilizado em testes teratogênicos (BARROS *et al.*, 2006; KNAKIEVICS e FERREIRA, 2008; PRÁ *et al.*, 2005).

Em relação ao cultivo, planárias de água doce são de fácil criação e manutenção em laboratório, atributos que favorecem a sua utilização como organismo-teste (BARROS *et al.*, 2006; HORVAT *et al.*, 2005; KNAKIEVICS e FERREIRA, 2008; PRÁ *et al.*, 2005).

Ensaio de toxicidade aguda com planárias de água doce utilizando a mortalidade como critério de avaliação não são muito difundidos, principalmente quando se referem a organismos jovens. Uma metodologia de avaliação que

mostrou boa reprodutibilidade foi proposta por Preza *et al.* (2001), onde fez o uso de organismos jovens com no máximo 10 dias de vida, após a eclosão, em testes de toxicidade aguda expondo estes organismos a diversas concentrações de dicromato de potássio, avaliando a mortalidade. O estudo mostrou que testes nestas condições são viáveis indicando que além da espécie *G. tigrina* ser útil em testes de toxicidade padronizados, pode fornecer informações sobre a resposta de uma espécie regional ao impacto potencial ecológico.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Sistema combinado de tratamento e controle operacional

O sistema combinado de tratamento estudado é composto por um Filtro Anaeróbico (FA) e um Biofiltro Aerado (BAS) ambos em escala de bancada, localizado no Laboratório de Saneamento (LABSAN) da Faculdade de Engenharia Civil Arquitetura e Urbanismo (FEC) da UNICAMP.

Este sistema de filtros biológicos foi construído no trabalho de mestrado de Castagnato (2006), encontra-se em operação contínua desde junho de 2005 e suas características estão descritas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Características do sistema combinado anaeróbio-aeróbio

Características	Descrição
Dimensões dos reatores	Altura 42 cm
	Diâmetro 30 cm
	Volume total 20 L em cada reator
	Volume útil 17,6 L em cada reator
	Meio suporte Anéis de Raschig: altura 1,5 cm e diâmetro 1,5 cm
TDH	16 h, sendo 8 h em cada reator
Unidades	Reatores FA + BAS
	Ambos os reatores possuem fundo falso perfurados, para melhor distribuição do efluente colocado a 4,5 cm do fundo. BAS: contém, inserido na região abaixo do fundo falso, quatro pontas porosas, conectadas a compressores de ar utilizados em aquários para fornecimento de oxigênio.

Os detalhes construtivos pode ser vistos na Figura 4.1 com as imagens dos reatores antes da sua montagem e após com o fundo falso; na Figura 4.2 o fundo do BAS com as pontas porosas e após o preenchimento com os anéis de Rashing e na

Figura 4.3, o cesto para coleta dos anéis de Rashing, utilizado para amostragem do biofilme anaeróbio.

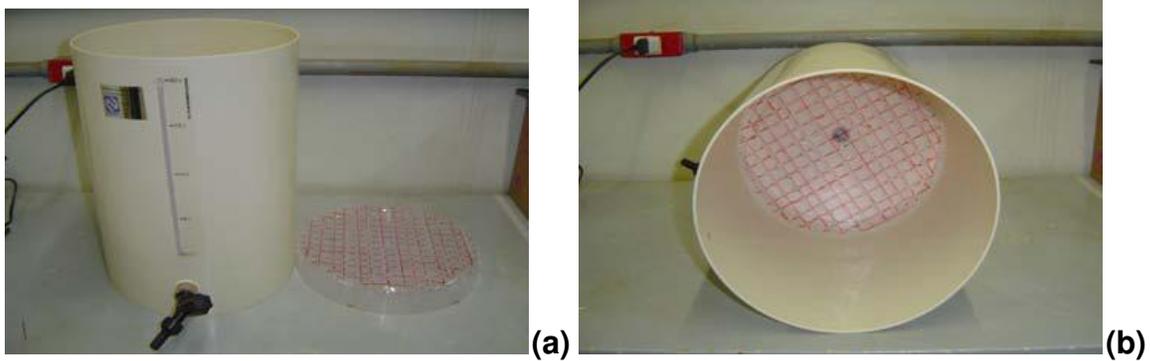


Figura 4.1: (a) Barrilete e fundo falso; (b) reator montado com o fundo falso (CASTAGNATO, 2006).

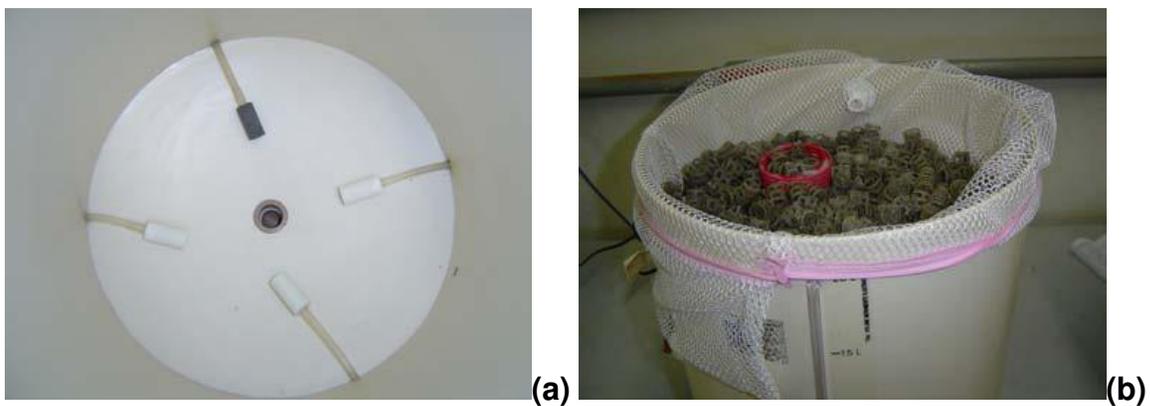


Figura 4.2: (a) Pontas porosas no fundo do reator; (b) reator preenchido com anéis de Raschig (CASTAGNATO, 2006).



Figura 4.3: Cestos para coleta de anéis de Raschig ao longo do reator (CASTAGNATO, 2006).

No trabalho de Castagnato (2006), o sistema operou com tempo de detenção hidráulica (TDH) de 24 h, durante 148 dias apenas com esgoto sanitário e 162 dias aplicando formaldeído em quatro fases: 50, 100, 200, e, 400 mg L⁻¹. Após este trabalho, Batista (2007) em seu mestrado, operou e monitorou o sistema por 420 dias, mantendo TDH de 24 h e fez a adição de 100, 200, 400, 600, 800, e 1000 mg L⁻¹ de formaldeído. No entanto, a primeira adição de formaldeído ocorreu no 43º dia devido a um choque ácido no sistema, coincidindo com o final do período de operação de Castagnato (2006), onde o pH do esgoto bruto atingiu o valor de 2,0. Com o término do projeto de Batista (2007), até o presente estudo o sistema continuou em operação com o mesmo TDH, adicionando 100 mg L⁻¹ de formaldeído.

Neste trabalho, manteve-se o mesmo sistema, mantendo as características dos reatores e meio suporte, no entanto, houve algumas mudanças na operação e equipamentos. Foi utilizada bomba peristáltica (marca: Provitec – modelo: DM 5000) para alimentar o sistema, compressor de ar (marca: Big Air – modelo: A420) para fornecimento de oxigênio no BAS, bomba submersa (marca: Sarlobetter 250) com o objetivo de manter os sólidos presentes no esgoto bruto em suspensão enquanto ele estiver no reservatório de alimentação.

Nas Figuras 4.4 e 4.5, é apresentado o sistema de tratamento com as unidades constituintes e seus respectivos pontos de amostragem. A unidade inicial é o reservatório de alimentação, Ponto 1, onde se encontra o esgoto que será bombeado ao FA. O efluente anaeróbico segue por gravidade para ao tratamento no BAS, na saída do FA é realizada a coleta do Ponto 2. O Ponto 3 é constituído pelo efluente decantado do BAS e por isso a coleta é realizada na saída do decantador.

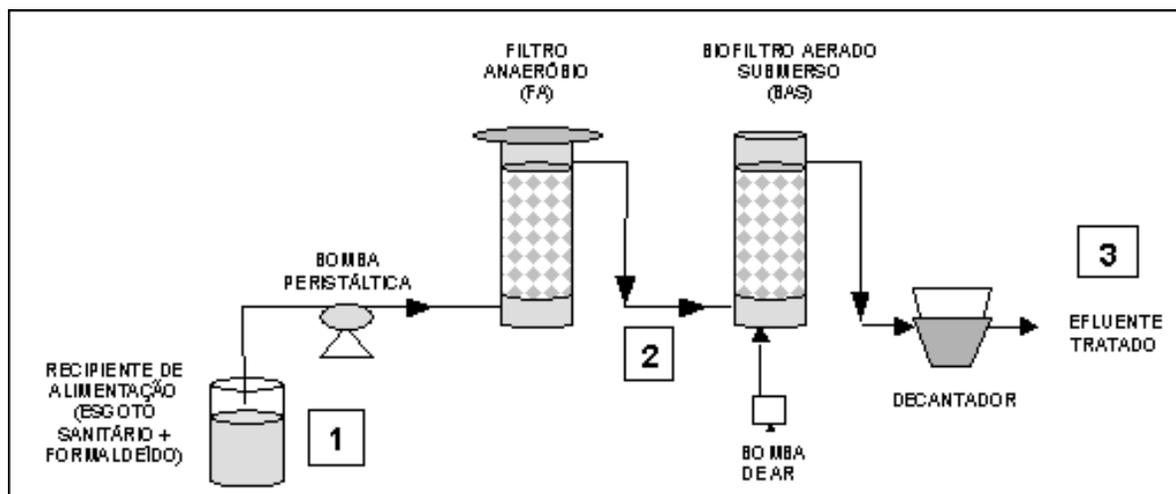
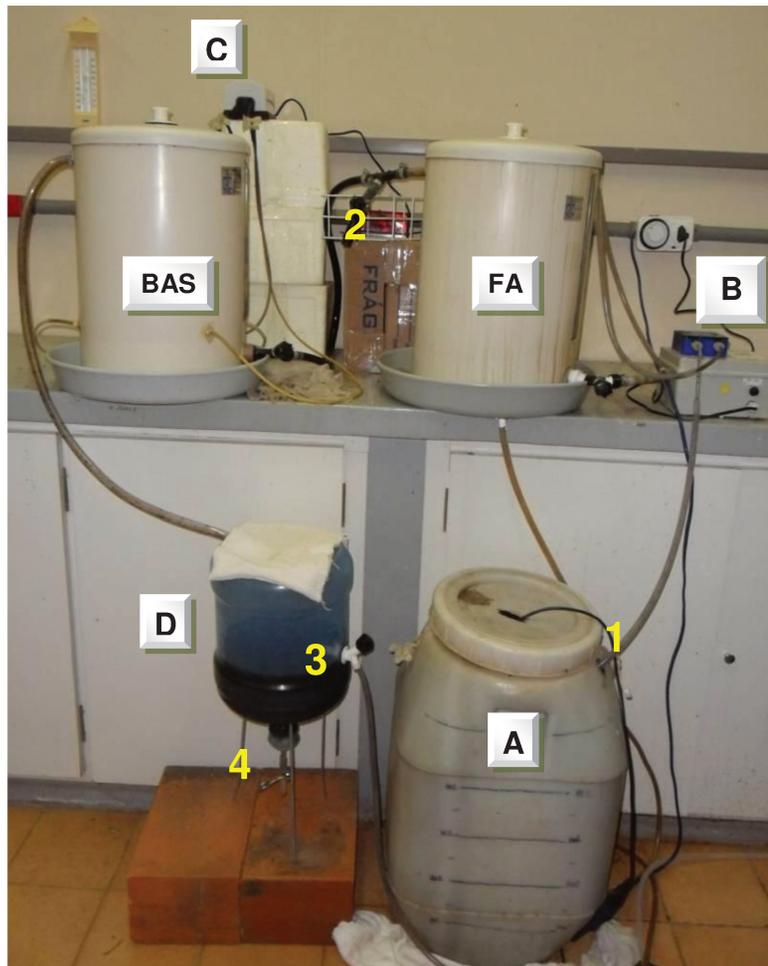


Figura 4.4: Sistema combinado FA/BAS (NOUR *et al.*, 2011).



A – Reservatório de alimentação; B – Bomba peristáltica – alimentação; C – Compressor de ar;
D – Decantador; 1 – Afluente bruto; 2 – Efluente do FA; 3 – Efluente do BAS (saída do decantador);
4 – Coleta de lodo

Figura 4.5: Sistema combinado de tratamento FA/BAS.

A operação e monitoramento, referente a este estudo, iniciaram em agosto de 2009, com TDH de 16 h, sendo 8 h para cada reator. Com isso, a vazão de operação da bomba peristáltica, que alimenta o sistema, foi de $49,0 \text{ mL min}^{-1}$ totalizando $52,9 \text{ L dia}^{-1}$. A cada hora a bomba peristáltica funcionava por 45 min e permanecia desligada por 15 min para minimizar o desgaste do aparelho. Este controle do funcionamento da bomba foi feito com um temporizador.

A coleta das amostras foram realizadas nos pontos 1, 2 e 3, conforme indicado na Figura 4.5, sendo respectivamente denominados de esgoto afluente bruto, efluente do filtro anaeróbio e efluente do decantador.

Visando reduzir a interferência causada pelo arraste de biomassa do BAS, no trabalho de Batista (2007), houve a necessidade de reter estes sólidos, deixando a amostra coletada em repouso, simulando a ação de um decantador. Com intuito de manter a qualidade do efluente final, neste trabalho foi instalado um decantador composto por um galão plástico de 10 L, com saída para o efluente decantado e na parte inferior saída para coleta de lodo.

4.1.1 Coleta do afluente bruto

O esgoto utilizado neste trabalho foi proveniente da Faculdade de Engenharia Agrícola – FEAGRI, oriundo de laboratórios, oficina mecânica, sanitários e cozinha.

O ponto de coleta situa-se no campo experimental, onde encontra-se em funcionamento o SITRAE - Sistema Integrado de Tratamento e Reuso Agrícola de Esgoto, composto por um Reator Anaeróbio Compartimentado (RAC). Neste sistema, existe instalada uma caixa de equalização, com a finalidade de regular o nível de esgoto, garantindo o funcionamento da bomba de alimentação que recalca o esgoto para o RAC. Na tubulação de entrada do sistema RAC há uma derivação por onde era feita a coleta do esgoto bruto (Figura 4.6).

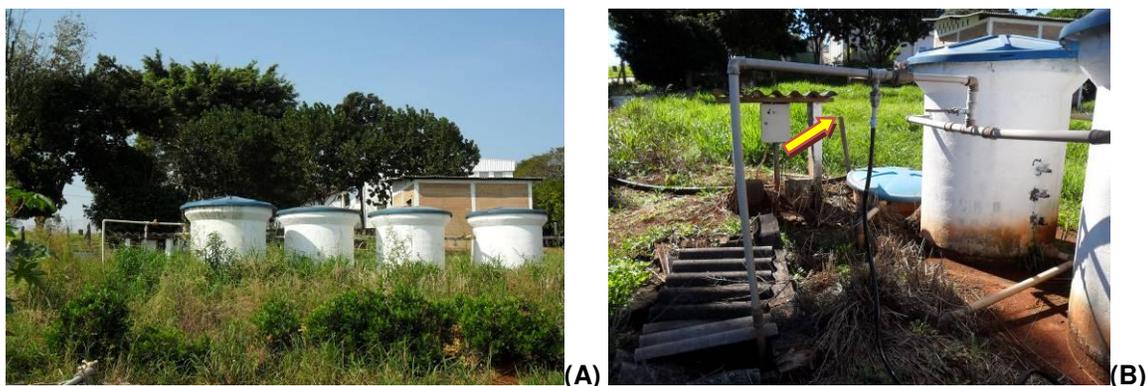


Figura 4.6: Ponto de coleta de esgoto bruto na FEAGRI: (A) SITRAE; (B) Indicação do ponto de coleta de esgoto bruto.

A coleta foi realizada a cada 15 dias, no período da manhã ou tarde conforme as condições do tempo e disponibilidade do transporte. O esgoto foi acondicionado em bombonas de polietileno com capacidade de 20 e 25 L, transportados e armazenados no Laboratório de Saneamento da FEC.

Diariamente pela manhã, era feita a reposição do efluente sanitário no reservatório de alimentação (Ponto 1). Este era preenchido com 50 L de esgoto bruto e o volume de formaldeído necessário para se obter a concentração de estudo. Quando verificou-se a necessidade de adicionar alcalinidade, o volume da solução alcalinizante (carbonato de sódio) requerido para atender a necessidade do sistema, também foi adicionado nesta etapa. No reservatório, o afluente foi mantido sob agitação contínua com o auxílio de uma bomba submersa, garantindo a homogeneização do esgoto e impedindo a sedimentação dos sólidos. A caracterização do esgoto afluente contendo formaldeído e alcalinizante foi realizada em todas as etapas do estudo juntamente com os demais pontos de monitoramento.

4.1.2 Etapas do estudo

O trabalho dividiu-se em quatro fases, determinadas pela concentração de formaldeído afluente, conforme apresentado na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Concentração média real de formaldeído em cada faixa de concentração aplicada

Fases do estudo	Dia de início da Operação do Sistema Combinado (*)	Duração de cada Fase (dia)	HCHO Afluente Teórica (mg L ⁻¹)	HCHO Afluente Aplicado (mg L ⁻¹)	
				MED	DP
Fase 1	1	161	100	89,5	13,5
Fase 2	162	153	200	203,7	18,3
Fase 3	315	259	400	434,2	52,0
Fase 4	574	80	500	503,6	38,9
Total		653			

Sendo: MD: Média

DP: Desvio Padrão

(*): Início de cada faixa de aplicação da concentração de formaldeído

A duração de cada fase foi definida pelo desempenho do sistema, avaliado pela estabilidade e ensaios toxicológicos, sendo estabelecido como o momento de mudança de fase a obtenção de no mínimo cinco resultados toxicológicos confiáveis para cada organismo.

4.2 Métodos analíticos

O monitoramento do sistema foi feito por meio de análise das variáveis físicas, químicas e biológicas descritas na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Métodos analíticos utilizados no procedimento experimental

Variável de estudo	Metodologia	Ponto de amostragem	Frequência
Ácidos Orgânicos Voláteis	Titulométrico - DiLallo e Albertson (1961)	1 – 2 – 3	2 X / semana
Alcalinidade Parcial	Titulométrico – Ripley <i>et al.</i> (1986)	1 – 2 – 3	diário
Alcalinidade Total	SM20* 2320 B	1 – 2 – 3	diário
Condutividade elétrica	SM20* 2510 B	1 – 2 – 3	diário
Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)	SM20* 5210 B	1 – 2 – 3	1 X / mês
Demanda Química de Oxigênio (DQO)	SM20* 5520 D	1 – 2 – 3	1 X / semana
DQO filtrada	SM20* 5520 D	1 – 2 – 3	1 X / semana
Dureza	SM20* 2340 C	1 – 2 – 3	2 X / semana
Formaldeído	NIOSH** 3500(2)	1 – 2 – 3	1 X / semana
Índice Volumétrico de Lodo	Von Sperling (1996)	4	2 X / mês
Oxigênio Dissolvido	SM20* 4500-O-G	1 – 2 – 3	diário
Nitrato	Colorimétrico-NitraVer 5-HACH	1 – 2 – 3	2 X / mês
Nitrito	SM20* 4500 NO ₂ B	1 – 2 – 3	2 X / mês
Nitrogênio Amoniacal	SM20* 4500 NH ₃ C	1 – 2 – 3	2 X / mês
Nitrogênio Kjeldahl	SM20* 4500 N Org B e 4500 NH ₃ C	1 – 2 – 3	2 X / mês
pH	SM20* 4500 H ⁺ B	1 – 2 – 3	diário
Análise Microbiológica do Lodo	CETESB (2000)	4	2 X / mês
Sólidos Totais	SM20* 2540 B	4	2 X / mês
Sólidos Suspensos Totais	SM20* 2540 D	1 – 2 – 3	1 X / semana
Sólidos Suspensos Fixos	SM20* 2540 E	1 – 2 – 3	1 X / semana
Sólidos Suspensos Voláteis	SM20* 2540 E	1 – 2 – 3	1 X / semana
Temperatura	SM20* 2550 B	1 – 2 – 3	diário

(*) SM20 - Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 20th (APHA *et al.*, 1998).

(**) NIOSH - National Institute for Occupational Safety and Health

As análises de oxigênio dissolvido, condutividade elétrica e dureza, por serem parâmetros importantes a serem realizados nos testes de toxicidade, foram incluídas no monitoramento contínuo do sistema, já que uma grande variação na concentração destes poderia afetar a sobrevivência dos organismos durante a exposição.

4.2.1 Análise microbiológica do lodo do decantador

A análise qualitativa dos microrganismos presentes no lodo foi realizada com objetivo de obter maior conhecimento das alterações provocadas pela presença de formaldeído, em diferentes concentrações, na densidade e diversidade da biomassa presente no BAS. A microscopia foi

A coleta foi realizada no ponto 4, amostrando o lodo de arraste contido no efluente do BAS, e que ficou retido no fundo do decantador. A microfauna foi observada e avaliada utilizando-se microscópio óptico e registrada em fotografias com base na CETESB (2000).

4.3 Quantificação do formaldeído e tratamento dos interferentes

Na quantificação do formaldeído, utilizou-se o método do ácido cromotrópico conforme especificado no trabalho de Castagnato (2006). Esta metodologia apresenta como interferentes os compostos nitrogenados nitrito e nitrato, formados no tratamento aeróbio. Estes compostos reagem com o ácido cromotrópico em meio ácido interferindo no desenvolvimento da cor específica da metodologia e, conseqüentemente, na obtenção dos resultados corretos.

No início do projeto, o pré-tratamento da amostra do efluente do BAS foi realizado conforme descrito por Castagnato (2006). Consistia na passagem da amostra diluída a 20% por uma coluna de zinco ativada com solução 0,01 M de sulfato de cobre pelo período de 1 hora, a fim de eliminar a interferência do nitrito e nitrato pela redução de ambas as formas oxidadas à amônia.

Esta metodologia mostrou-se trabalhosa, tanto pelo tempo de contato necessário da amostra com a coluna (1 hora), como pela manutenção, pois necessita de limpezas freqüentes antes e após o uso com a amostra, para repor a película de cobre na superfície do zinco. Desta forma, uma adequação desta metodologia foi realizada e esta descrita no item a seguir.

4.3.1 Pré-tratamento de amostra contendo nitrito e nitrato

Visando a otimização do pré-tratamento da amostra para determinação de formaldeído, uma forma simplificada de contato da amostra com o cádmio proposta por Jones (1989) e Merino (2009) foi testada. Nesta metodologia oxi-redutora, o nitrato foi reduzido a nitrito em contato com o cádmio poroso, sob agitação em meio alcalino, obtendo 94-106% de recuperação em análises de nitrato de amostras de águas naturais.

Buscando a redução do nitrito e nitrato das amostras à amônia, e evitando a utilização do cádmio, que apresenta alta toxicidade, adaptou-se a metodologia utilizada por Castagnato (2006), utilizando-se zinco e cobre e realizando-se a agitação da amostra em mesa agitadora orbital.

Foram realizados diversos testes com o sistema de agitação, porém no presente trabalho será descrita somente a melhor adaptação utilizada para atender a determinação de formaldeído pelo método do ácido cromotrópico, na presença de nitrito e nitrato.

Para o teste, utilizou zinco metálico (granalha), que apresenta superfície amorfa aumentando a área de contato com a amostra. Antes do uso, fez-se limpeza da granalha de zinco com HCl a 10% para remoção de impurezas. Após ser lavado abundantemente com água desionizada foi feita ativação do zinco com solução 0,01 M de sulfato de cobre e seco em estufa a 100 °C. O pré-tratamento consistiu em transferir uma alíquota de 20 mL da amostra do efluente do BAS diluída a 20% para um frasco de vidro com tampa contendo 20 g de zinco ativado com cobre. O frasco com amostra foi fechado e transferido para uma mesa agitadora orbital e mantido sob agitação vigorosa por uma hora, conforme proposto por Merino (2009). Após este procedimento, o sobrenadante foi coletado com pipeta automática, prosseguindo a análise de formaldeído.

4.4 Testes de Toxicidade

Os testes de toxicidade foram realizados com quatro organismos pertencentes a diferentes níveis tróficos: a alga (*Pseudokirchneriella subcapitata*), microcrustáceo (*Daphnia similis*), peixe (*Poecilia reticulata*) e planária (*Girardia tigrina*), baseado nas normas vigentes para cada espécie; ABNT (2004, 2005, 2009) e metodologia proposta por Preza e Smith (2001).

Foram feitos ensaios de toxicidade aguda, para cada espécie nos três pontos de amostragem, permitindo avaliar o tratamento empregado e comparar o efeito causado em cada organismo.

O intervalo entre os testes foi de aproximadamente 20 dias, estabelecido como sendo um período maior que àquele utilizado entre as coletas do esgoto sanitário bruto, que era a cada 15 dias. Esse procedimento visou evitar a realização de testes de toxicidade com o mesmo esgoto, possibilitando uma avaliação do desempenho e operação do sistema em condições próximas as encontradas em estações de tratamento em escala real.

Os pontos de coleta foram os mesmos adotados para o monitoramento das variáveis físicas e químicas, sendo que nos dias de teste, também foram analisadas as variáveis físicas e químicas para a amostra de esgoto bruto sem a adição de formaldeído, como um branco de experimento, a fim de avaliar a possibilidade do esgoto apresentar toxicidade natural. O esgoto bruto sem adição de formaldeído será indicado por EBSF.

Em todas as mudanças no valor da concentração de formaldeído adicionado no esgoto bruto, foram coletadas amostras do esgoto bruto sem formaldeído e dos três pontos amostrais logo em seguida a esta alteração e 16 horas após (TDH do sistema). Nas 16 horas seguintes a aplicação, também foram realizados testes de toxicidade com os organismos estudados. Esta caracterização teve como objetivo avaliar o impacto inicial provocado pela alteração na concentração de formaldeído ao sistema.

Nos demais testes de toxicidade ao logo do monitoramento de cada concentração, a reposição do esgoto sanitário no reservatório de alimentação (Ponto 1) foi realizada 16 horas antes do início da coleta das amostras e preparo dos testes de toxicidade, sem a caracterização inicial do sistema.

Nos dias de realização dos ensaios de toxicidade foram feitos, no controle e nas soluções dos testes, o monitoramento inicial e final das seguintes variáveis: concentração de oxigênio dissolvido, temperatura, pH, condutividade elétrica e dureza. Este monitoramento teve como objetivo avaliar a interferência de alguma variável nos resultados de toxicidade obtidos já que, segundo Zagatto e Bertolletti (2008), estes são os principais fatores abióticos que podem interferir nestes resultados.

A análise dos resultados ecotoxicológicos de *Daphnia similis*, *Poecilia reticulata* e *Girardia tigrina*, foram realizadas por meio do programa Trimmed-Spearman Karber (HAMILTON *et al.*, 1977) e para a alga *Pseudokirchneriella subcapitata* foi calculada a porcentagem de inibição do crescimento algáceo, de acordo com fórmula proposta na NBR 12648 (ABNT, 2005).

Em todos os testes efetuados, as amostras avaliadas sem diluição foram classificadas como tóxicas, quando apresentavam efeito adverso a todos os organismos-teste, e não tóxicas, quando não provocaram efeito observável na população estudada.

4.4.1 *Pseudokirchneriella subcapitata*

Os testes de toxicidade aguda com algas foram realizados seguindo recomendações da norma NBR 12648:2005 (ABNT, 2005).

A cultura inicial de algas foi preparada a partir de suspensões algais provenientes de uma cultura estoque esterilizada com idade entre 03-07 dias, mantida em meio L.C. Oligo (ABNT, 2005). O material utilizado para o teste: vidraria e o meio L.C. Oligo, foram esterilizados em autoclave, evitando possíveis contaminações.

Inicialmente as amostras coletadas para os testes foram enriquecidas com os mesmos nutrientes utilizados no preparo do meio L.C. Oligo, garantindo o suprimento dos nutrientes necessários para o crescimento algal em todas as diluições da solução-teste. A partir das amostras enriquecidas, foram preparadas as concentrações de exposição dos organismos utilizando o meio L.C. Oligo como diluente.

A montagem do teste foi realizada em câmara de fluxo laminar. Para erlenmeyers de 125 mL, foram transferidas alíquotas de 50 mL de cada diluição a ser avaliada e então inoculado 0,5 mL de inóculo de algas (densidade algal de $1,0 \times 10^7$ cel mL⁻¹), alcançando assim uma suspensão algal inicial de $1,0 \times 10^5$ cél mL⁻¹. As concentrações foram inoculadas em duplicata, sendo três por ponto de amostragem, mantidas em mesa agitadora orbital, a temperatura de 25 ± 2 °C, com iluminação (± 5000 LUX), e com velocidade de agitação de 150 rpm. Na Figura 4.7, é possível observar os erlenmeyers contendo o inóculo de algas mantido nas condições citadas anteriormente.

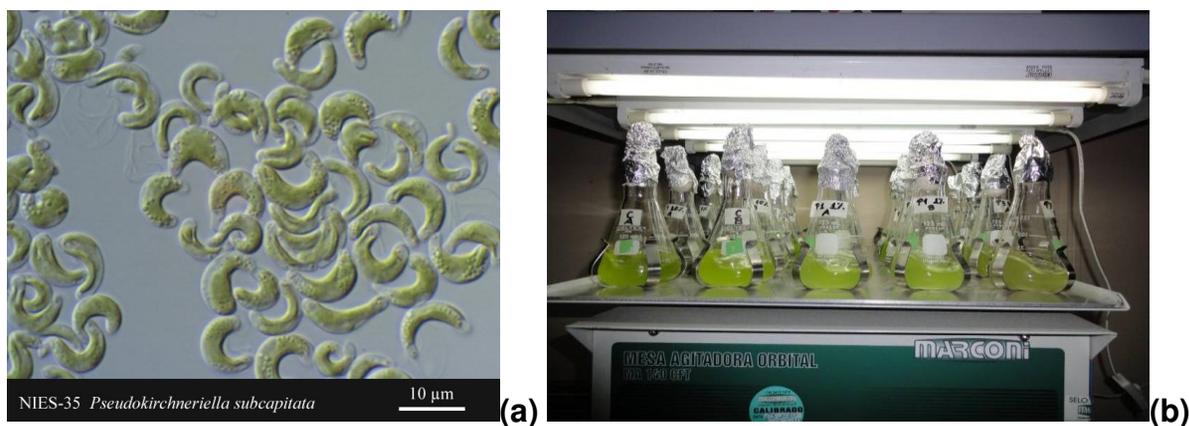


Figura 4.7: Alga *P. subcapitata*: (a) Suspensão de algas (Fonte: Algae Resource Database); (b) Teste de toxicidade.

Ao final das 96 h foi observada a inibição do crescimento da biomassa algaica das soluções-teste em relação ao controle (meio de cultivo de algas). O

método de determinação da toxicidade foi a contagem das células com auxílio de Câmara de Neubauer e microscópio óptico.

A porcentagem de inibição do crescimento da biomassa algácea foi calculada para cada concentração, pela comparação da biomassa algácea média obtida nas soluções-teste com a média obtida no controle, conforme a fórmula a seguir:

$$IC = \frac{Mc - Ma}{Mc} \times 100$$

Sendo:

IC: Porcentagem de inibição do crescimento algáceo;

Ma: Média do número de células. das soluções-teste;

Mc: Média do número. de células. do controle

Os dados obtidos permitiram observar a porcentagem de inibição de crescimento que cada concentração da amostra causou em relação ao crescimento do controle e assim inferir a concentração da amostra cuja inibição foi próxima a 50%, valor tido como por CI50/96h.

4.4.2 *Daphnia similis*

Bioensaios com o microcrustáceo *Daphnia similis*, foram realizados conforme a norma NBR 12713:2009 (ABNT, 2009).

O método consiste na exposição de organismos jovens (neonatos com 6 a 24 horas de vida) a diversas soluções-teste da amostra coletada por um período de 48 horas, mantidos em câmara incubadora a 20 °C, sem alimentação e exposição à luz, com observação a cada 24 horas.

A partir das amostras coletadas foram preparadas diversas soluções-teste com concentrações decrescentes, utilizando água reconstituída como água de diluição tanto para soluções como para o controle.

Os testes foram realizados em quadruplicata sendo cinco organismos para cada réplica e 20 organismos por diluição, em recipientes de polipropileno transparentes com capacidade de 100 mL contendo em cada um 25 mL da solução-teste. Na Figura 4.8 é possível visualizar o teste de *D. similis* após o preparo e transferido para a câmara incubadora.

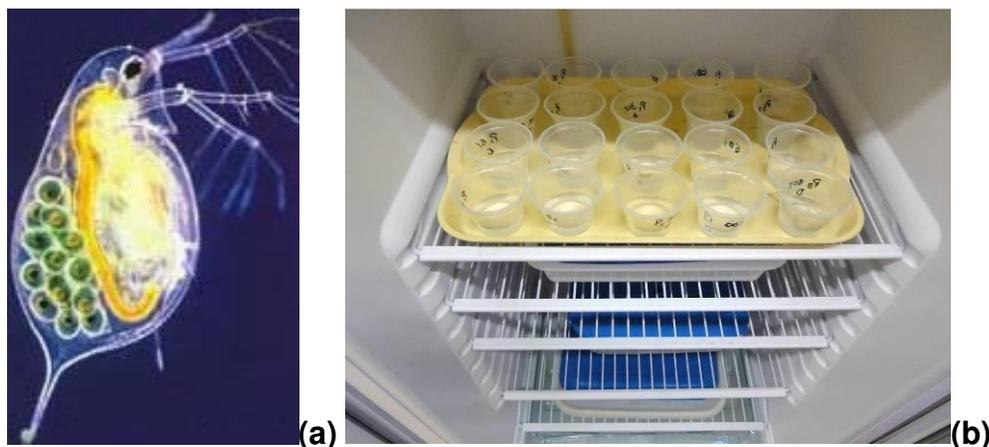


Figura 4.8: Microcrustáceo *D. similis*: (a) Organismo (Fonte: IPEN); (b) Câmara incubadora com teste de toxicidade aguda.

Após 24 e 48h foram feitas as contagens do número de indivíduos imóveis nos recipientes teste e calculadas as concentrações médias efetivas que causaram imobilidade a 50% dos organismos, expressas em CE50/48h.

Cultivo e manutenção

O cultivo de *D. similis* é realizado no Laboratório de Protótipos aplicados ao tratamento de água e efluente – LABPRO, da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.

Os organismos foram cultivados em quatro lotes, cada um contendo quatro litros de água reconstituída e 100 organismos, mantidos em câmara incubadora para BOD com controle da temperatura em $20,5 \pm 0,5$ °C e fotoperíodo de 12 horas.

Com intuito de manter a disponibilidade contínua dos organismos-teste, os lotes foram mantidos com faixas etárias diferentes, iniciando-se novos lotes semanalmente e priorizando o descarte dos que apresentavam idade superior a 28 dias.

O preparo da água reconstituída utilizou água processada com dureza corrigida e mantida em $45 \pm 2 \text{ mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$, permanecendo sob aeração constante, por meio de um compressor de ar utilizado em aquários, em um tanque de vidro com capacidade de 40 L.

A manutenção dos organismos foi realizada três vezes por semana e consistia na retirada dos neonatos, filtração e troca parcial da água de cultivo, e alimentação. A alimentação foi realizada com suspensão de uma cultura axênica de algas *P. subcapitata*, com densidade de $1,0 \times 10^6$ a $5,0 \times 10^6$ células mL^{-1} e um complemento alimentar à base de suspensão de ração para peixe digerida e levedura dissolvida, conforme descrito na NBR 12713 (ABNT, 2009).

4.4.3 *Poecilia reticulata*

A metodologia do teste de toxicidade aguda com peixes empregada foi adaptada da norma NBR 15088:2004 (ABNT, 2004).

A água de cultivo utilizada no teste de peixes foi água potável, mantida sob aeração por um compressor de ar para aquários, por 24 h, para garantir uma concentração mais elevada de oxigênio para os peixes. Esta água foi utilizada no preparo das diversas soluções com concentrações crescentes do efluente contendo formaldeído e no controle.

No teste foram expostos peixes da espécie *Poecilia reticulata*, às diversas soluções do efluente contendo formaldeído. Os organismos foram mantidos em 1,5 L de solução-teste em recipientes de vidro com capacidade para dois litros, mantidos em contato com a amostra sob aeração constante, fotoperíodo de 8 horas e temperatura de $24 \pm 2^\circ\text{C}$ por um período de 96h (Figura 4.9). Os organismos utilizados apresentavam massas individuais variando entre 80 a 100 miligramas, de

maneira a não ultrapassar a relação máxima de massa do organismo por volume da solução teste de 1g L^{-1} .

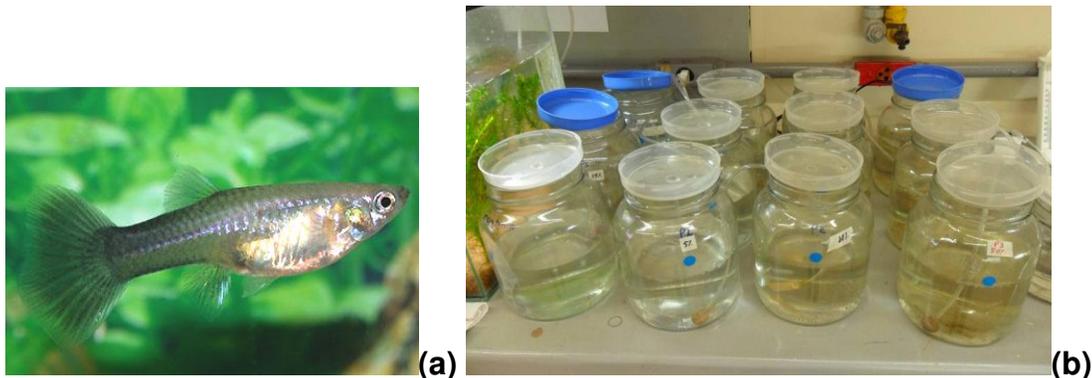


Figura 4.9: Peixe *P. reticulata*: (a) Organismo (Fonte: P & P Aquarium); (b) Condições do teste de toxicidade.

O teste de toxicidade aguda foi estático, ou seja, não houve a troca periódica do meio ao qual os organismos estavam expostos, como a reposição da solução de esgoto com formaldeído durante o ensaio. A cada 24 h do início do teste foram realizadas contagens dos organismos, a retirada dos indivíduos mortos e a alimentação com ração para peixe, numa quantidade suficiente para não sobrar resíduos.

Com a obtenção dos resultados das mortalidades após as 96 h foram calculadas as concentrações médias causadoras da letalidade a 50% dos organismos, CL50/96 h.

Cultivo e manutenção

Os organismos utilizados nos testes de toxicidade foram obtidos no lago situado no Instituto de Biologia da UNICAMP. Este local foi escolhido por conter uma grande população de peixes da espécie *Poecilia reticulata*.

As coletas dos espécimes foram realizadas na semana anterior a cada teste. A captura dos peixes foi realizada com redes de nylon, transferidos para baldes contendo água do próprio lago e transportados para o Laboratório de Saneamento onde se fez a troca parcial da água coletada pela água aerada. Os organismos foram mantidos em observação no balde com aeração contínua e alimentação diária até o dia do teste.

Após o uso nos testes, os peixes restantes foram transferidos para tanques de cultivos de peixes do LABSAN/FEC. Nestes tanques, que possuem aeração contínua, os organismos são alimentados diariamente e são mantidos para a reprodução e manutenção da cultura de planárias que também habitam estes tanques.

4.4.4 *Girardia tigrina*

Por não apresentarem normatização reconhecida, a metodologia dos testes utilizando planárias baseia-se no trabalho de Preza e Smith (2001).

A água de cultivo utilizada no preparo das diversas soluções com concentrações decrescentes do efluente contendo formaldeído e no controle foi a água potável aerada cujo preparo foi descrito no item 4.4.3.

Nos bioensaios foram utilizadas planárias recém-nascidas (0 a 10 dias pós-eclosão). Os testes foram realizados em duplicata, sendo cinco organismos para cada réplica, em béqueres com capacidade de 100 mL contendo em cada 50 mL das soluções do efluente contendo formaldeído. Durante o ensaio, os béqueres com os organismos foram mantidos sob iluminação natural, temperatura de 24 ± 2 °C e sem alimentação, como pode ser visto na Figura 4.10.

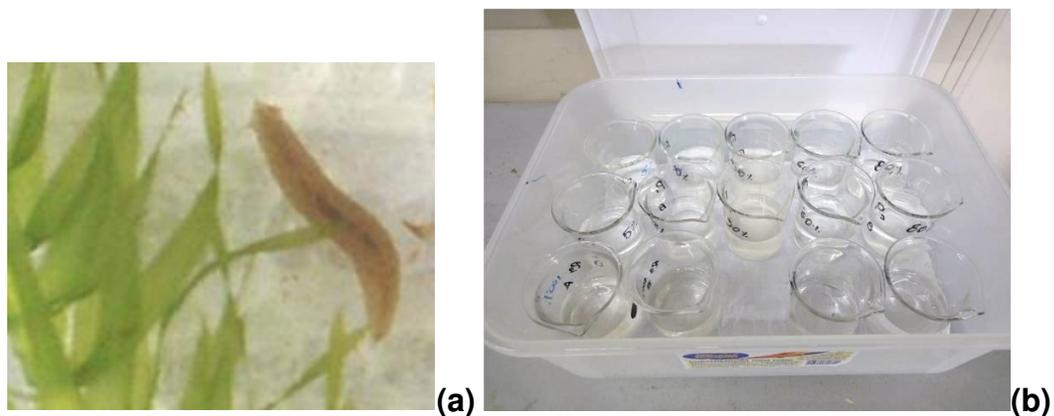


Figura 4.10: Planária *G. tigrina*: (a) Organismo, Barros (2006); (b) Condições do teste de toxicidade.

As observações foram feitas a cada 24 h e após 96h o ensaio foi finalizado. A contagem dos organismos foi feita visualmente e com o auxílio de um pincel fino. Por ter sistema nervoso definido, distribuído em toda a extensão do corpo e ser sensível a estímulos externos, foi utilizado um pincel fino de cerda macia para verificar a mortalidade do organismo. Foram considerados mortos os organismos estimulados com o pincel que, após 15 segundos de observação, permaneceram imóveis.

Com a obtenção da mortalidade dos organismos foram calculadas as concentrações médias que causaram a letalidade de 50% dos organismos expostos - CL50/96h.

Cultivo e manutenção

No presente estudo foram utilizadas planárias da espécie *Girardia tigrina*, cultivadas no Laboratório de Saneamento – LABSAN/FEC.

Inicialmente, o cultivo de planárias foi realizado em aquários de vidro com água aerada. Os organismos eram alimentados com fígado bovino durante 2 horas, duas vezes por semana. Após a retirada do alimento realizava-se a limpeza do aquário, succionando-se com uma pipeta volumétrica os excretas liberados pelos

organismos, e por último era feita a troca parcial da água, sendo descartados e repostos dois litros da água do aquário por água aerada.

Os ovos, necessários para a obtenção de organismos jovens com idade de 0 a 10 dias, se encontravam na superfície de plantas e parede dos aquários e eram removidos antes da limpeza com o auxílio de alça de inoculação. A retirada exigia cautela, pois os ovos apresentam um pedúnculo que os fixam na superfície, dificultando sua remoção.

A manutenção era realizada duas vezes por semana, no entanto, esta forma de cultivo apresentava dificuldades, tanto pelo tempo gasto durante a manutenção, quanto na obtenção de ovos de planárias, visto que a reprodução mais intensa era por repartição e não a sexuada com isso não havia geração suficiente de organismos jovens para o uso nos testes.

Após a implantação e estabilização do tanque de peixes no LABSAN/FEC, observou-se a presença de planárias em plena atividade, realizando a reprodução sexuada com postura de ovos mais intensa que a forma anterior de cultivo. Neste tanque além da presença dos peixes que ao morrerem serviam de alimento às planárias.

Com esta constatação, foi adotado como forma de cultivo de *G. tigrina*, o tanque de peixes e foi montado um segundo tanque menor com peixes e planárias, a fim de estimular a reprodução sexuada. Nestes tanques foi retirada a alimentação por fígado.

A manutenção consiste na coleta de ovos a cada 15 dias com o auxílio de alça de inoculação e pincel. Os ovos são encontrados no fundo de recipientes plásticos e de vidro com pedras, colocados no fundo do tanque para fixarem as macrófitas aquáticas *Elodea sp.* Estes ovos foram transferidos para recipientes de vidro contendo água fracamente aerada. Após a eclosão, os organismos são utilizados em testes de toxicidade e excedentes são transferidos para os tanques de peixes.

4.5 Testes de Sensibilidade

Com objetivo de avaliar a saúde e resposta dos organismos na presença de uma substância referência e assim obter resultados com boa repetibilidade e reprodutibilidade testes de sensibilidade.

Estes testes foram realizados nas mesmas condições dos testes de toxicidade, no entanto, foi utilizado como substância de referência o cloreto de sódio (NaCl) em todos os testes com os organismos. O NaCl foi adotado por ser de fácil solubilidade, não ser volátil e principalmente por seu resíduo não ser tóxico ao ambiente.

5 RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados referentes às fases de operação do sistema combinado de tratamento e serão divididos em duas partes: a primeira enfocando os resultados do monitoramento do sistema frente ao seu desempenho utilizando as variáveis físicas e químicas; a segunda mostrando os resultados obtidos a partir dos ensaios ecotoxicológicos.

5.1 Operação e monitoramento do sistema: variáveis físicas e químicas

5.1.1 Fase 1: concentração de 100 mg L⁻¹ de formaldeído

Antes do início das atividades referentes ao presente trabalho, o sistema utilizado se encontrava em funcionamento, com adição de 100 mg L⁻¹ de formaldeído.

O início da avaliação (operação) do sistema foi em 17 de agosto de 2009, data do primeiro teste de toxicidade da Fase 1. Esta fase caracteriza-se pela adição de 100 mg L⁻¹ de formaldeído ao esgoto bruto, com duração de 159 dias. Assim como descrito no item 4.1 o sistema foi operado com TDH de 16h a uma vazão diária de 52,9 L d⁻¹.

Na Tabela 5.1 são apresentados os valores das variáveis físicas e químicas da Fase 1, referentes aos três pontos de amostragem e o esgoto bruto sem adição de formaldeído (EBSF), controle negativo realizado apenas na caracterização do esgoto nos dias de testes toxicológicos conforme descrito no item 4.4.

Tabela 5.1 Valores médios obtidos para as variáveis físicas e químicas durante a Fase 1

VARIÁVEL	Ponto 1		Ponto 2		Ponto 3		EBSF	
	MED	DP	MED	DP	MED	DP	MED	DP
Temperatura (C°)	26	2	26	2	25	2	25	1
Condutividade Elétrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	1027	162	1084	168	843	128	975	797
Dureza ($\text{mg CaCO}_3 \text{L}^{-1}$)	70	9	68	8	69	8	68	7
OD (mg L^{-1})	1,1	0,6	2,1	0,8	6,0	0,7	1,7	0,6
pH	7,8	0,6	7,4	0,3	7,2	0,5	7,0	0,1
Formaldeído (mg HCHO L^{-1})	89,5	13,5	2,7	4,1	0,1	0,1	0,2	0,2
AOV (mg HAc L^{-1})	49	17	35	10	22	7	38	10
AP ($\text{mg CaCO}_3 \text{L}^{-1}$)	259	74	276	61	65	48	162	57
AT ($\text{mg CaCO}_3 \text{L}^{-1}$)	348	90	368	78	90	58	226	57
AI/AP	-	-	0,3	0,1	-	-	-	-
SST (mg L^{-1})	150	87	66	69	4	4	56	5
SSV (mg L^{-1})	104	55	49	48	3	3	47	6
SSF (mg L^{-1})	46	34	17	21	1	2	9	3
DQO ($\text{mg O}_2 \text{L}^{-1}$)	417	99	155	87	53	22	212	79
DBO ($\text{mg O}_2 \text{L}^{-1}$)	136	54	20	3	4	1	NR (*)	NR (*)
NTK (mg L^{-1})	56	19	57	18	24	23	52	13
NH ₃ (mg L^{-1})	52	14	56	12	15	19	50	15
NO ₂ ⁻ (mg L^{-1})	<LQ (**)	<LQ (**)	<LQ (**)	<LQ (**)	1,6	3,1	<LQ (**)	<LQ (**)
NO ₃ ⁻ (mg L^{-1})	0,1	0,2	0,3	0,3	29,0	16,7	<LQ (***)	<LQ (***)

Sendo: OD: Oxigênio dissolvido; AOV: Ácidos Orgânicos Voláteis; AP: Alcalinidade Parcial; AT: Alcalinidade Total; AI/AP: Relação Alcalinidade intermediária/ Alcalinidade parcial; SST: Sólidos Suspensos Totais; SSV: Sólidos Suspensos Voláteis; SNT: Sólidos Suspensos Fixos; DQO: Demanda Química de Oxigênio; DBO: Demanda Bioquímica de Oxigênio; NTK: Nitrogênio Kjeldahl Total; NH₃: Nitrogênio Amoniacal; NO₂⁻: Nitrito; NO₃⁻: Nitrato

MED: Média

DP: Desvio padrão

(*) NR – Análise não realizada para este ponto de amostragem

(**) <LQ – Limite de Quantificação do método (LQ = 0,023 mg NO₂⁻ L⁻¹)

(***) <LQ – Limite de Quantificação do método (LQ = 0,026 mg NO₃⁻ L⁻¹)

Das variáveis analisadas que podem interferir nos organismos estudados pode-se verificar que a temperatura do esgoto nos vários pontos de coleta manteve-se com pouca variação. A condutividade elétrica, que representa a densidade de íons no meio líquido, manteve-se elevada no Ponto 1 e Ponto 2 em decorrência da adição do alcalinizante carbonato de sódio ao esgoto bruto. A dureza também não apresentou grande variação, no entanto a concentração manteve-se sempre acima

da recomendada para alguns organismos como a *Daphnia similis*, que é de 45 mg L^{-1} .

A concentração de o oxigênio dissolvido (OD) esteve presente no BAS, que operou com aeração forçada para suprir as necessidades da comunidade microbológica presente na biomassa. Embora tenha-se mantido a concentração acima de $4,0 \text{ mg O}_2 \text{ L}^{-1}$, buscou-se manter o valor de OD no BAS acima de $5,0 \text{ mg O}_2 \text{ L}^{-1}$ para que essa variável operacional não tornar-se limitante para a atividade da biomassa, já que também exerce influência na nitrificação.

No início da operação houve grande variação na concentração de OD no Ponto 3, devido à aeração insuficiente e consumo pela biomassa do BAS. A menor concentração registrada foi de $4,4 \text{ mg O}_2 \text{ L}^{-1}$ no 60º dia de operação, quando houve problemas no compressor de ar afetando algumas atividades da biomassa como a nitrificação. Esta situação foi normalizada após a troca do compressor por outro de maior capacidade no 68º dia, que proporcionou maior difusão do ar no interior do BAS contribuindo para melhor desempenho da unidade na degradação da matéria orgânica e na nitrificação. Na Figura 5.1 pode-se observar a variação nas concentrações de OD e após a linha tracejada o aumento da concentração de OD.

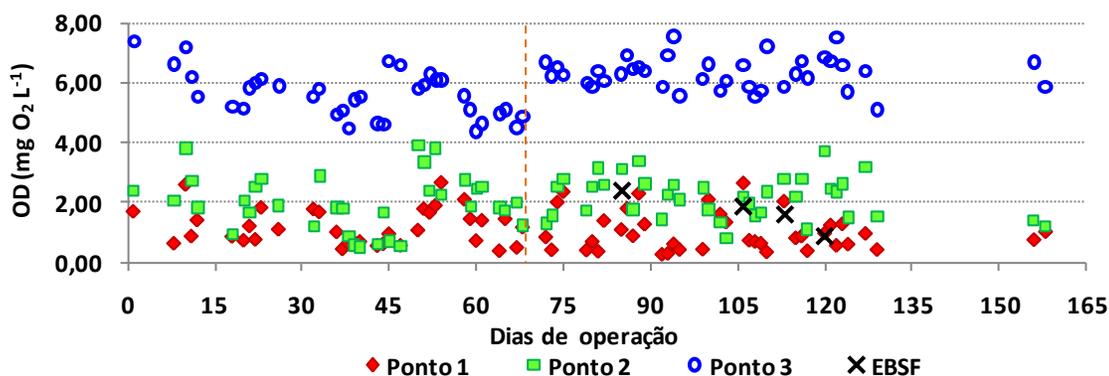


Figura 5.1: Concentrações de oxigênio dissolvido nos pontos de amostragem do sistema – Fase 1.

A presença de OD nos Pontos 1, 2 e esgoto bruto sem formaldeído, deveu-se a forma inicial de coleta, que provocava agitação da amostra, elevando a

concentração. Nas fases seguintes do trabalho, tomou-se cuidado de se alterar a forma de coleta, possibilitando a comprovação da ausência de OD no esgoto bruto e FA.

A) Avaliação da remoção do formaldeído

No início do trabalho as concentrações do formaldeído no Ponto 1 apresentaram concentrações muito abaixo da teórica aplicada, assim como relatado por Castagnato (2006) e Batista (2007). Esta variação ocorreu devido ao tempo de permanência do esgoto com formaldeído no reservatório de alimentação sendo uma das possíveis causas a reação do composto com a matéria orgânica presente no esgoto bruto.

Com intuito de evitar que as perdas de formaldeído ocorridas ao longo do tempo interferissem nos resultados da quantificação da sua concentração junto com esgoto sanitário, padronizou-se a coleta de esgoto bruto contendo formaldeído (Ponto 1) logo após o preenchimento do reservatório de alimentação. Dessa forma a concentração de formaldeído real obtida foi em média $89,5 \pm 13,5$ mg HCHO L⁻¹, sendo mais próxima da teórica aplicada ao sistema 100 mg HCHO L⁻¹, comprovando que o volume adicionado ao esgoto estava correto.

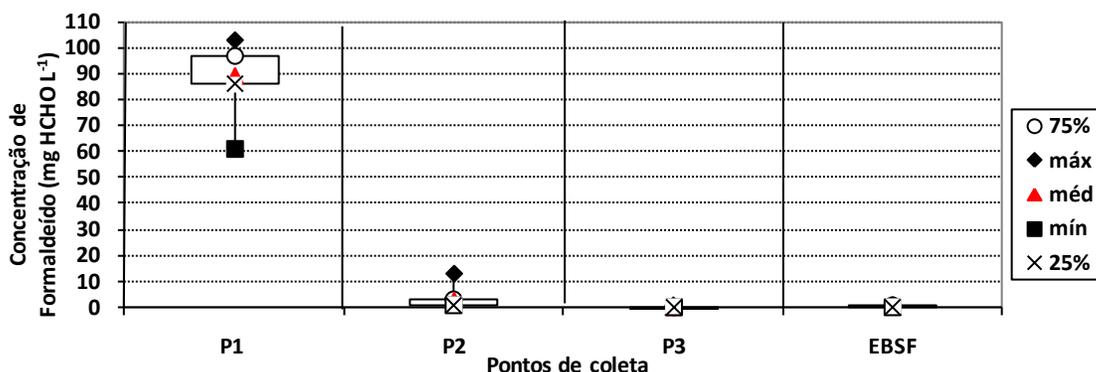
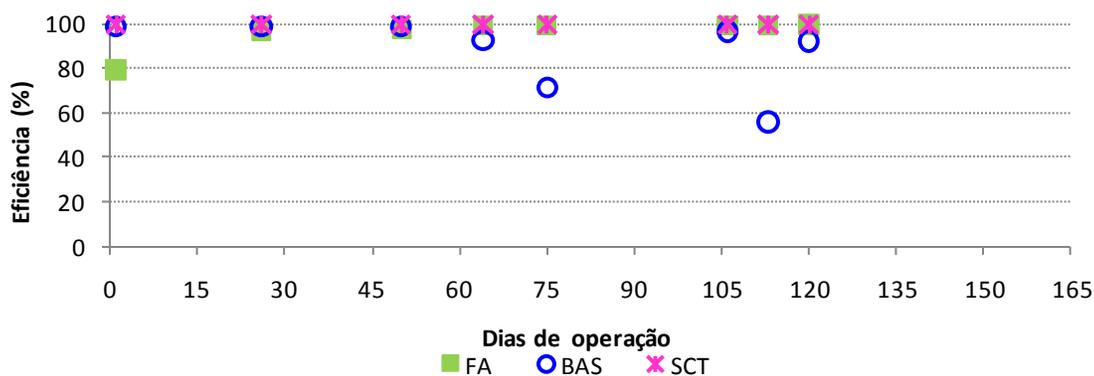


Figura 5.2: Concentração de formaldeído nos pontos de amostragem do sistema – Fase 1.

Comparando com trabalhos anteriores, o sistema mostrou-se estável nesta Fase 1, conforme pode ser verificado na Figura 5.2, com elevada assimilação do formaldeído, indicando alta afinidade da biomassa na retenção deste composto. A biomassa anaeróbia foi responsável por grande parte da diminuição na concentração de formaldeído, obtendo-se no Ponto 2 (FA) $96 \pm 7\%$ de eficiência. O BAS complementou o tratamento conferindo ao sistema $99,9 \pm 0,1\%$ de eficiência.

Este desempenho de cada reator e do sistema combinado de tratamento é apresentado na Figura 5.3. Os valores obtidos indicados por FA referem-se a diferença entre a concentração do esgoto bruto e o efluente do FA, o BAS é a diferença entre o efluente do FA com o efluente do BAS e SCT (Sistema Combinado de Tratamento) é a diferença entre o esgoto bruto e o efluente do BAS.



FA – Filtro Anaeróbio; BAS – Biofiltro Aeróbio Submerso; SCT – Sistema combinado de tratamento

Figura 5.3: Valores de eficiência na redução da concentração de formaldeído – Fase 1.

B) Avaliação das variáveis pH, alcalinidade e AOV

Nas Figuras 5.4, a 5.6 podem ser verificados os comportamentos temporais das variações nos valores de pH, alcalinidade parcial e alcalinidade total, respectivamente, ao longo da Fase 1, nos pontos de amostragem do sistema.

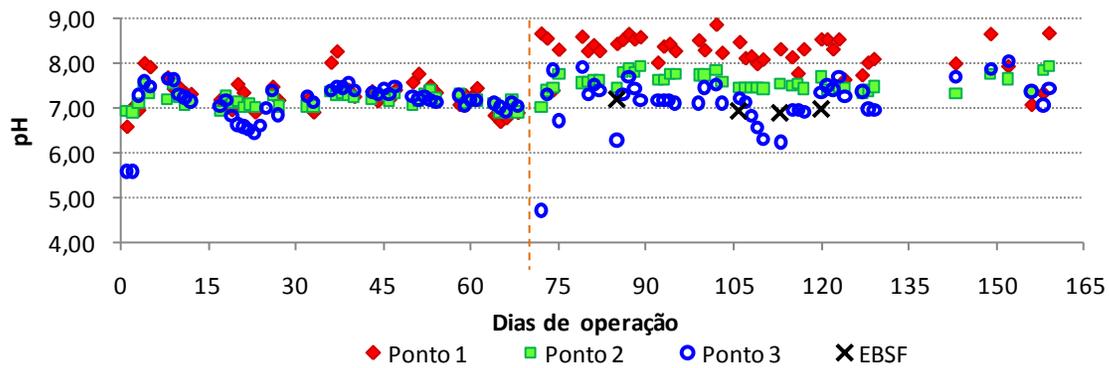


Figura 5.4: Valores de pH nos pontos de amostragem do sistema – Fase 1.

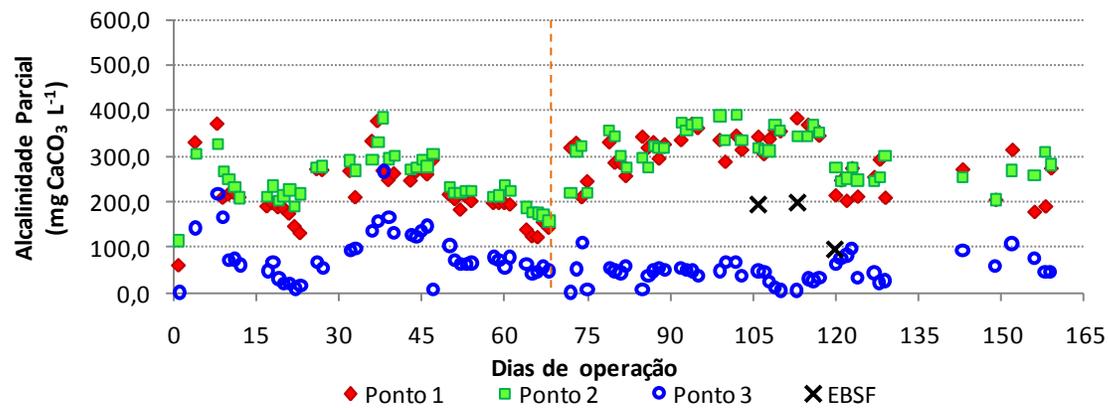


Figura 5.5: Variação da alcalinidade parcial nos pontos de amostragem do sistema – Fase 1.

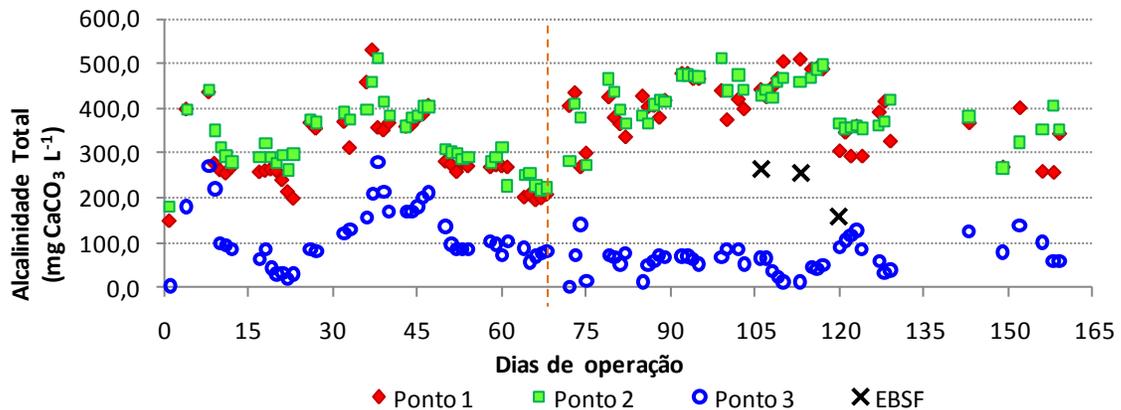


Figura 5.6: Variação da alcalinidade total nos pontos de amostragem do sistema – Fase 1.

Na Fase 1 houve pouca variação do pH nos Pontos 1, 2 e 3, até o 68º dia de operação, porque fez-se a dosagem de bicarbonato de sódio (NaHCO_3) na proporção de $4,4 \text{ mL L}^{-1}$ de esgoto bruto quando necessário. Houve grande variação na alcalinidade parcial e total que pode ser atribuída às variações no próprio esgoto sanitário e também pela adição de alcalinizante, proporcionando o aumento da concentração.

Devido ao acúmulo de alcalinidade parcial e total no Ponto 3, foi interrompida a adição de alcalinizante no 38º dia de operação. Esta interrupção não provocou alteração significativa ao sistema visto que o pH se manteve constante nos pontos de amostragem e houve consumo de alcalinidade no Ponto 3.

Após o 68º dia de operação, indicado pela linha tracejada nas Figuras 5.4, 5.5 e 5.6, ocorreram mudanças no sistema visando melhorar o desempenho do BAS principalmente em relação a nitrificação. Havia grande acúmulo de nitrogênio amoniacal no Ponto 3, indicando insuficiência no sistema de aeração. Foi realizada a troca do compressor de ar e também do alcalinizante por uma solução de carbonato de sódio (Na_2CO_3) 400 mg L^{-1} . O volume dosado variou entre $0,2$ a $0,7 \text{ mL L}^{-1}$ de esgoto bruto, conforme a necessidade da biomassa do BAS, indicado pelo consumo de alcalinidade no Ponto 3 pelas bactérias nitrificantes.

O resultado destas alterações pode ser verificado a partir do 72º dia de operação, cujo primeiro sinal foi a queda brusca do pH e praticamente completo consumo de alcalinidade parcial e total no Ponto 3. Esta queda ocorreu devido a adaptação das bactérias nitrificantes do BAS, que na presença de elevada concentração de OD intensificaram a atividade, consumindo a alcalinidade na nitrificação. Em baixa concentração, a alcalinidade restante no Ponto 3 não foi suficiente para manter o tamponamento do efluente, ocorrendo a redução do pH e por isso a concentração de Na_2CO_3 teve que ser aumentada.

Com a estabilização do sistema após a adequação da aeração e adição de alcalinizante, houve elevação do pH nos Pontos 1 e 2, principalmente pelo aumento na concentração de Na_2CO_3 . Já no EBSF, que não recebe o alcalinizante, o pH manteve-se na faixa de 7. O pH no Ponto 2 e 3 manteve-se na faixa considerada

ótima para o desenvolvimento da biomassa que é de 6,5 a 7,5 (VON SPERLING, 1996).

Apesar das variações da AP (Alcalinidade Parcial) e AT (Alcalinidade total) observadas nas Figuras 5.5 e 5.6 tanto no Ponto 1 quanto no Ponto 2, houve um elevado consumo da alcalinidade no Ponto 3, indicando que o sistema manteve-se em equilíbrio e com elevada nitrificação.

Assim como ocorreu no trabalho de Batista (2007), pode-se notar que na maioria das amostras do Ponto 2, a AP e AT foram maiores que no Ponto 1, o que associado ao fato de não ter ocorrido o acúmulo de AOV, manteve o pH estável. Isso indica que o FA manteve sua capacidade de tamponamento não sofrendo alteração devido a presença do formaldeído e a geração de AOV.

Na Figura 5.7 está representada a relação entre a alcalinidade intermediária (AI) e a alcalinidade parcial (AP). Observa-se que esta relação manteve-se em $0,3 \pm 0,1$ indicando a estabilidade do processo anaeróbico, conforme estabelecido por Ripley *et al.* (1986).

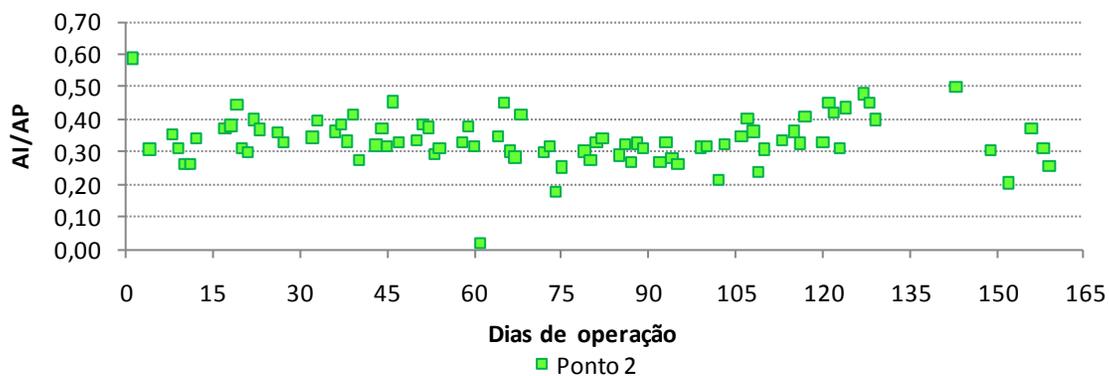


Figura 5.7: Relação AI/AP no Ponto 2 (FA) – Fase 1.

A concentração de Ácidos Orgânicos Voláteis (AOV) (Figura 5.6), apresentou pouca variação no decorrer do monitoramento da Fase 1.

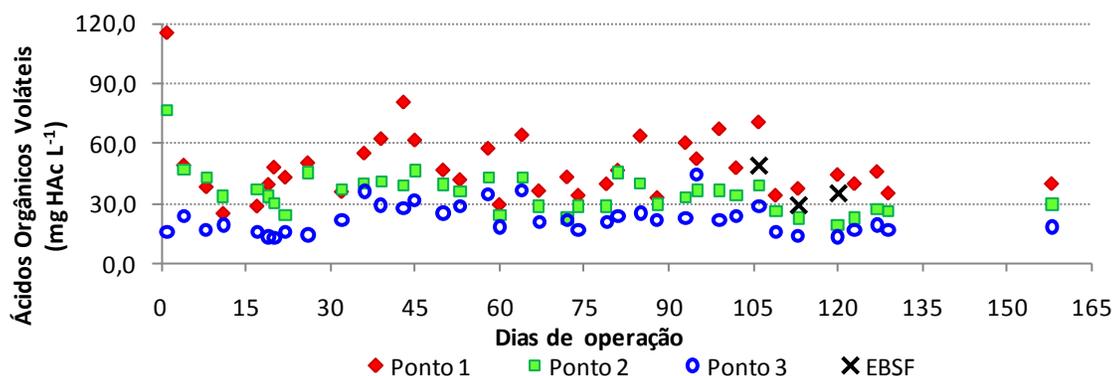


Figura 5.8: Variação da concentração de ácidos orgânicos voláteis nos pontos de amostragem do sistema – Fase 1.

O Ponto 1 e EBSF apresentaram as concentração de ácidos orgânicos voláteis (AOV) relativamente baixas quando comparada com os trabalhos de Castagnato (2006), Batista (2007) e Foco (2010), que utilizaram sistema combinado de tratamento FA/BAS, porém com esgoto sanitário mais concentrado em termos de matéria orgânica e em relação à DQO. Mesmo com as oscilações ocorridas no Ponto 1, o FA foi capaz de assimilar e transformar, tanto os AOVs provenientes do esgoto bruto como os que normalmente são gerados nas reações de degradação da matéria orgânica na digestão anaeróbia, assim como relatado por Castagnato (2006) e Batista (2007). O BAS também apresentou pouca variação nos valores de AOV, assimilando os compostos gerados no FA, garantindo o equilíbrio do sistema.

C) Avaliação das variáveis DQO, DBO e sólidos

Nas Figuras 5.9 e 5.10, estão representadas as variações nas concentrações de DQO bruta e filtrada ao longo da operação do sistema na Fase 1 onde foi adicionada a concentração nominal de formaldeído de 100 mg L⁻¹ ao efluente bruto.

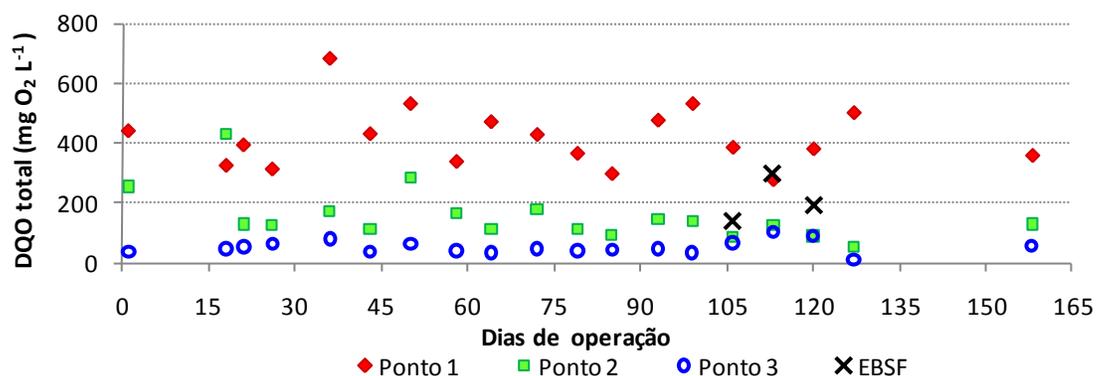


Figura 5.9: Variação do valor de DQO total nos pontos de amostragem do sistema – Fase 1.

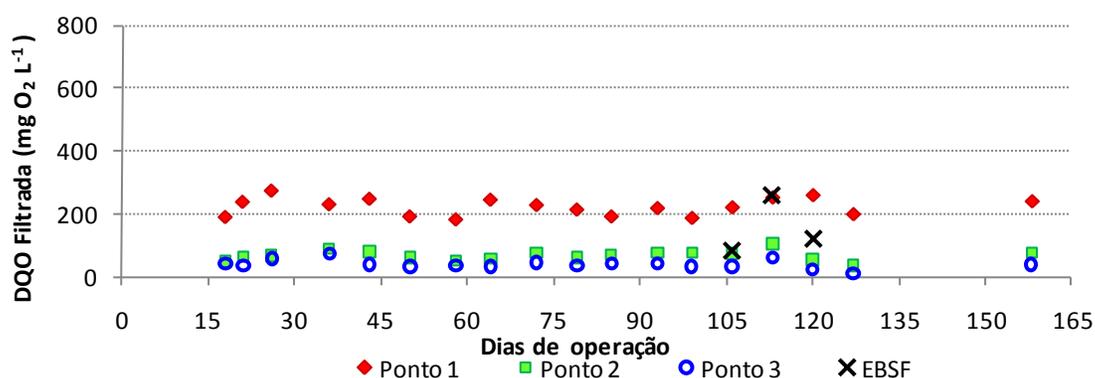


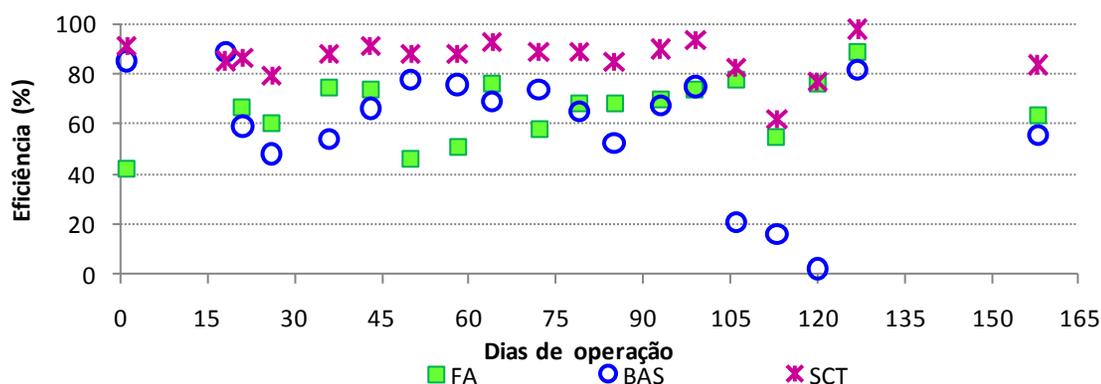
Figura 5.10: Variação do valor de DQO filtrada nos pontos de amostragem do sistema – Fase 1.

No decorrer do monitoramento houve grande variação da concentração de matéria orgânica (expressa em termos de DQO total) no Ponto 1, devido às características do esgoto bruto coletado.

No Ponto 2, houve variação menos expressiva, exceto no 18º dia de operação, onde a DQO total excedeu o Ponto 1. Isto ocorreu devido a arraste de sólidos do FA e foi solucionado com o descarte de 0,5 L de lodo do reator anaeróbio. O FA mostrou-se eficiente na degradação e conseguiu amortizar as variações do Ponto 1. Com isso, o BAS recebeu baixa concentração de matéria orgânica para a degradação. O Ponto 3 manteve-se estável, indicando que o sistema conseguiu manter um bom desempenho na degradação da matéria orgânica.

Em relação à DQO filtrada (Figura 5.10), as variações ocorridas no esgoto bruto não foram tão significativas já que essa variável está relacionada a matéria orgânica dissolvida e ao formaldeído adicionado.

A eficiência na redução da concentração de DQO na Fase 1 é apresentada na Figura 5.11.



FA – Filtro Anaeróbio; BAS – Biofiltro Aeróbio Submerso; SCT – Sistema combinado de tratamento

Figura 5.11: Variação temporal da redução da concentração de DQO total - Fase 1.

A faixa obtida para a redução nos valores de DQO foram de $60,9 \pm 25,5\%$ para o FA. Embora tenha obtido uma eficiência considerável, melhor que a obtida por Batista (2007) com a mesma dosagem de formaldeído, o pós-tratamento deste efluente por um processo aeróbio foi necessário pra garantir a eficiência de $86,3 \pm 7,7\%$ no sistema combinado, justificando a necessidade do pós-tratamento de do efluente do reator anaeróbio.

Com relação à DBO, a eficiência na redução da concentração de matéria orgânica no FA, BAS e sistema combinado de tratamento foram de $83 \pm 8\%$, $79 \pm 6\%$ e $97 \pm 2\%$ respectivamente. Todos os resultados indicam um ótimo desempenho dos reatores e principalmente do sistema combinado com DBO média de $4 \pm 1 \text{ mg O}_2 \text{ L}^{-1}$.

Considerando-se as condições e os padrões de lançamento de efluentes em corpos d'água estabelecidos no Estado de São Paulo (Lei 997/76 – art.18), sendo o limite de lançamento de $60 \text{ mg O}_2 \text{ L}^{-1}$, ou remoção de pelo menos 80% de DBO, e

em esfera federal (CONAMA 430/2011) que determina a remoção mínima de 60% de DBO, o sistema combinado atendeu ambos os requisitos.

A variação na concentração de sólidos suspensos totais (SST) e voláteis (SSV) é apresentada nas Figuras 5.12 e 5.13.

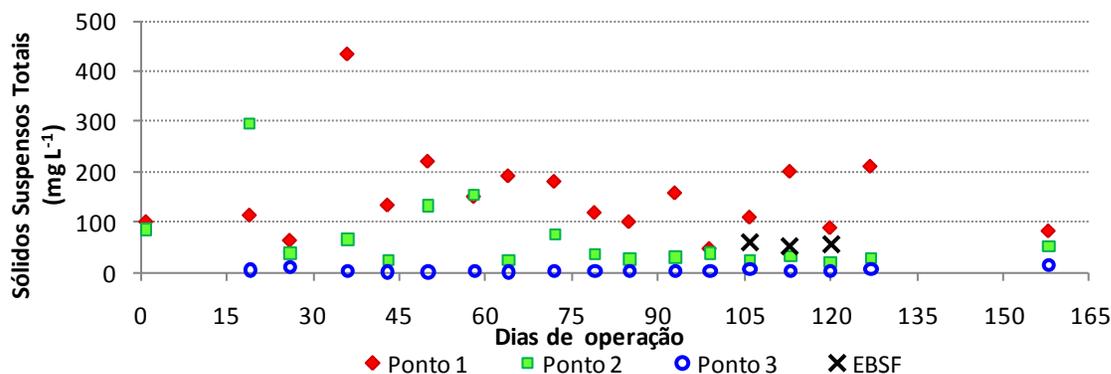


Figura 5.12: Variação da concentração de Sólidos suspensos totais nos pontos de amostragem do sistema – Fase 1.

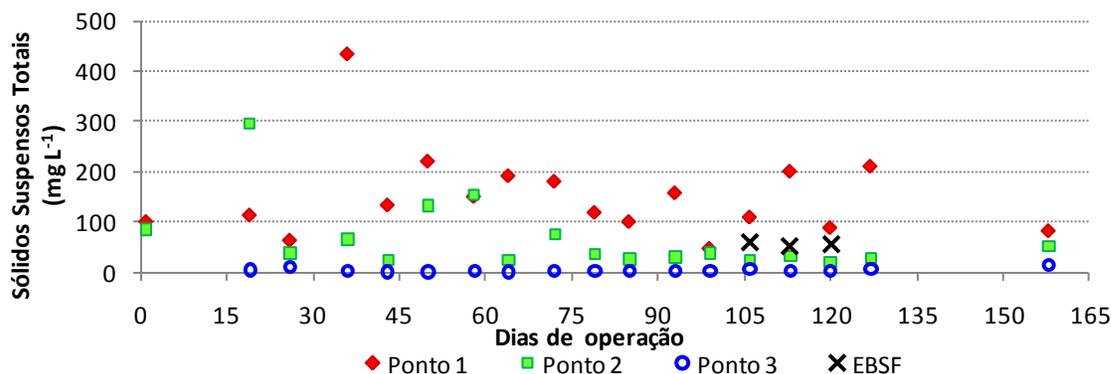


Figura 5.13: Variação da concentração de Sólidos suspensos voláteis nos pontos de amostragem do sistema – Fase 1.

Conforme comentado anteriormente a presença de sólidos no esgoto bruto e efluente do FA exerce influência na concentração de DQO do sistema. É possível notar que as variações da DQO no Ponto 1, também foram registradas nos sólidos suspensos totais e voláteis. No entanto as demais unidades (FA e BAS) mantiveram com elevada redução da concentração de sólidos, principalmente no FA.

Com o monitoramento dos sólidos presentes no esgoto, também é possível verificar a elevação da concentração de biomassa nos reatores e assim realizar descartes do lodo excedente. Esta medida foi necessária no 18º dia em que, como já mencionado anteriormente, o acúmulo de sólidos no FA mascarou o seu comportamento. Após o descarte de lodo de excesso, o FA voltou ao seu comportamento estável

O esgoto bruto apresentou características condizentes às de um esgoto sanitário de média concentração em termos de matéria orgânica, visto pelas concentrações obtidas de SST $150 \pm 87 \text{ mg L}^{-1}$ e de SSV $104 \pm 55 \text{ mg L}^{-1}$, assim como relatado por Jordão e Pessoa (2009) e Nour *et al.* (2011).

D) Avaliação da série de Nitrogênio

Os valores das concentrações de nitrogênio amoniacal, nitrito e nitrato estão representados nas Figuras 5.14, 5.15 e 5.16 respectivamente

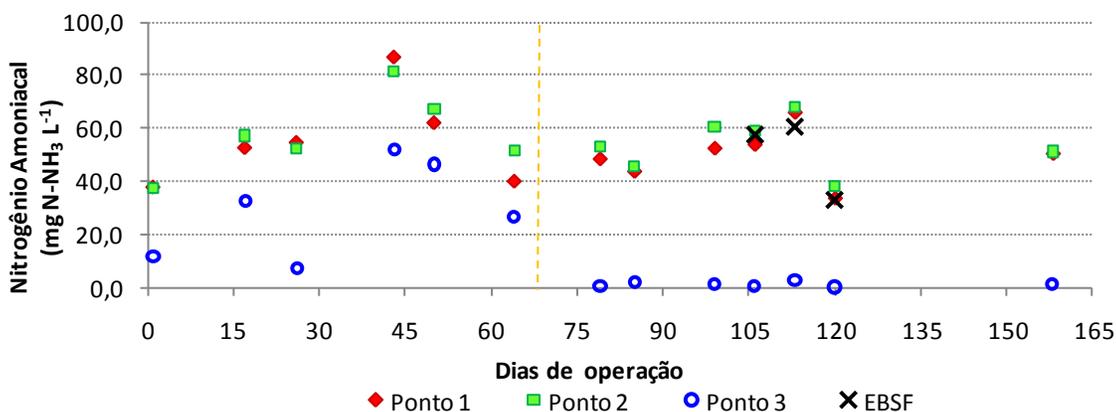


Figura 5.14: Concentração de nitrogênio amoniacal nos pontos de amostragem do sistema – Fase 1.

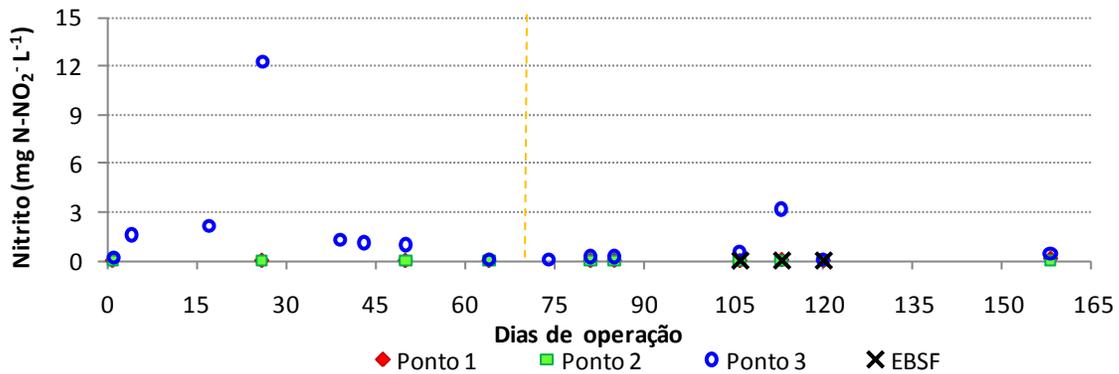


Figura 5.15: Concentração de nitrito nos pontos de amostragem do sistema – Fase 1.

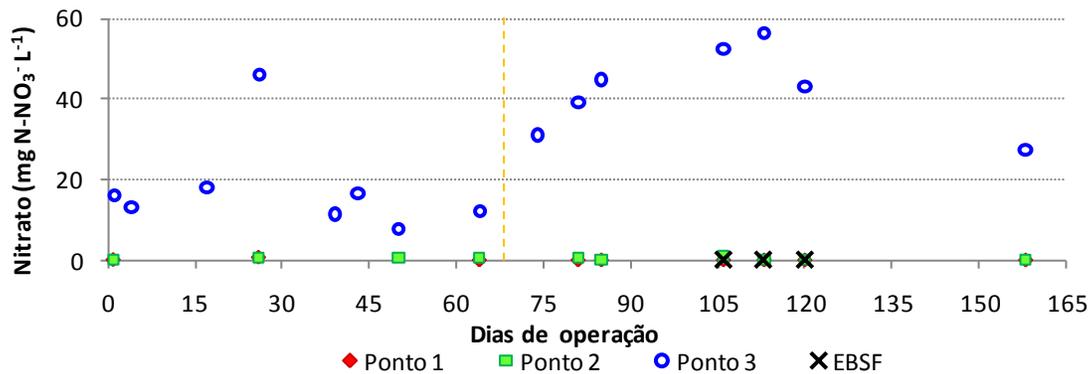


Figura 5.16: Concentração de nitrato nos pontos de amostragem do sistema – Fase 1.

O nitrogênio amoniacal, Figura 5.14, apresentou altas concentrações no Ponto 1 e Ponto 2. Assim como nos trabalhos de Domingues (2005), Castagnato (2006) e Batista (2007), a concentração de nitrogênio amoniacal no Ponto 2 foi próxima a do Ponto 1 devido ao período de estocagem do esgoto nas bombonas de polietileno que contribuiu para a conversão de quase toda a porção de nitrogênio orgânico para amoniacal.

Inicialmente no Ponto 3, houve baixa eficiência na conversão do nitrogênio para as formas nitrogenadas nitrito e nitrato, que pode ser verificado pelas elevadas concentrações de nitrogênio amoniacal e concentração de nitrato abaixo de 20 mg L⁻¹. Isto deveu-se também pela ineficiência do suprimento de oxigênio dissolvido, solucionado com a troca do sistema de aeração no 68º dia de operação. Conforme discutido nos itens 5.1.1 - A e B, foram realizadas algumas mudanças no

sistema para melhor desempenho. A linha tracejada nas Figuras 5.14, 5.15 e 5.16 indica a data da mudança no sistema de aeração.

Com o aumento da concentração de OD fornecido à biomassa do BAS houve a adaptação das bactérias nitrificantes que passaram a consumir o nitrogênio amoniacal convertendo-o para nitrito e nitrato. Na Figura 5.16, é possível observar a elevação da concentração de nitrato ao longo do tempo.

5.1.2 Fase 2: concentração de 200 mg L⁻¹ de formaldeído

Na Fase 2 foram adicionados 200 mg L⁻¹ de formaldeído ao esgoto bruto, e sua duração foi de 153 dias.

Os valores das variáveis físicas e químicas da Fase 2, referentes aos três pontos de amostragem e o esgoto bruto sem adição de formaldeído (EBSF) estão apresentados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2: Valores médios obtidos para as variáveis físicas e químicas durante a Fase 2

VARIÁVEL	Ponto 1		Ponto 2		Ponto 3		EBSF	
	MED	DP	MED	DP	MED	DP	MED	DP
Temperatura (C°)	24	1	24	2	24	2	24	2
Condutividade Elétrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	1018	252	1053	215	785	161	828	198
Dureza ($\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$)	62	6	63	6	62	5	63	8
OD (mg L^{-1})	1,0	0,5	1,5	1,2	6,1	0,7	1,9	0,8
pH	8,1	0,4	7,2	0,2	7,3	0,3	7,2	0,3
Formaldeído (mg HCHO L^{-1})	203,7	18,3	2,4	1,9	0,1	0,1	0,4	0,3
AOV (mg HAc L^{-1})	75	37	48	15	28	14	43	19
AP ($\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$)	275	70	278	63	72	49	181	61
AT ($\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$)	378	87	388	78	97	61	247	79
AI/AP	-	-	0,4	0,2	-	-	-	-
SST (mg L^{-1})	245	211	48	31	5	4	99	38
SSV (mg L^{-1})	175	180	38	23	4	3	80	30
SSF (mg L^{-1})	63	56	10	10	1	1	19	11
DQO ($\text{mg O}_2 \text{ L}^{-1}$)	625	139	167	98	41	25	236	90
DBO ($\text{mg O}_2 \text{ L}^{-1}$)	307	37	99	84	10	9	NR (*)	NR (*)
NTK (mg L^{-1})	56	22	49	14	4	5	59	22
NH_3 (mg L^{-1})	50	22	45	13	3	4	55	22
NO_2^- (mg L^{-1})	<LQ (**)	<LQ (**)	<LQ (**)	<LQ (**)	0,4	0,3	<LQ (**)	<LQ (**)
NO_3^- (mg L^{-1})	0,6	0,1	0,6	0,5	38,9	9,8	0,5	0,2

sendo: **OD**: Oxigênio dissolvido; **AOV**: Ácidos Orgânicos Voláteis; **AP**: Alcalinidade Parcial; **AT**: Alcalinidade Total; **AI/AP**: Relação Alcalinidade intermediária/ Alcalinidade parcial; **SST**: Sólidos Suspensos Totais; **SSV**: Sólidos Suspensos Voláteis; **SST**: Sólidos Suspensos Fixos; **DQO**: Demanda Química de Oxigênio; **DBO**: Demanda Bioquímica de Oxigênio; **NTK**: Nitrogênio Kjeldahl Total; **NH₃**: Nitrogênio Amoniacal; **NO₂⁻**: Nitrito; **NO₃⁻**: Nitrato
 MED: Média
 DP: Desvio padrão
 (*) NR – Análise não realizada para este ponto de amostragem
 (**) <LQ – Limite de Quantificação do método (LQ = 0,023 mg NO₂⁻ L⁻¹)

As variáveis temperatura, condutividade elétrica e dureza não se alteraram significativamente em relação à Fase 1, no entanto os valores estavam mais baixos. A dureza mostrou maior diminuição, porém a concentração média entre os pontos que foi de 63 mg CaCO₃ L⁻¹, valor também maior que o recomendado para *D. similis*, organismo mais sensível a alterações nesta variável.

Os valores da concentração de oxigênio dissolvido, Figura 5.17, foram mais estáveis nesta fase, sendo a concentração média 6,1 ± 0,7 mg O₂ L⁻¹, desta forma

esta variável não foi limitante para a atividade da biomassa aeróbia. As oscilações nas concentração de OD registradas a partir do 262º dia de operação ocorreram devido a presença de elevadas concentrações de nitrogênio amoniacal tanto no Ponto 1 como no Ponto 2.

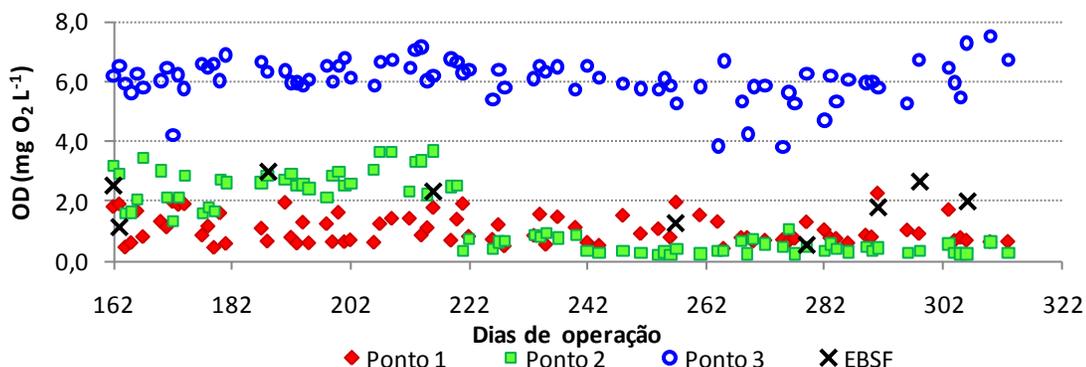


Figura 5.17: Concentrações de oxigênio dissolvido nos pontos de amostragem do sistema – Fase 2.

A partir do 222º houve a alteração da forma de coleta, nos Pontos 1 e 2 devido a elevada concentração de OD observada no monitoramento. No reservatório de alimentação, o preenchimento provoca elevada agitação do esgoto e por isto eram detectados altas concentrações de OD, assim a coleta da amostra para leitura do OD foi realizada 10 minutos após o preenchimento do reservatório. O Ponto 2 é coletado em um desvio na mangueira que liga a saída do FA, com a entrada do BAS, porém como flui uma vazão pequena de efluente, ocorre o gotejamento que também altera a concentração de OD na amostra. Para minimizar esta agitação, apenas a coleta para a leitura da concentração de OD do Ponto 2 foi realizada na parte superior interna do FA, retirando o sobrenadante do com auxílio de um béquer de 50 mL.

A) Avaliação da remoção do formaldeído

Os valores das concentrações de formaldeído estão apresentados na Figura 5.18.

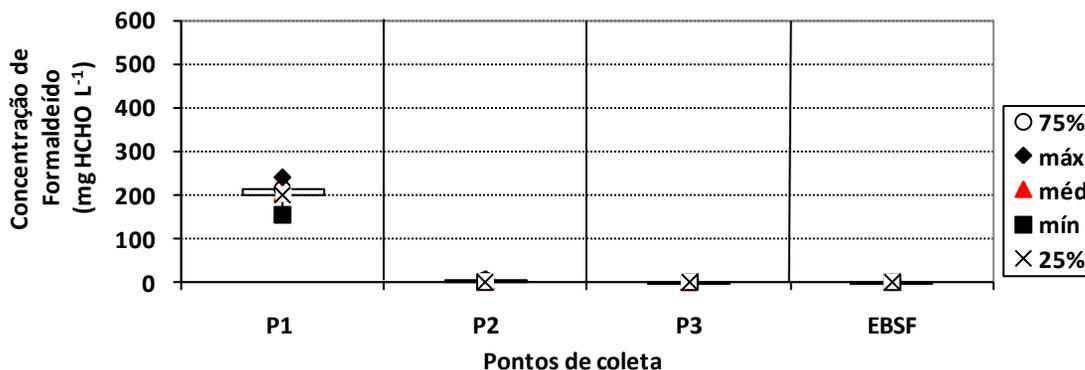
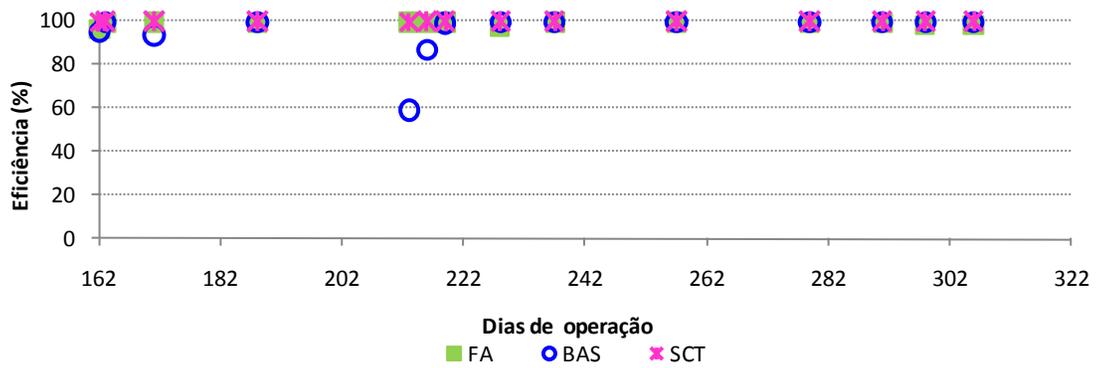


Figura 5.18: Concentração de formaldeído nos pontos de amostragem do sistema – Fase 2.

Comparando com trabalhos de Batista (2007) e Catagnato (2006), a concentração de formaldeído real aplicada neste trabalho, em média $203,7 \pm 18,3$ mg HCHO L⁻¹, foi a mais próxima da teórica aplicada ao sistema 200 mg HCHO L⁻¹, com isso as análises relativas ao monitoramento do sistema e dos testes de toxicidade serão mais realistas. Por se tratar de esgotos sanitários diferentes, sendo este um esgoto mais fraco (menos concentrado) em termos de DQO e sólidos que o utilizado nos trabalhos anteriores, o formaldeído adicionado pode ter interagido menos com o esgoto bruto, diminuindo seu consumo.

O sistema mostrou grande estabilidade na Fase 2, conforme pode ser verificado na Figura 5.19, e mesmo com o aumento da concentração de formaldeído a eficiência obtida foi maior que na Fase 1. As médias das eficiências foram de $99 \pm 1\%$ no FA, $95 \pm 11\%$ no BAS, sendo para o sistema combinado 100% . Este desempenho está associado a elevada adaptação tanto da biomassa anaeróbia quanto da aeróbia presente no sistema, que já completou cinco anos de operação em condições semelhantes.



FA – Filtro Anaeróbio; BAS – Biofiltro Aeróbio Submerso; SCT – Sistema combinado de tratamento

Figura 5.19: Valores de eficiência na redução da concentração de formaldeído – Fase 2.

B) Avaliação das variáveis pH, alcalinidade e AOV

Na Figura 5.20 a 5.22 podem ser verificados os comportamentos temporais das variações nos valores de pH, alcalinidade parcial e alcalinidade total, respectivamente, ao longo da Fase 2, nos pontos de amostragem do sistema.

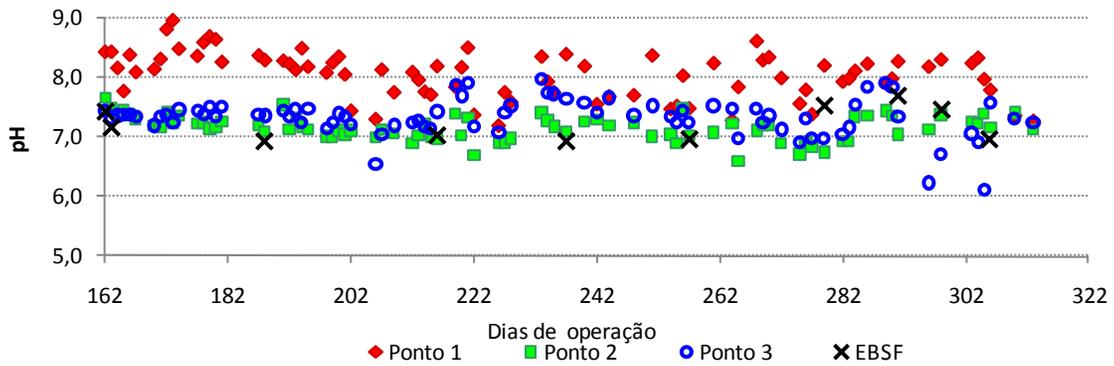


Figura 5.20: Valores de pH nos pontos de amostragem do sistema – Fase 2.

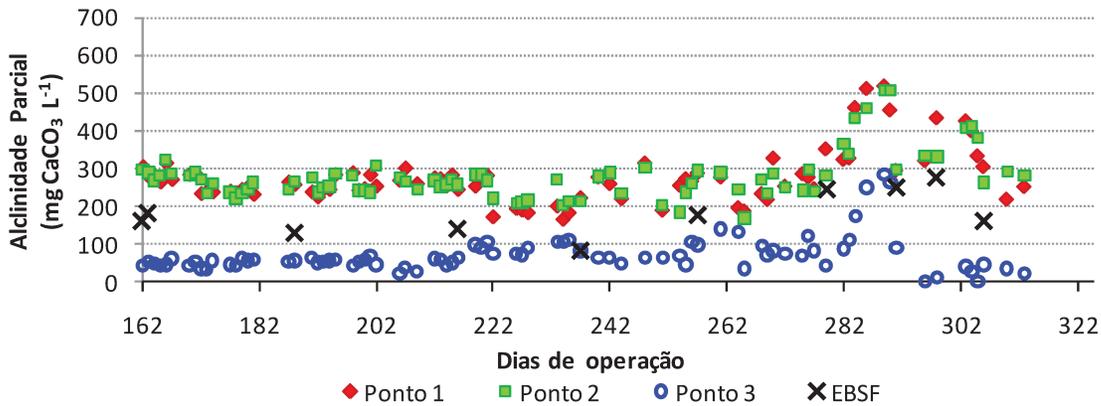


Figura 5.21: Variação da alcalinidade parcial nos pontos de amostragem do sistema – Fase 2.

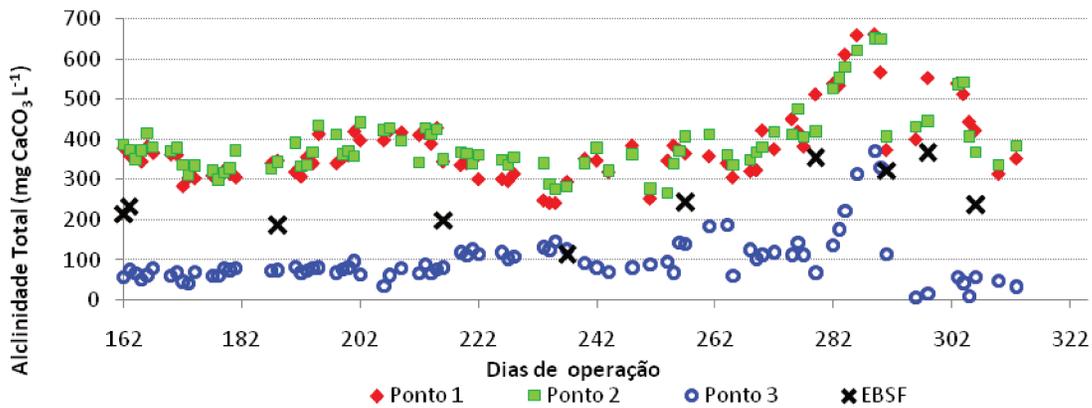


Figura 5.22: Variação da alcalinidade total nos pontos de amostragem do sistema – Fase 2.

Com a adição contínua de Na_2CO_3 ao sistema, não houve variações significativas em relação ao pH, como mostra a Figura 5.20. No Ponto 1 o valor médio do pH foi de $8,1 \pm 0,4$, acima da faixa comum do esgoto sanitário bruto de pH 6,5 a 7,5 (JORDÃO e PESSOA, 2009), no entanto, pelo desempenho do sistema nas demais variáveis analisadas este valor não foi prejudicial. Os demais pontos de amostragem mantiveram o pH em torno de 7, faixa ótima para as atividades da biomassa.

A alcalinidade parcial e total apresentou comportamento semelhante, com pouca variação nas concentrações. A faixa de variação da AP foi de 200 a 300 mg L^{-1} e a AT de 300 a 400 mg L^{-1} até o 222º dia de operação. Após esta data,

durante as coletas, por conta de oscilações na vazão de entrada da caixa de homogeneização, ocorreu a ressuspensão de sólidos sedimentados no fundo desta. Mesmo realizando pausas na coleta com intuito de não coletar este esgoto com excesso de sólidos, deixando-o escoar, o esgoto coletado ainda permaneceu com uma concentração elevada, interferindo em algumas variáveis do sistema.

Devido a este fato, houve maior variação entre as concentrações das amostras principalmente após o 279º dia de operação, no qual pode ser verificado o aumento da AP e AT do sistema. Também ocorreu a queda do pH no Ponto 3, devido ao consumo de alcalinidade pelos microrganismos nitrificantes.

Esta desestabilização pode ser vista pela na Figura 5.23, que mostra a relação entre a alcalinidade intermediária (AI) e a alcalinidade parcial (AP). Esta relação AI/AP se manteve em $0,4 \pm 0,1$, acima da estabelecida como a de estabilidade do FA 0,3 por Ripley *et al.* (1986), comprovando que o FA passou por momentos de instabilidade.

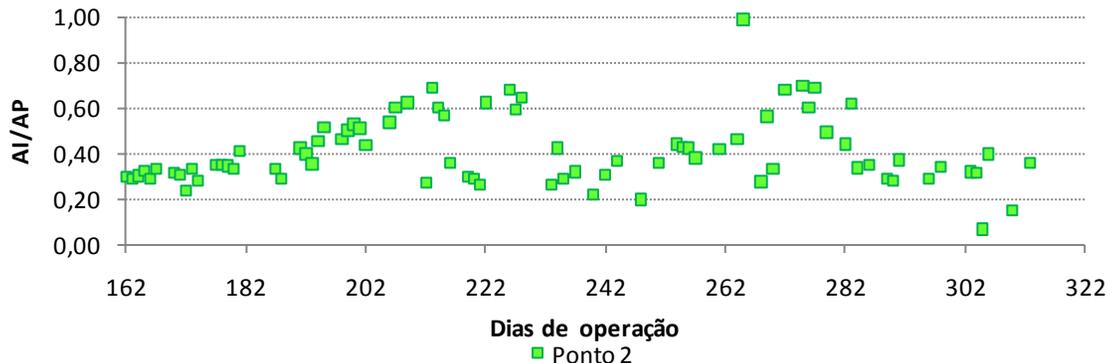


Figura 5.23: Relação AI/AP no Ponto 2 (FA) – Fase 2.

O Ponto 1 registrou altas concentrações de AOV (Figura 5.24). Este aumento na concentração pode ser devido à própria variação ao qual o esgoto está sujeito, e também pelo arraste de sólidos da caixa de homogeneização relatado anteriormente. No entanto, o FA mostrou-se eficiente na remoção dos AOV, assimilando os picos do afluente bruto.

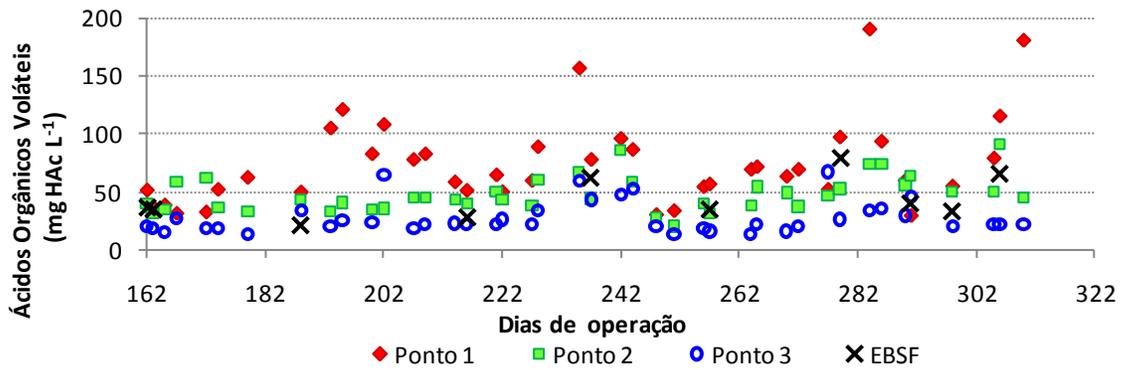


Figura 5.24: Variação da concentração de ácidos orgânicos voláteis nos pontos de amostragem do sistema – Fase 2.

C) Avaliação das variáveis DQO, DBO e sólidos

As variações nas concentrações de DQO bruta e filtrada ao longo da operação do sistema na Fase 2 estão representadas nas Figuras 5.25 e 5.26.

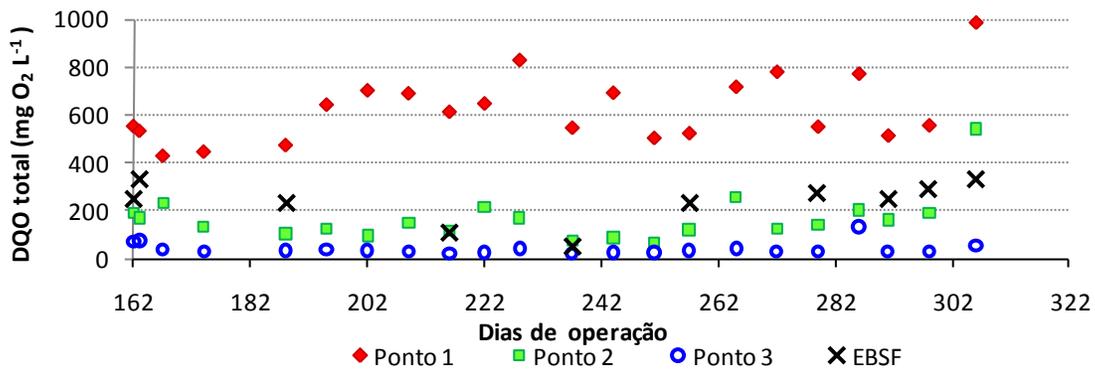


Figura 5.25: Variação do valor de DQO total nos pontos de amostragem do sistema – Fase 2.

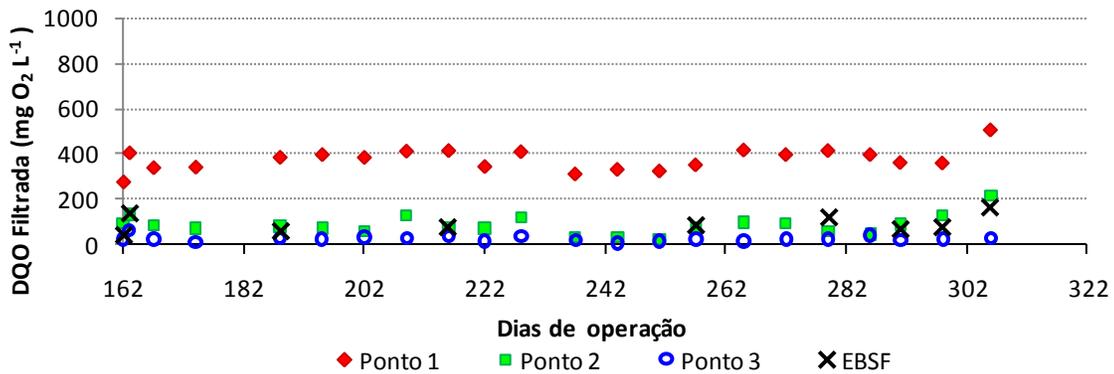
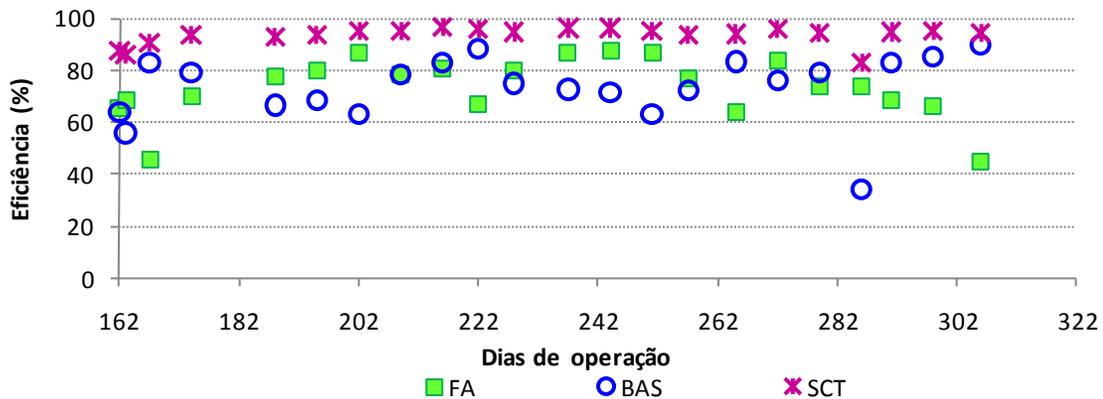


Figura 5.26: Variação do valor de DQO filtrada nos pontos de amostragem do sistema – Fase 2.

Na Fase 2 houve elevação na concentração média de DQO total no Ponto 1, cuja média foi de $625 \pm 139 \text{ mg O}_2 \text{ L}^{-1}$, em relação a Fase 1, que obteve média de $417 \pm 99 \text{ mg O}_2 \text{ L}^{-1}$. Esta elevação ocorrida além de estar relacionada com a alta concentração de sólidos, também deveu-se ao aumento na concentração de formaldeído no esgoto afluente de $100 \text{ mg HCHO L}^{-1}$ para $200 \text{ mg HCHO L}^{-1}$, já que a DQO filtrada no também aumentou quando comparada com a Fase 1.

Os Pontos 2 e 3 foram menos afetados por este aumento da DQO no Ponto 1, tanto para DQO bruta quanto filtrada.

A eficiência na redução da concentração de DQO total na Fase 1 é apresentada na Figura 5.27.



FA – Filtro Anaeróbio; BAS – Biofiltro Aeróbio Submerso; SCT – Sistema combinado de tratamento

Figura 5.27: Variação temporal da redução da concentração de DQO total - Fase 2.

As médias da redução dos valores de DQO foram de $73 \pm 12\%$ para o FA, $73 \pm 13\%$ no BAS, 10 pontos percentuais mais eficientes quando comparados com os valores de eficiência de na Fase 1. O sistema combinado obteve em média 93,4% de eficiência na redução da concentração de DQO e também foi mais eficiente em relação a Fase 1,

A DBO obteve no FA, BAS e sistema combinado, a eficiência na redução da concentração de matéria orgânica de $69 \pm 27\%$, $87 \pm 9\%$ e $97 \pm 2\%$ respectivamente. O desempenho do FA foi menor, comparado com a Fase 1, no entanto o BAS compensou a perda de eficiência conferindo ao sistema combinado com DBO média de $10 \pm 9 \text{ mg O}_2 \text{ L}^{-1}$.

Considerando-se as condições e os padrões de lançamento de efluentes em corpos d'água estabelecidos no Estado de São Paulo (Lei 997/76 – art.18), sendo o limite de lançamento de $60 \text{ mg O}_2 \text{ L}^{-1}$, ou remoção de pelo menos 80% de DBO, e em esfera federal (CONAMA 430/2011) que determina a remoção mínima de 60% de DBO, o sistema combinado manteve o desempenho atendendo ambas as legislações.

Nas Figuras 5.28 e 5.29, pode ser verificada a entrada de elevadas quantidades de sólidos no sistema. Assim como discutido anteriormente o arraste de sólidos da caixa de homogeneização causou o aumento da concentração de sólidos no afluente bruto e em algumas amostragens picos de concentração.

Independente destas variações o FA manteve bom desempenho, na redução da concentração de sólidos gerando efluente com baixas concentrações de sólidos não afetando BAS.

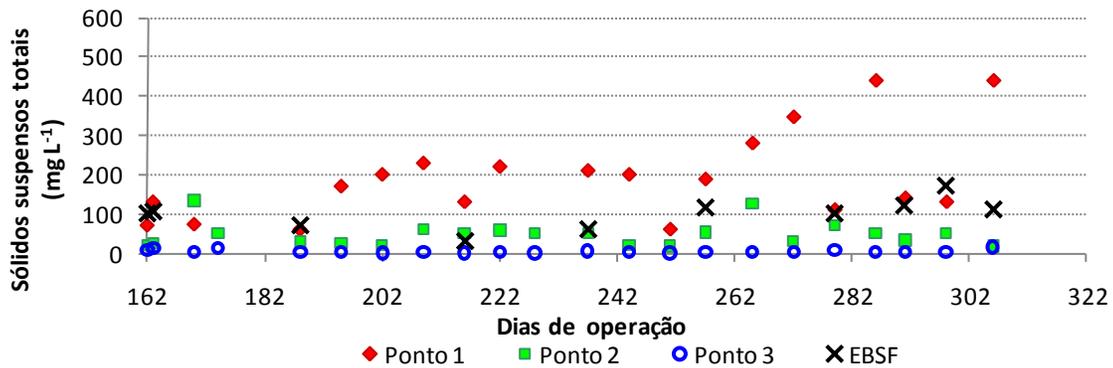


Figura 5.28: Variação da concentração de Sólidos suspensos totais nos pontos de amostragem do sistema – Fase 2.

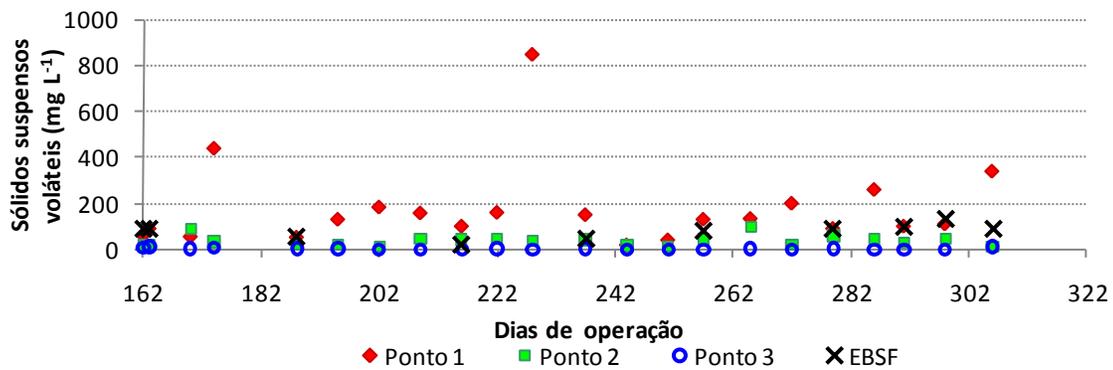


Figura 5.29: Variação da concentração de Sólidos suspensos voláteis nos pontos de amostragem do sistema – Fase 2.

D) Avaliação da série de Nitrogênio

Na Fase 2, foram registrados elevadas concentrações de nitrogênio amoniacal no Ponto 1, sendo a máxima $99,0 \text{ mg NH}_3 \text{ L}^{-1}$. O FA também acompanhou o aumento do Ponto 1, e mesmo com os picos de concentração registrados não ocorreu grande acúmulo de nitrogênio amoniacal no Ponto 3. Isto indica que os microrganismos nitrificantes encontram-se adaptados e havia OD e alcalinidade em quantidade suficiente para que ocorresse a nitrificação, Os valores das concentrações de nitrogênio amoniacal, nitrito e nitrato estão representados nas Figuras 5.30, 5.31 e 5.32, respectivamente.

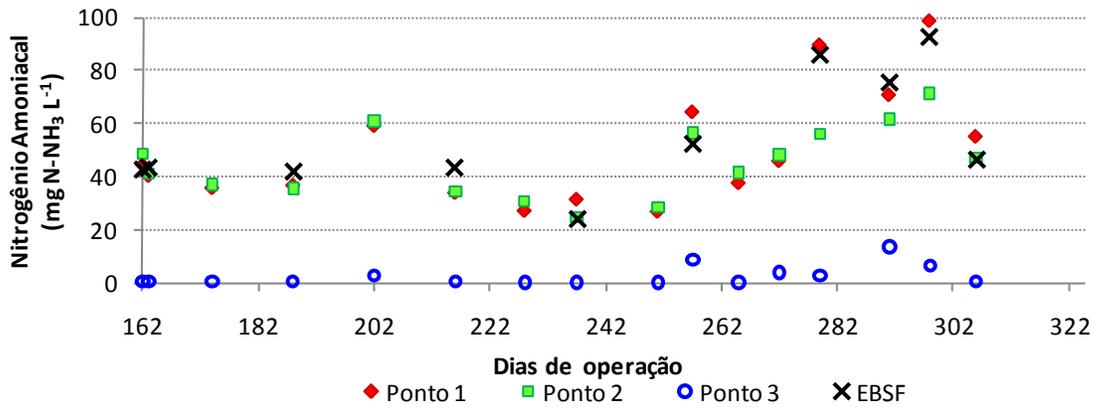


Figura 5.30: Concentração de nitrogênio amoniaco nos pontos de amostragem do sistema – Fase 2.

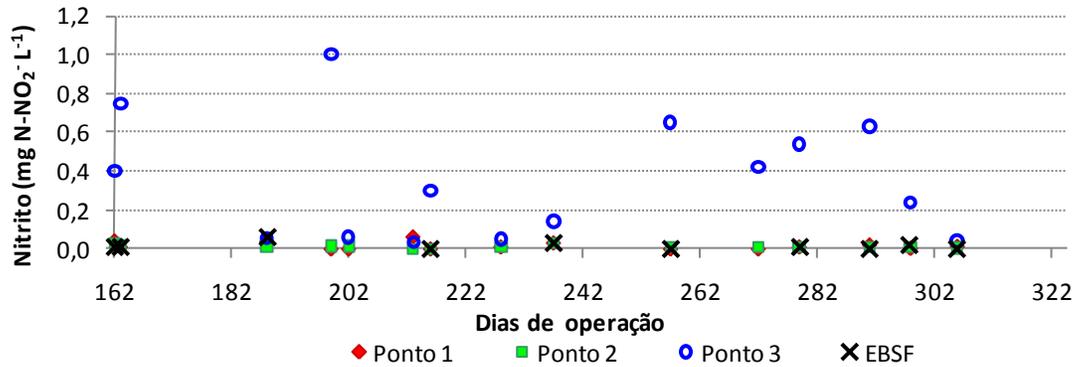


Figura 5.31: Concentração de nitrito nos pontos de amostragem do sistema – Fase 2.

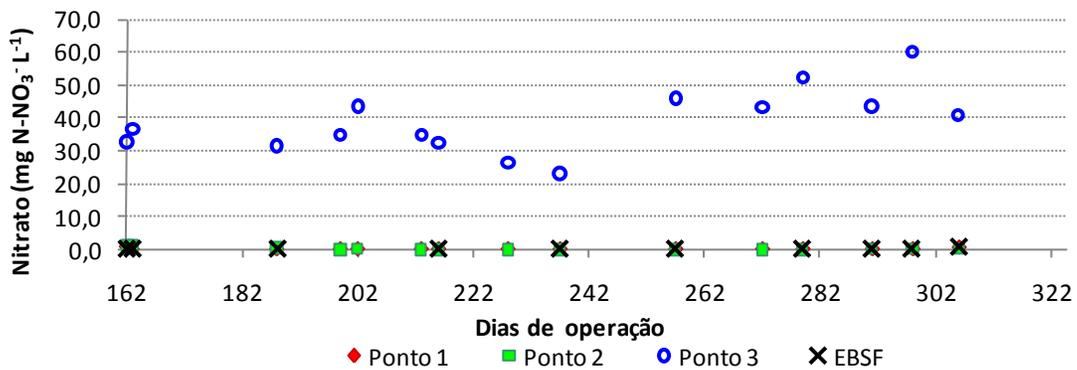


Figura 5.32: Concentração de nitrato nos pontos de amostragem do sistema – Fase 2.

O sistema BAS mostrou-se mais eficiente na conversão de nitrogênio, visto que a concentração de nitrito permaneceu abaixo de $1,0 \text{ mg NO}_2^- \text{ L}^{-1}$, valor menor que o verificado na Fase 1, e a concentração de nitrato manteve elevada indicando que não houve limitação do sistema para que ocorresse a nitrificação.

5.1.3 Fase 3: concentração de 400 mg L^{-1} de formaldeído

A Fase 3 caracterizou-se pela dosagem de 400 mg L^{-1} de formaldeído no esgoto bruto, e sua duração foi de 259 dias. Esta fase apresentou maior duração que as anteriores e a biomassa presente no sistema combinado aeróbio-anaeróbio necessitou de um período para adaptação à nova concentração de formaldeído aplicada.

Os valores das variáveis físicas e químicas da Fase 3, referentes aos três pontos de amostragem e o esgoto bruto sem adição de formaldeído (EBSF) estão apresentados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 Valores médios obtidos para as variáveis físicas e químicas durante a Fase 3

VARIÁVEL	Ponto 1		Ponto 2		Ponto 3		EBSF	
	MED	DP	MED	DP	MED	DP	MED	DP
Temperatura (C°)	24	2	24	2	23	2	23	1
Condutividade Elétrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	1044	206	1047	203	785	141	875	144
Dureza ($\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$)	72	14	78	20	74	16	70	12
OD (mg L^{-1})	1,2	0,6	0,6	0,6	5,6	1,1	1,8	0,9
pH	7,6	0,4	6,8	0,2	7,4	0,3	7,2	0,2
Formaldeído (mg HCHO L^{-1})	434,2	52,0	36,5	33,6	2,6	0,6	0,5	0,1
AOV (mg HAc L^{-1})	79	41	79	29	27	12	69	39
AP ($\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$)	248	71	236	66	99	60	201	55
AT ($\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$)	347	89	357	86	135	80	258	56
AI/AP	-	-	0,5	0,3	-	-	-	-
SST (mg L^{-1})	129	87	71	44	13	13	79	34
SSV (mg L^{-1})	92	67	62	38	11	11	61	28
SSF (mg L^{-1})	37	30	10	7	2	2	17	8
DQO ($\text{mg O}_2 \text{ L}^{-1}$)	1001	399	383	268	62	28	252	198
DBO ($\text{mg O}_2 \text{ L}^{-1}$)	694	265	240	138	10	5	NR	NR
NTK (mg L^{-1})	62	14	61	21	13	12	60	16
NH ₃ (mg L^{-1})	50	20	54	21	12	17	52	14
NO ₂ ⁻ (mg L^{-1})	0,1	0,4	<LQ (**)	<LQ (**)	1,8	2,7	0,2	0,4
NO ₃ ⁻ (mg L^{-1})	1,4	1,2	1,8	1,9	32,4	18,6	1,1	0,6

sendo: OD: Oxigênio dissolvido; AOV: Ácidos Orgânicos Voláteis; AP: Alcalinidade Parcial; AT: Alcalinidade Total; AI/AP: Relação Alcalinidade intermediária/ Alcalinidade parcial; SST: Sólidos Suspensos Totais; SSV: Sólidos Suspensos Voláteis; SNT: Sólidos Suspensos Fixos; DQO: Demanda Química de Oxigênio; DBO: Demanda Bioquímica de Oxigênio; NTK: Nitrogênio Kjeldahl Total; NH₃: Nitrogênio Amoniacal; NO₂⁻: Nitrito; NO₃⁻: Nitrato
MED: média
DP: desvio padrão

(*) NR – Análise não realizada para este ponto de amostragem

(**) <LQ – Limite de Quantificação do método (LQ = 0,023 mg NO₂⁻ L⁻¹)

Não houve variação significativa entre as variáveis temperatura, condutividade elétrica e dureza em relação às fases anteriores, mesmo a dureza apresentando uma concentração mais elevada, as médias estão próximas às obtidas na Fase 1, que não causou afeto o tratamento.

No Ponto 3 a concentração de oxigênio dissolvido ao longo do estudo foi bastante variável e a média da concentração de OD (Tabela 5.3), foi menor que nas fases anteriores. Este fato foi decorrente ao período de adaptação da biomassa à

nova concentração de formaldeído aplicada, que interferiu de modo negativo no processo de nitrificação, onde as altas concentrações de nitrogênio amoniacal presentes no afluente bruto (Ponto 1) não foram totalmente convertidas as formas oxidadas de nitrogênio.

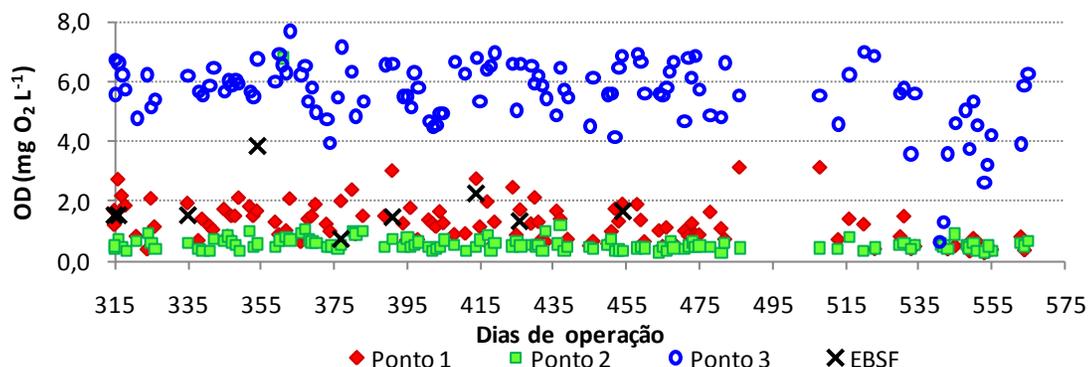


Figura 5.33: Concentrações de oxigênio dissolvido nos pontos de amostragem do sistema – Fase 3.

A partir do 487º, devido a falta de esgoto na FEAGRI ocorrida no período de recesso acadêmico, foi necessário o aumento do tempo de detenção hidráulica do sistema para 24 h e a utilização por 29 dias do esgoto coletado no Laboratório de Protótipos da FEC, proveniente da região compreendida pelos edifícios pertencentes ao do Hospital das Clínicas da UNICAMP e outros edifícios no entorno, o mesmo efluente utilizado no trabalho de Foco (2010). Por se tratar de um esgoto mais concentrado em termos de matéria orgânica e sólidos, o sistema sofreu desestabilização no período. Como pode ser verificado na Figura 5.33, houve a queda da concentração de OD após o 535º dia de operação, sendo necessário a utilização de mais um compressor de ar para aumentar a concentração de OD no BAS.

A) Avaliação da remoção do formaldeído

A concentração de formaldeído no Ponto 1 foi de $434,2 \pm 52$ mg HCHO L⁻¹ e manteve-se próxima da concentração nominal aplicada na maioria das amostragens.

O perfil de comportamento dos valores das concentrações de formaldeído estão apresentados na Figura 5.34.

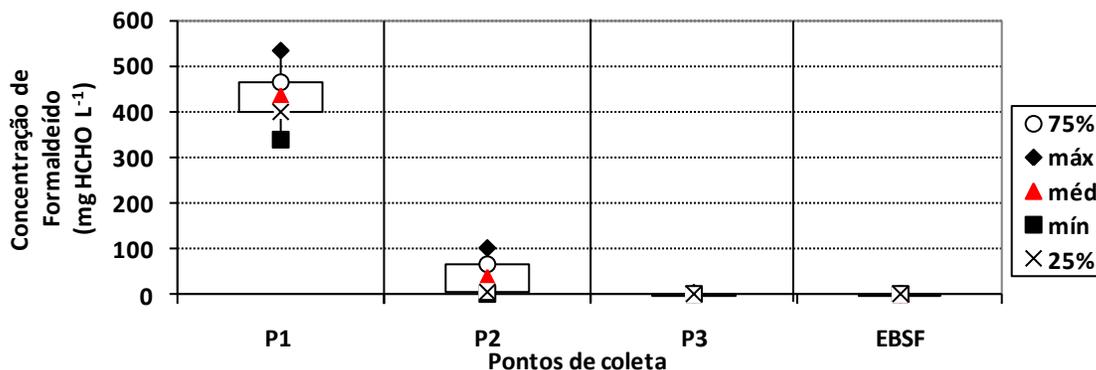
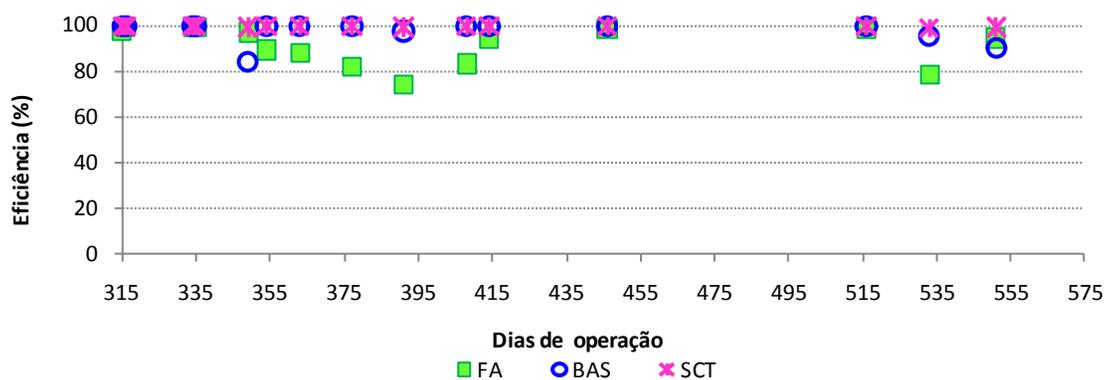


Figura 5.34: Concentração de formaldeído nos pontos de amostragem do sistema – Fase 3.

Com a aplicação do dobro da dosagem da Fase 2, a capacidade de redução da concentração de formaldeído no FA diminuiu. Com isso, a concentração de formaldeído no Ponto 2 aumentou, chegando a $101,6 \text{ mg HCHO L}^{-1}$ a máxima no 391º dia de operação, reduzindo a eficiência do FA, como pode ser observado na Figura 5.35. Mesmo com estas alterações nas características do Ponto 2 em relação ao formaldeído, o FA não registrou eficiência menor que 70% e após o período de adaptação se recuperou obtendo como eficiência média de $81,2 \pm 8,6\%$.

Embora tenha ocorrido a elevação da concentração de formaldeído no Ponto 2, o Ponto 3 não foi afetado, registrando na maioria das amostragens concentrações menores que o limite de detecção do método ($\text{LD} = 0,009 \text{ mg HCHO L}^{-1}$), garantindo ao sistema eficiência de redução na faixa de $99,8 \pm 0,3\%$.



FA – Filtro Anaeróbio; BAS – Biofiltro Aeróbio Submerso; SCT – Sistema combinado de tratamento

Figura 5.35: Valores de eficiência na redução da concentração de formaldeído – Fase 3.

B) Avaliação das variáveis pH, alcalinidade e AOV

Os comportamentos temporais das variações nos valores de pH, alcalinidade parcial e alcalinidade total, respectivamente, ao longo da Fase 3, nos pontos de amostragem do sistema podem ser verificados nas Figuras 5.36, 5.37 e 5.38.

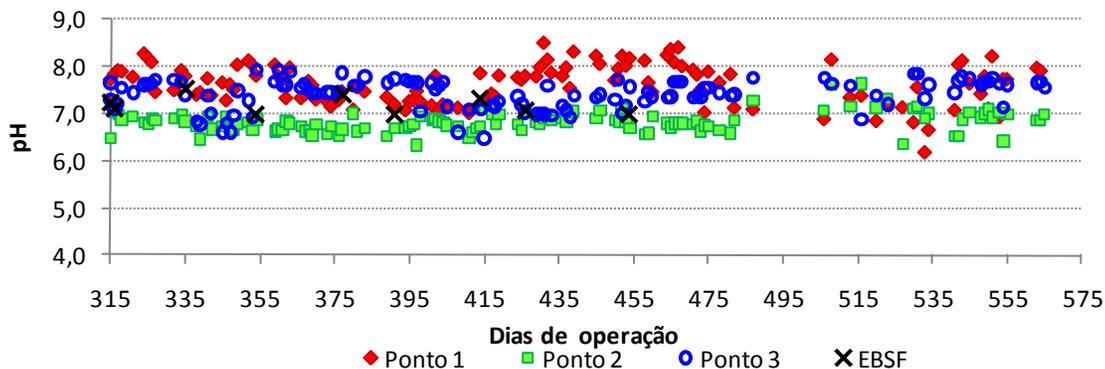


Figura 5.36: Valores de pH nos pontos de amostragem do sistema – Fase 3.

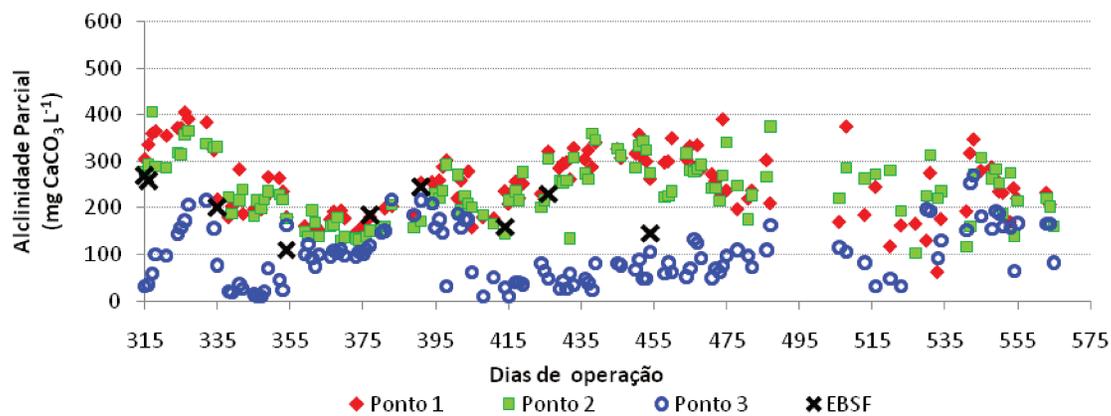


Figura 5.37: Variação da alcalinidade parcial nos pontos de amostragem do sistema – Fase 3.

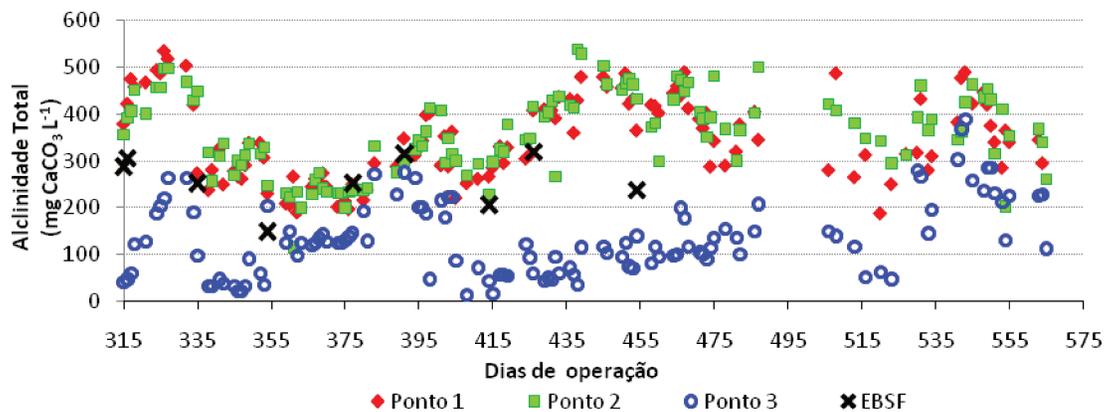


Figura 5.38: Variação da alcalinidade total nos pontos de amostragem do sistema – Fase 3.

Os valores de pH verificados nos pontos de amostragem do sistema combinado apresentaram pouca variação até o 486º dia de operação. Neste período pode ser observado que o efluente do Ponto 2 apresentou, em média, o pH mais baixo que nas fases anteriores, o que está relacionado não apenas com o aumento da concentração de formaldeído mas também ao acúmulo de ácidos orgânicos no FA. O valor de pH no Ponto 1, após o 415º dia de operação, aumentou devido a necessidade de se elevar a concentração do alcalinizante aplicado para a demanda decorrente do processo de nitrificação.

Até o 486º dia de operação as variáveis alcalinidade parcial e total apresentaram oscilação na concentração, nos Pontos 1 e 2, devido principalmente a

variação na concentração de alcalinizante no sistema para suprir a necessidade das bactérias nitrificantes no BAS. O acúmulo de alcalinidade no Ponto 3 ocorreu pela redução da atividade das bactérias nitrificantes, devido a baixa concentração de OD. Após a troca do compressor de ar no 408º dia, foi registrado o retorno do consumo de alcalinidade .

No início do monitoramento da Fase 3, Figura 5.39, os valores obtidos para a relação AI/AP no FA estavam mais estáveis. A partir do 355º dia ocorreu importante variação no comportamento do FA, verificada pelo aumento na dispersão dos pontos, decorrente da própria variabilidade na qualidade do esgoto bruto e pela adição de concentração maior de formaldeído. A média obtida no final do monitoramento foi de $0,5 \pm 0,3$, superando os valores encontrados para a Fase 2, porém, fazendo uma avaliação geral o sistema manteve bom desempenho.

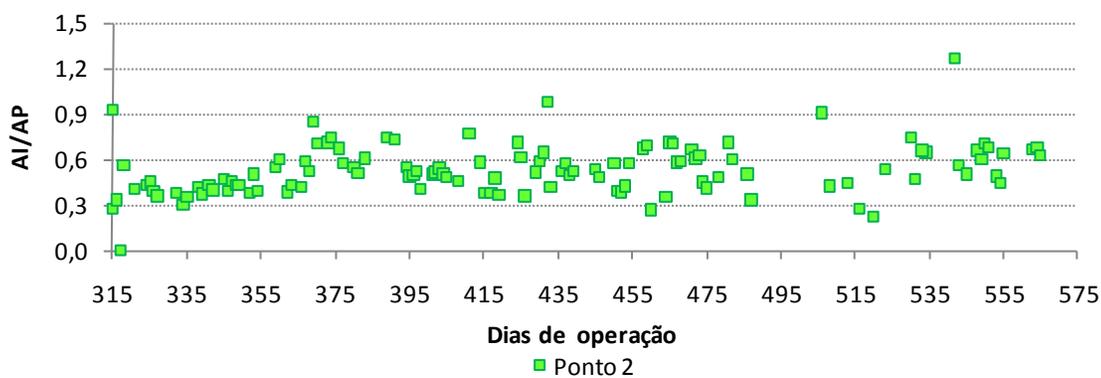


Figura 5.39: Relação AI/AP no Ponto 2 (FA) – Fase 3.

Na Fase 3 foram registradas altas concentrações de ácidos orgânicos, voláteis principalmente no Ponto 2, que sofreu o maior impacto devido o aumento da concentração de formaldeído no sistema. Com isso houve também o acúmulo de AOV no Ponto 3, no entanto o BAS conseguiu promover a degradação e reduzir a concentração sem haver queda no valor de pH. A concentração de ácidos orgânicos voláteis nos pontos de amostragem do sistema está representada na Figura 5.40.

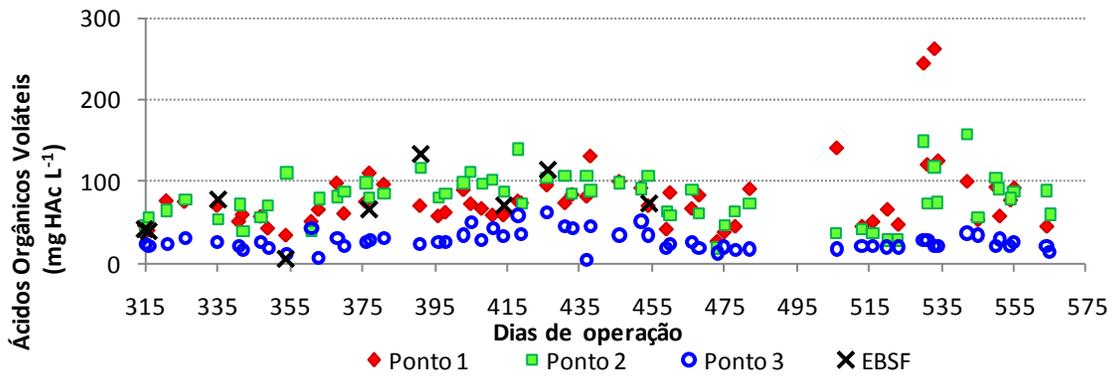


Figura 5.40: Variação da concentração de ácidos orgânicos voláteis nos pontos de amostragem do sistema – Fase 3.

C) Avaliação das variáveis DQO, DBO e sólidos

As variações nas concentrações de DQO total e filtrada ao longo da operação do sistema na Fase 3 estão representadas nas Figuras 5.41 e 5.42.

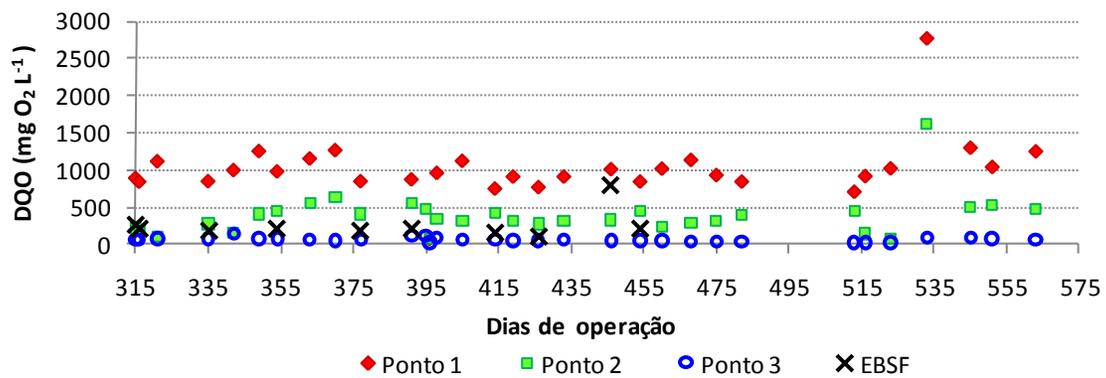


Figura 5.41: Variação do valor de DQO total nos pontos de amostragem do sistema – Fase 3.

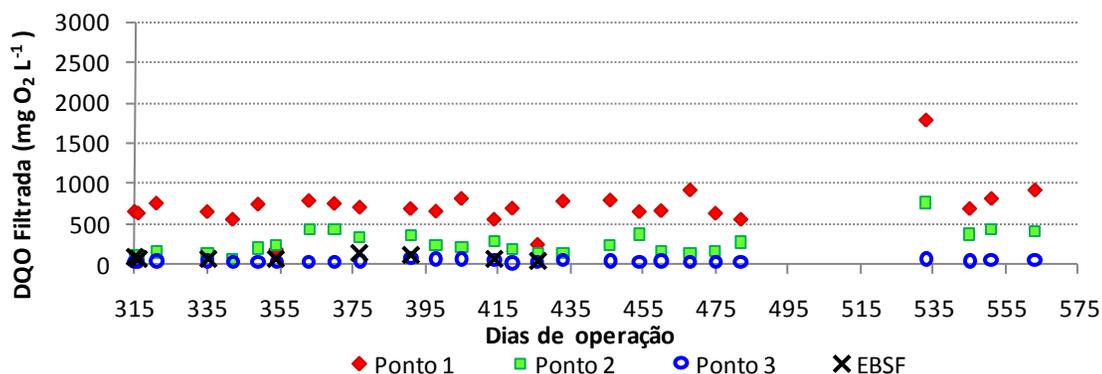
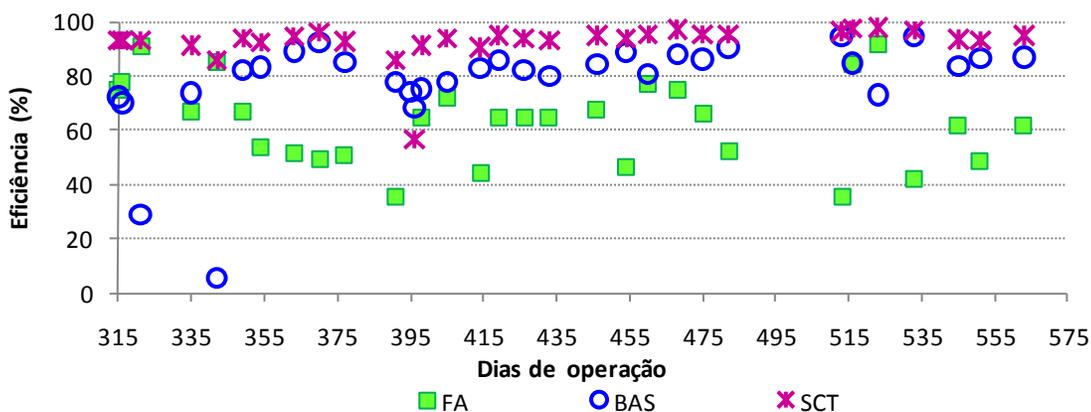


Figura 5.42: Variação do valor de DQO filtrada nos pontos de amostragem do sistema – Fase 3.

A concentração média da DQO total e filtrada dos Pontos 1 e 2 praticamente dobraram na Fase 3 devido principalmente ao aumento na concentração de formaldeído no esgoto afluente. O Ponto 3 também registrou aumento na DQO, mas ainda assim o pós-tratamento realizado pelo BAS manteve a eficiência na redução da concentração pelo sistema, como pode ser verificado na Figura 5.43.



FA – Filtro Anaeróbio; BAS – Biofiltro Aeróbio Submerso; SCT – Sistema combinado de tratamento

Figura 5.43: Variação temporal da redução da concentração de DQO total - Fase 3.

As médias da redução dos valores de DQO foram de $60 \pm 24\%$ para o FA, 10 pontos percentuais menos eficiente que na Fase 2, e de $78 \pm 18\%$ para o BAS. O sistema combinado obteve em média $93 \pm 7\%$ de eficiência na redução da concentração de DQO, mantendo praticamente a mesma eficiência da Fase 2,

Em relação a DBO os valores da eficiência na redução da concentração de matéria orgânica no FA, BAS e sistema combinado foram de $66 \pm 12\%$, $95 \pm 3\%$ e $99 \pm 1\%$ respectivamente. O FA foi menos eficiente, comparado com as Fases 1 e 2, mesmo assim o BAS apresentou desempenho melhor garantindo ao sistema a maior eficiência na redução da concentração de matéria orgânica com DBO média de $10 \pm 5 \text{ mg O}_2 \text{ L}^{-1}$.

Considerando-se as condições e os padrões de lançamento de efluentes em corpos d'água estabelecidos no Estado de São Paulo (Lei 997/76 – art.18) e em esfera federal (CONAMA 430/2011), não houve alteração no desempenho do sistema que continuou atendendo ambos os padrões de lançamento.

A variação na concentração de sólidos suspensos totais (SST) e voláteis (SSV) é apresentada nas Figuras 5.44 e 5.45.

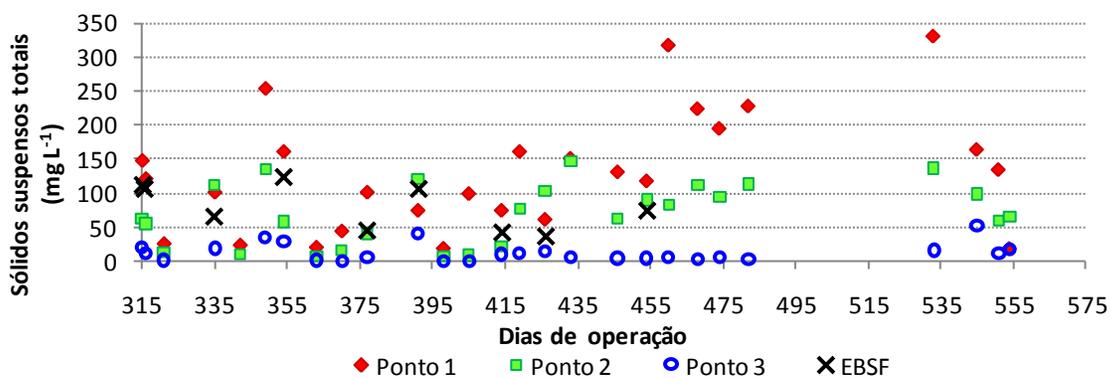


Figura 5.44: Variação da concentração de Sólidos suspensos totais nos pontos de amostragem do sistema – Fase 3.

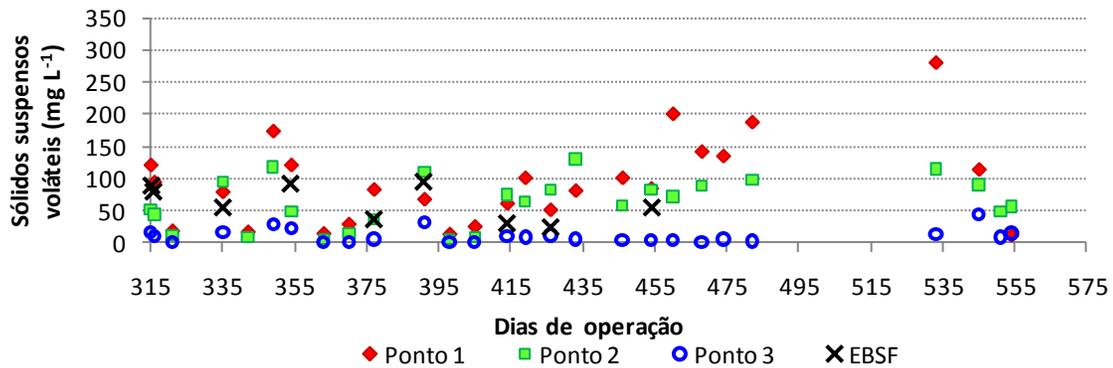


Figura 5.45: Variação da concentração de Sólidos suspensos voláteis nos pontos de amostragem do sistema – Fase 3.

As concentrações de sólidos suspensos totais e voláteis nos Pontos 1 e 2 foram bastante variáveis, porém mesmo nos picos, a concentração foi menor que as registradas na Fase 2. Devido a desestabilização observada, o FA não manteve o desempenho da fase anterior, no entanto o BAS foi capaz de assimilar esse aumento de sólidos reduzindo a concentração de saída do sistema.

D) Avaliação da série de Nitrogênio

O comportamento dos valores das concentrações de nitrogênio amoniacal, nitrito e nitrato estão representados nas Figuras 5.46, 5.47 e 5.48.

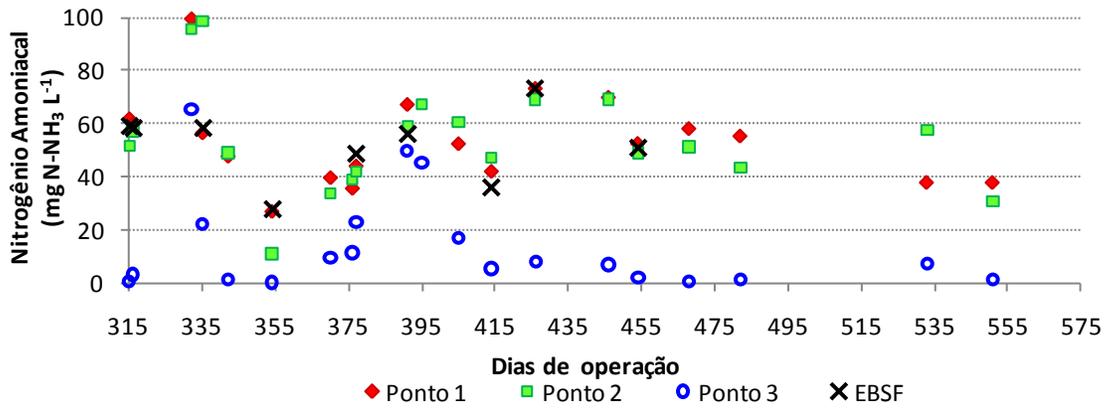


Figura 5.46: Concentração de nitrogênio amoniacal nos pontos de amostragem do sistema – Fase 3.

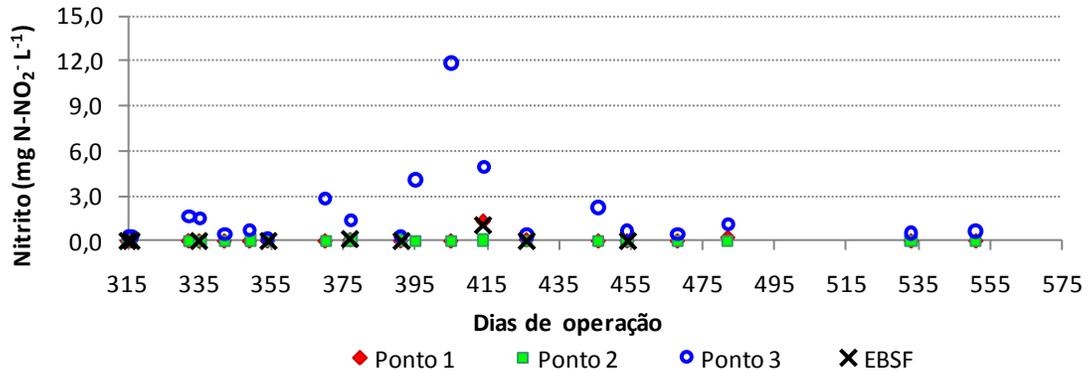


Figura 5.47: Concentração de nitrito nos pontos de amostragem do sistema – Fase 3.

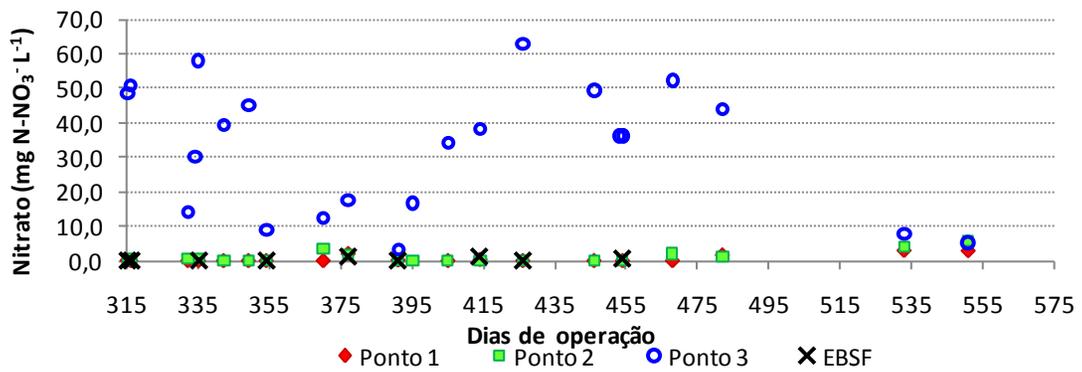


Figura 5.48: Concentração de nitrato nos pontos de amostragem do sistema – Fase 3.

O sistema apresentou o mesmo perfil de variação que o obtido para a concentração da alcalinidade parcial e total e assim, como na fase anterior, foram registradas elevadas concentrações de nitrogênio amoniacal no Ponto 1, sendo a máxima de 100,0 mg NH₃ L⁻¹.

O Ponto 3, devido a aeração insuficiente, registrou altas concentrações de nitrogênio amoniacal no início da Fase 3, no entanto após o 408º dia de operação, com a troca do compressor, a nitrificação voltou a ocorrer, consumindo o nitrogênio amoniacal e, conseqüentemente aumentando a concentração de nitrato.

5.1.4 Fase 4: concentração de 500 mg L⁻¹ de formaldeído

Na Fase 4, 500 mg L⁻¹ de formaldeído foram adicionados ao esgoto bruto, e sua duração foi de 79 dias.

Os valores das variáveis físicas e químicas avaliadas na Fase 4, referentes aos três pontos de amostragem e o esgoto bruto sem adição de formaldeído (EBSF) estão apresentados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 Valores médios obtidos para as variáveis físicas e químicas durante a Fase 4

VARIÁVEL	Ponto 1		Ponto 2		Ponto 3		EBSF	
	MED	DP	MED	DP	MED	DP	MED	DP
Temperatura (C°)	25	2	25	1	25	1	24	2
Condutividade Elétrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	1379	293	1375	266	1123	306	941	105
Dureza ($\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$)	66	6	72	6	69	5	69	7
OD (mg L^{-1})	1,1	0,4	0,5	0,2	4,6	1,1	0,9	0,5
pH	7,8	0,4	6,9	0,2	7,8	0,2	7,4	0,3
Formaldeído (mg HCHO L^{-1})	503,6	38,9	89,1	39,5	3,8	1,3	1,0	0,6
AOV (mg HAc L^{-1})	85	45	115	41	38	19	38	33
AP ($\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$)	302	84	270	81	242	110	178	25
AT ($\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$)	416	91	412	94	315	119	249	32
AI/AP	-	-	0,6	0,2	-	-	-	-
SST (mg L^{-1})	171	101	91	66	33	24	81	52
SSV (mg L^{-1})	130	82	78	65	29	21	65	46
SSF (mg L^{-1})	54	48	12	14	10	22	16	18
DQO ($\text{mg O}_2 \text{ L}^{-1}$)	1246	230	610	134	131	103	173	46
DBO ($\text{mg O}_2 \text{ L}^{-1}$)	640	100	298	147	16	4	NR	NR
NTK (mg L^{-1})	83	31	78	30	37	25	61	25
NH ₃ (mg L^{-1})	69	21	63	25	31	22	57	9
NO ₂ ⁻ (mg L^{-1})	<LQ (**)	<LQ (**)	<LQ (**)	<LQ (**)	0,7	0,2	<LQ (**)	<LQ (**)
NO ₃ ⁻ (mg L^{-1})	3,8	3,3	2,3	3,0	10,4	7,4	<LQ (***)	<LQ (***)

sendo: OD: Oxigênio dissolvido; AOV: Ácidos Orgânicos Voláteis; AP: Alcalinidade Parcial; AT: Alcalinidade Total; AI/AP: Relação Alcalinidade intermediária/ Alcalinidade parcial; SST: Sólidos Suspensos Totais; SSV: Sólidos Suspensos Voláteis; SST: Sólidos Suspensos Fixos; DQO: Demanda Química de Oxigênio; DBO: Demanda Bioquímica de Oxigênio; NTK: Nitrogênio Kjeldahl Total; NH₃: Nitrogênio Amoniacal; NO₂⁻: Nitrito; NO₃⁻: Nitrato

MED: média

DP: desvio padrão

(*) NR – Análise não realizada para este ponto de amostragem

(**) <LQ – Limite de Quantificação do método (LQ = 0,023 mg NO₂⁻ L⁻¹)

(***) <LQ – Limite de Quantificação do método (LQ = 0,026 mg NO₃⁻ L⁻¹)

As variáveis: temperatura, condutividade elétrica e dureza não se alteraram significativamente em relação às fases anteriores.

A concentração média de oxigênio dissolvido no Ponto 3 foi a menor registrada em todas as fases de estudo. Conforme está representado na Figura 5.49, a concentração mínima obtida foi de 2,4 mg O₂ L⁻¹, no 599º dia de operação, realizada no dia seguinte da troca do compressor de ar e adição do segundo compressor. Mesmo com o aumento da vazão de ar, a concentração de OD efluente

continuou baixa devido ao consumo da biomassa para a degradação e das bactérias autótrofas nitrificantes para a nitrificação.

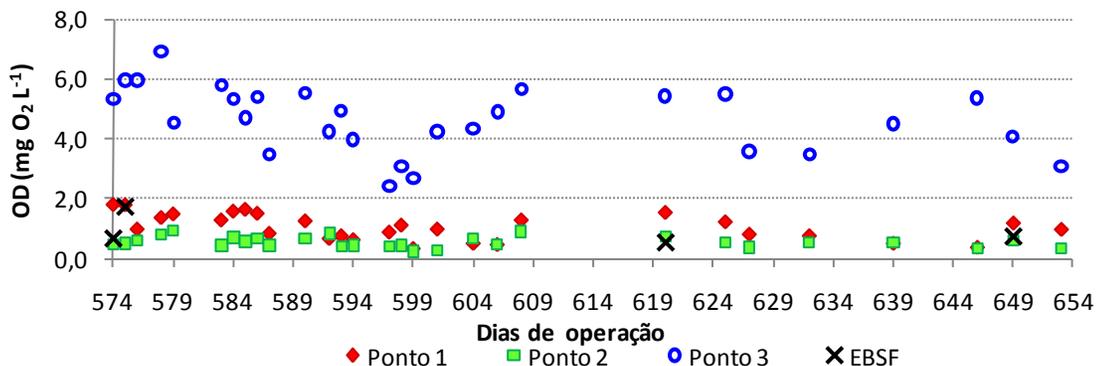


Figura 5.49: Concentrações de oxigênio dissolvido nos pontos de amostragem do sistema – Fase 4.

A) Avaliação da remoção do formaldeído

Os valores das concentrações e redução da concentração de formaldeído estão apresentados nas Figuras 5.50 e 5.51 respectivamente.

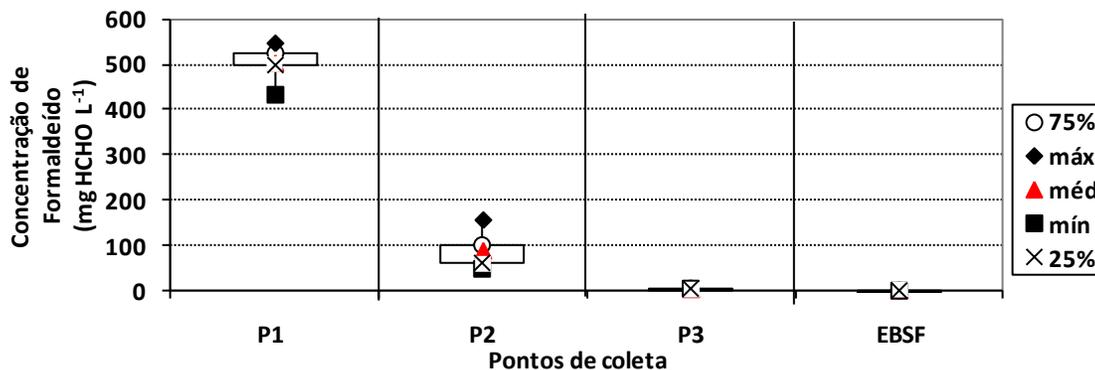
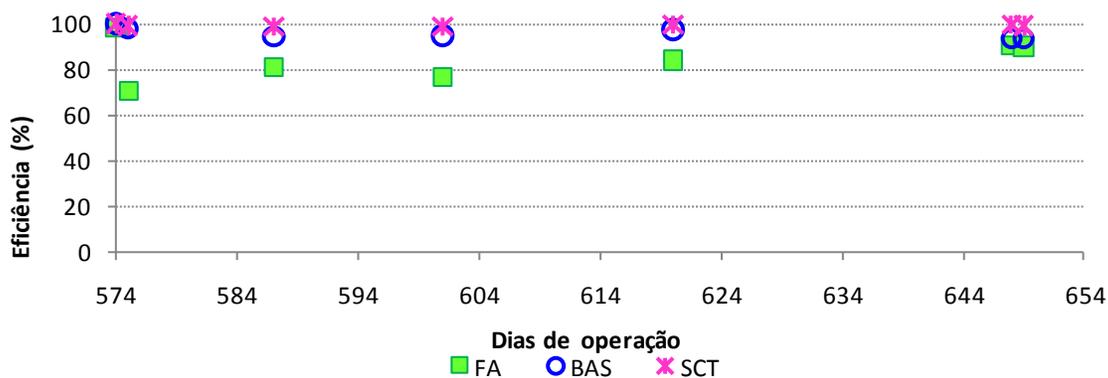


Figura 5.50: Concentração de formaldeído nos pontos de amostragem do sistema – Fase 4.

A concentração de formaldeído real média aplicada nesta fase, foi em média $503,6 \pm 38,9$ mg HCHO L⁻¹, valor bem próximo do teórico.

O aumento da concentração de formaldeído no esgoto afluente ao sistema, afetou o FA logo nas primeiras horas. Como pode ser verificado na Figura 5.51, o FA registrou queda na eficiência de redução da concentração de formaldeído, saindo de 98% para 70%, 16 horas após a mudança no valor da concentração de formaldeído. A eficiência do FA foi recuperando-se com a adaptação ao longo do tempo da biomassa, atingindo no final do período de monitoramento o valor de 90% de redução.

A concentração de formaldeído no Ponto 3 foi de $3,8 \pm 1,3 \text{ mg HCHO L}^{-1}$, considerada baixa em relação a concentração afluente aplicada, conferindo ao sistema um valor de 99,2% de eficiência na redução da concentração de formaldeído.



FA – Filtro Anaeróbio; BAS – Biofiltro Aeróbio Submerso; SCT – Sistema combinado de tratamento

Figura 5.51: Valores de eficiência na redução da concentração de formaldeído – Fase 4.

B) Avaliação das variáveis pH, alcalinidade e AOV

Nas Figuras 5.52, 5.53 e 5.54 podem ser verificados os comportamentos temporais das variações dos valores de pH, alcalinidade parcial e alcalinidade total, respectivamente, ao longo da Fase 4, nos pontos de amostragem do sistema.

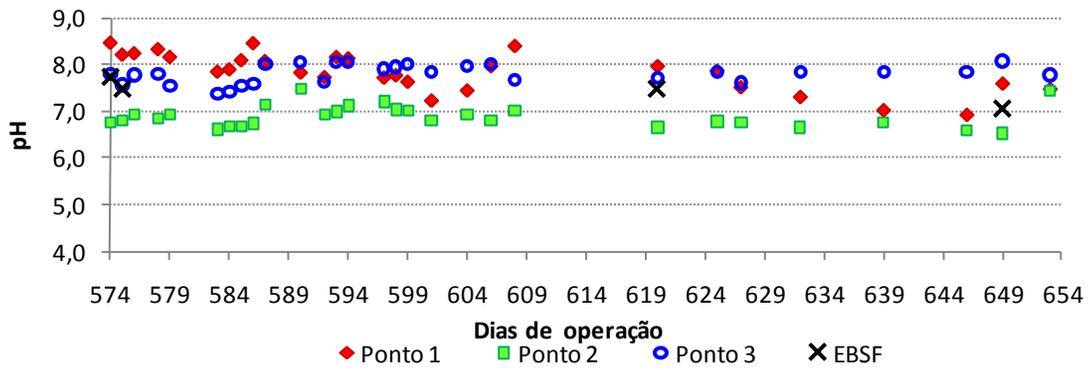


Figura 5.52: Valores de pH nos pontos de amostragem do sistema – Fase 4.

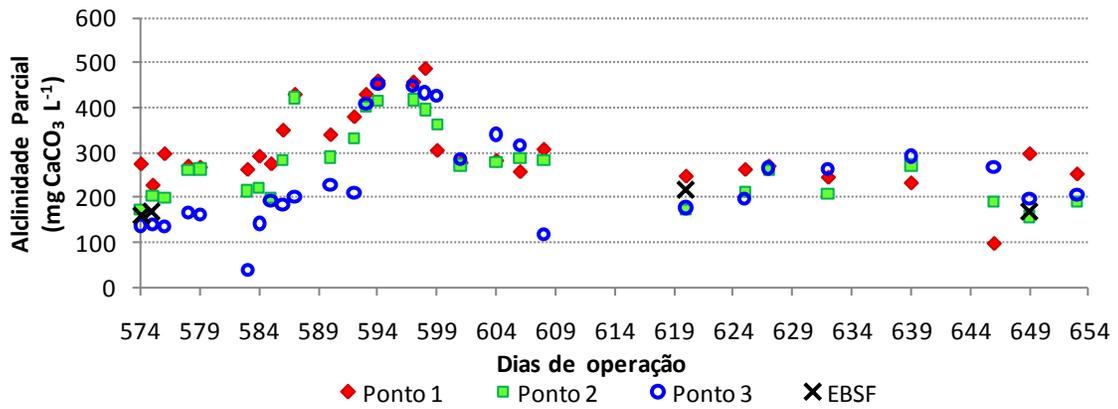


Figura 5.53: Variação da alcalinidade parcial nos pontos de amostragem do sistema – Fase 4.

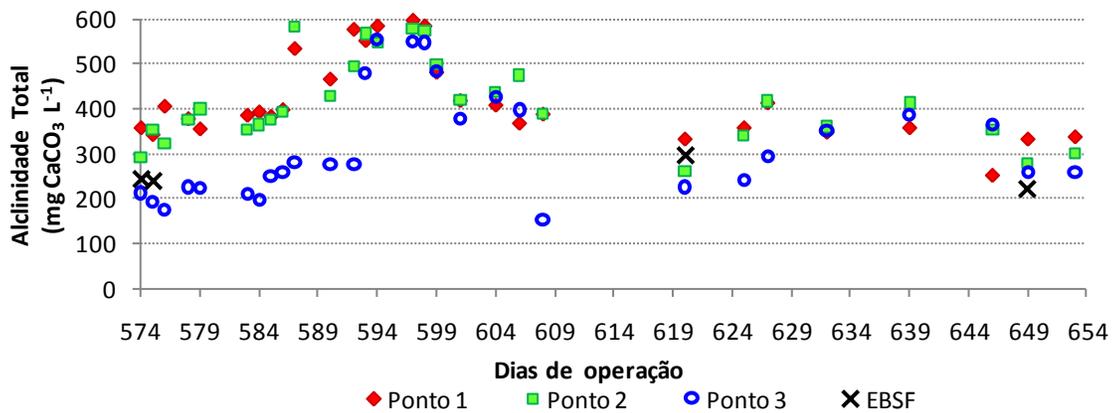


Figura 5.54: Variação da alcalinidade total nos pontos de amostragem do sistema – Fase 4.

Nas fases anteriores foi feita a adição de alcalinizante de forma a garantir, principalmente, condições suficientes para que ocorresse a nitrificação. Nesta fase o principal motivo para a adição do alcalinizante foi a necessidade de manter o pH do FA acima de 6,5, já que valores abaixo deste pode provocar a inibição da atividade microbiana anaeróbia, principalmente para as arqueas metanogênicas pois o acúmulo de ácidos no reator anaeróbio provocaria a redução dos valores de pH.

Este procedimento possibilitou que não ocorressem quedas abaixo de 6 no valor de pH para o efluente do Ponto 2. No entanto, foi registrado aumento no valor de pH para o efluente do Ponto 3, devido ao acúmulo de alcalinidade, observando-se concentrações acima de $200 \text{ mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$ comportamento decorrente do não consumo desses compostos no processo de nitrificação

Até o 609º observa-se nas Figuras 5.55 e 5.54, o choque inicial da troca de concentração afluente ao sistema, provocando o acúmulo da concentração de AP e AT que não é consumida pelas bactérias autótrofas nitrificantes fazendo com que ocorra aumento na alcalinidade no Ponto 3. Após esta data, a concentração reduz porém para todos os pontos ainda permanece elevada sem o consumo de alcalinidade no Ponto 3, indicando a inibição da nitrificação.

Este desequilíbrio da atividade da biomassa anaeróbio pode ser verificado na Figura 5.55, por meio da relação AI/AP. A elevada variação fez com que o FA se distanciasse ainda mais do valor considerado indicador de estabilidade e bom funcionamento, 0,3. A queda na eficiência de remoção de DQO foi uma consequência dessa instabilidade.

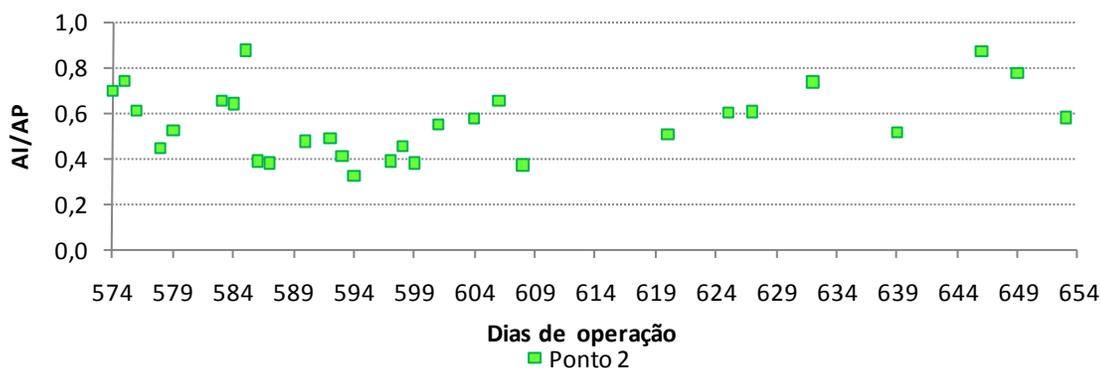


Figura 5.55: Relação AI/AP no Ponto 2 (FA) – Fase 4.

Os valores das concentrações de AOV apresentaram o mesmo comportamento dos de alcalinidade, no entanto a maior concentração de ácidos não passou de 200 mg HAc L⁻¹. Após o período de adaptação da biomassa, houve menor geração de ácidos nos pontos de amostragem.

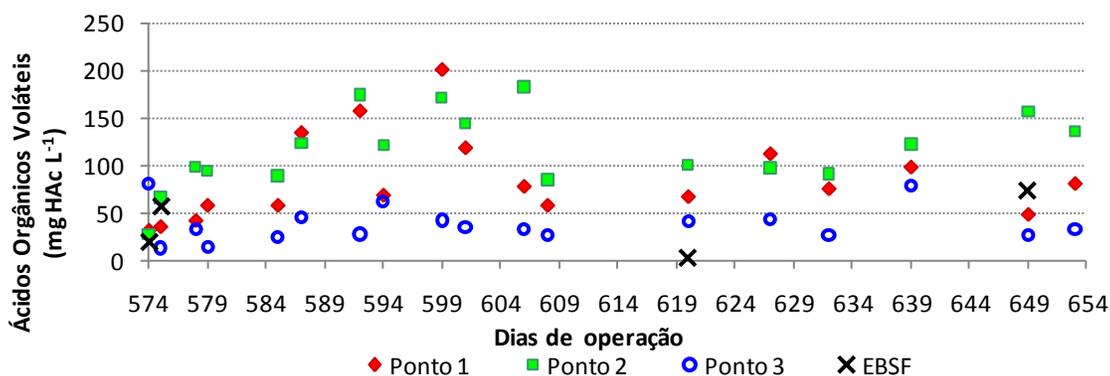


Figura 5.56: Variação da concentração de ácidos orgânicos voláteis nos pontos de amostragem do sistema – Fase 4.

C) Avaliação das variáveis DQO, DBO e sólidos

As variações nas concentrações de DQO bruta e filtrada ao longo da operação do sistema na Fase 4 estão representadas nas Figuras 5.57 e 5.58.

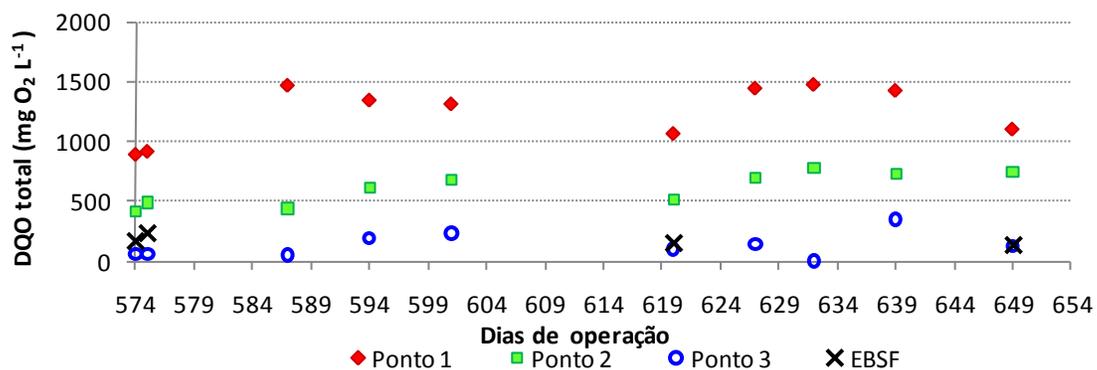


Figura 5.57: Variação do valor de DQO total nos pontos de amostragem do sistema – Fase 4.

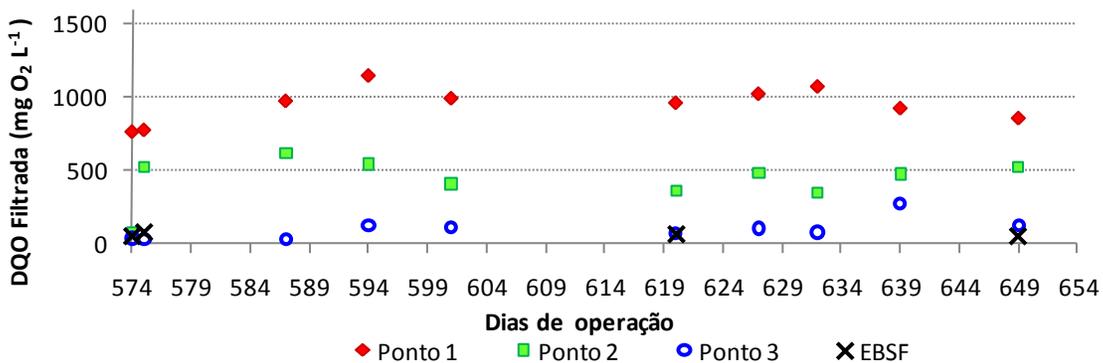
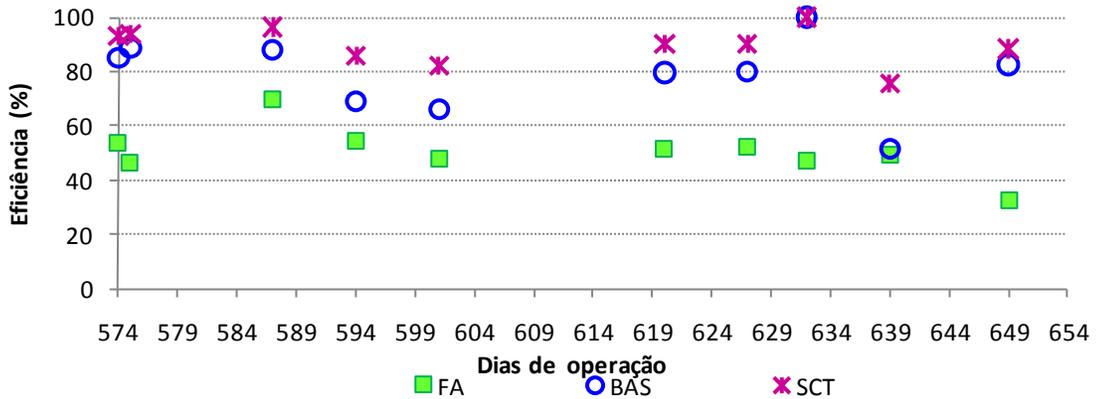


Figura 5.58: Variação do valor de DQO filtrada nos pontos de amostragem do sistema – Fase 4.

Assim como discutido nos itens anteriores o aumento da concentração de formaldeído, influenciou na concentração de DQO total da Fase 4, principalmente no Ponto 3.

O FA foi capaz de reduzir metade da concentração inicial de matéria orgânica expressa como DQO: $51 \pm 9\%$ de eficiência, mantendo-se 10 pontos percentuais menos eficiente que a Fase 3. Essa redução da eficiência do FA afetou o desempenho do BAS que também diminuiu a eficiência atingindo $79 \pm 9\%$, e mesmo com as variações observadas, o sistema ainda manteve a eficiência em 90%, como está representado na Figura 5.59, indicando a robustez do sistema combinado.



FA – Filtro Anaeróbio; BAS – Biofiltro Aeróbio Submerso; SCT – Sistema combinado de tratamento

Figura 5.59: Variação temporal da redução da concentração de DQO total - Fase 4.

Mesmo após o aumento da concentração de formaldeído no afluente bruto, o sistema manteve a eficiência global na redução da concentração de matéria orgânica. Os valores da redução da DBO no FA, BAS e sistema combinado foram de $55 \pm 16\%$, $94 \pm 1\%$ e $97,5 \pm 0,3\%$ respectivamente. O FA manteve a redução na eficiência, porém foi cerca de 10% menor em relação a Fase 3. O desempenho do BAS foi pouco afetado, visto que a eficiência média foi próxima a da fase anterior. Assim a concentração média da DBO na saída do sistema foi de $13 \pm 5 \text{ mg O}_2 \text{ L}^{-1}$.

Tanto a eficiência de redução de DBO como a concentração desta, atenderam aos limites das condições e dos padrões de lançamento de efluentes em corpos d'água estabelecidos no Estado de São Paulo (Lei 997/76 – art.18) e em esfera federal (CONAMA 430/2011).

Nas Figuras 5.60 e 5.61, podem ser verificadas as variações das concentrações de sólidos suspensos totais e voláteis na Fase 3.

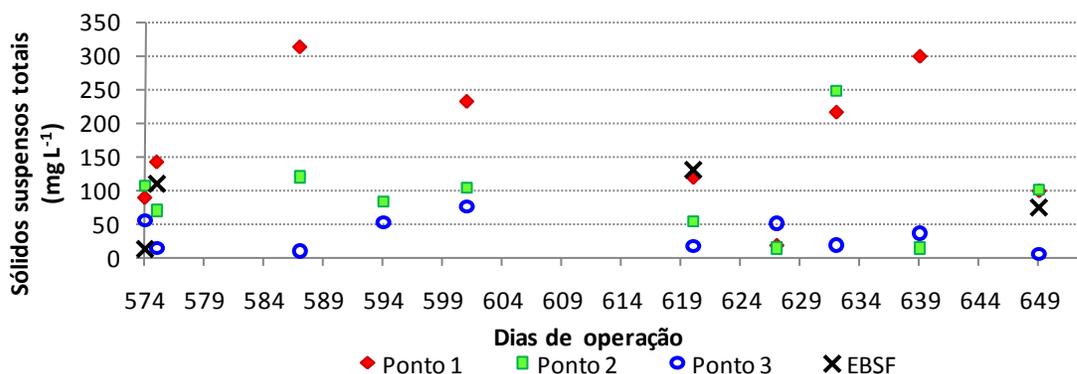


Figura 5.60: Variação da concentração de Sólidos suspensos totais nos pontos de amostragem do sistema – Fase 4.

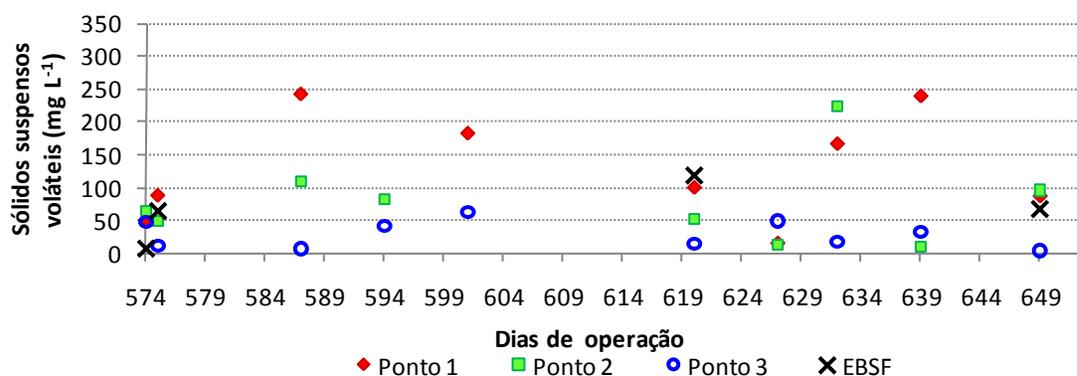


Figura 5.61: Variação da concentração de Sólidos suspensos voláteis nos pontos de amostragem do sistema – Fase 4.

O FA foi capaz de assimilar a concentração de sólidos afluente, no entanto esta concentração de formaldeído aplicada provocou aumento na concentração da biomassa do BAS e por isto houve a liberação de muito sólidos excedentes no decantador interferindo na qualidade do Ponto 3.

D) Avaliação da série de Nitrogênio

Os valores das concentrações de nitrogênio amoniacal, nitrito e nitrato estão representados nas Figuras 5.62, 5.63 e 5.64, respectivamente.

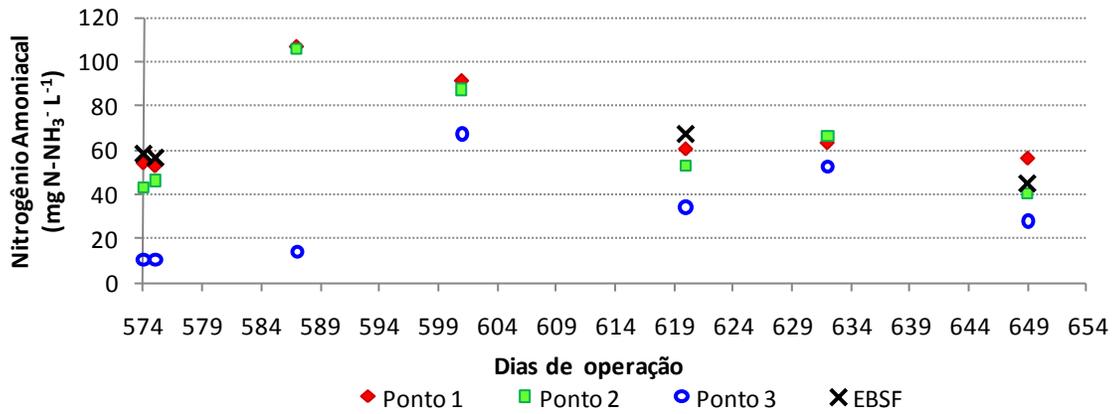


Figura 5.62: Concentração de nitrogênio amoniacal nos pontos de amostragem do sistema – Fase 4.

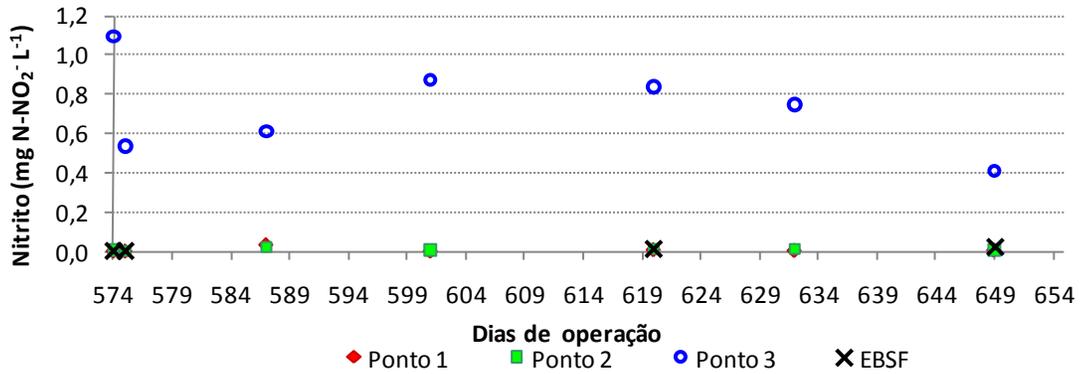


Figura 5.63: Concentração de nitrito nos pontos de amostragem do sistema – Fase 4.

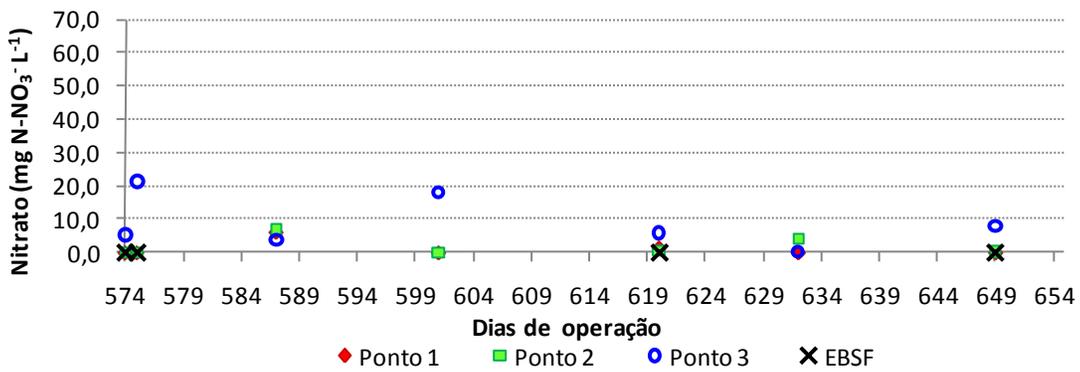


Figura 5.64: Concentração de nitrato nos pontos de amostragem do sistema – Fase 4.

As concentrações de nitrogênio amoniacal no Ponto 1, mantiveram-se elevadas, acima de $50,0 \text{ mg NH}_3 \text{ L}^{-1}$, assim como no Ponto 2 afluente do BAS, em média $63 \pm 25 \text{ mg NH}_3 \text{ L}^{-1}$. Houve aumento na concentração de nitrogênio amoniacal no Ponto 3 na média de $37 \pm 25 \text{ mg NH}_3 \text{ L}^{-1}$, e mesmo fazendo o uso de dois compressores, não foi suficiente para conversão do nitrogênio amoniacal. Devido a redução do consumo de nitrogênio amoniacal, pode ser observado que houve aumento na concentração de nitrito e redução na de nitrato. Com isso verifica-se que o aumento na concentração de formaldeído afluente do BAS, saída do FA, foi tóxico para as bactérias nitrificantes presentes no reator anaeróbio.

Este mesmo comportamento foi observado no trabalho de Batista (2007) e Castagnato (2006) operando o sistema, porém a partir da na concentração teórica de 400 mg L^{-1} de formaldeído, mostrando que o sistema nas condições estudadas neste trabalho, foi mais eficiente pois esse efeito foi mais intenso na Fase 4 cuja concentração teórica foi de 500 mg L^{-1} de formaldeído.

5.1.5 Índice Volumétrico de Lodo (IVL)

O Índice Volumétrico de Lodo (IVL) é uma metodologia que permite uma avaliação mais simplificada da sedimentabilidade do lodo (VON SPERLING, 1996).

O lodo utilizado foi o de arraste do efluente BAS decantado, cuja retirada deu-se pelo fundo do decantador (Ponto 4), para que não houvesse agitação do lodo. Neste trabalho foram realizadas as avaliações do IVL periódicas de os resultados podem ser observados na Tabela 5.5.

Tabela 5.5: Resultados de IVL obtidos em cada fase de operação

Fase	Dia de operação	IVL (mL g ⁻¹)	IVL Médio (mL g ⁻¹)	Sedimentabilidade
1	44	117	87 ± 31	Boa
	94	88		
	116	55		
2	172	898	327 ± 494	Péssima
	226	39		
	251	44		
	275	68		
3	324	62	285 ± 341	Ruim
	370	678		
	408	116		
	508	91		
	542	228		
4	586	398	301 ± 137	Péssima
	646	204		

As faixas de valores do IVL são de 0-50, 50-100, 100-200, 200-300 e >300 mL g⁻¹ que correspondem a sedimentabilidade ótima, boa, média, ruim e péssima, respectivamente, em lodos de sistema de lodos ativados (VON SPERLING, 1996).

Os resultados foram bastante variáveis, na Fase 1 os valores do IVL indicaram boa sedimentabilidade.

Na Fase 2, a primeira avaliação o IVL foi de 898 mL g⁻¹ indicando uma sedimentabilidade péssima. No entanto, esta análise foi realizada no período após o recesso de final de ano, e foi coletado o lodo que permaneceu por um longo tempo no decantador. Assim houve a concentração de sólidos interferindo no resultado da análise, classificando o lodo da Fase 2 como de péssima qualidade. Ao longo do monitoramento, o sistema a avaliação apresentou sedimentabilidade de ótima a boa e se desconsiderar a primeira análise com lodo antigo a média do IVL na Fase 2 passa a ser sedimentabilidade boa.

O IVL na Fase 3 indicou sedimentabilidade ruim como pode ser visto na Tabela 5.5, foram registrados dois valores altos, no correspondente ao 370^o dia de operação, foi devido ao sistema de aeração que apresentou sinais de queda na eficiência e o do 542^o dia de operação foi resultado da liberação de lodo que foi acumulado após a aplicação do esgoto da região do Hospital das Clínicas.

Os valores do IVL na Fase 4 significaram sedimentabilidade de péssimo a ruim, indicando melhora na sedimentabilidade no lodo. A baixa qualidade foi causada pelo arraste de biomassa do BAS observada após a aplicação da concentração de 500 mg L⁻¹ de formaldeído. Esse arraste é provavelmente o produto do aumento da biomassa presente no BAS, decorrente da disponibilidade de matéria orgânica no efluente do FA, tanto na forma de compostos orgânicos decorrentes da atividade microbológica como do residual de formaldeído ainda existente.

Em análise geral dos resultados obtidos do IVL, a sedimentabilidade do lodo no decantador foi classificada, de acordo com a média dos resultados, como ruim, porém por se tratar do lodo de arraste excedente do BAS, que trabalha sob aeração forçada e em tempo de detenção celular elevado, este lodo pode ser considerado como estabilizado, além de não ter afetado a qualidade do efluente após o decantador.

5.1.6 Microscopia da Biomassa Aeróbia

As análises microscópicas da biomassa do lodo de arraste do BAS retido no decantador, foram realizadas junto com as coletas destinadas a avaliação do IVL. Os reatores aeróbios de tratamento possuem população característica de microrganismos composta frequentemente por bactérias, fungos, algas, protozoários e micrometazoários.

As bactérias filamentosas estão presentes no interior dos flocos formando a macroestrutura e contribuem consumindo matéria orgânica e na sedimentação, porém, se em grande quantidade, torna o floco leve e o lodo de baixa qualidade. A

não filamentosa *Zooglea ramigera*, produz uma bainha gelatinosa envolvendo a matéria orgânica e outros microrganismos formadores de floco, em excesso forma flocos volumosos com má sedimentabilidade (FIGUEIREDO e DOMINGUES, 2000).

Os protozoários se alimentam de bactérias, outros protozoários e de matéria orgânica dissolvida e particulada. Dentre os ciliados podem ser fixos; livre natantes, se predominantes indicam deficiência de aeração, má depuração e sobrecarga orgânica; predadores de flocos, caracterizam reator com bom desempenho e se presente a *Aspidisca costata*, boa nitrificação. Há também flagelados, que se predominantes indicam: deficiência de aeração, má depuração e sobrecarga orgânica. Quanto a presença de amebas, existem aquelas que apresentam carapaça (Teca), por exemplo, a *Arcella* indicadora de boa depuração e nitrificação; ou aquelas nuas (sem carapaça) que caracterizam efluentes de difícil degradação (FIGUEIREDO e DOMINGUES, 2000).

Os micrometazoários são representados pelos anelídeos que se alimentam de algas, matéria orgânica e outros microrganismos e são indicadores de boa aeração. Os rotíferos se alimentam de partículas orgânicas em suspensão e indicam boa depuração. Os nematóides são resistentes a extremos de temperatura e a baixa concentração de OD e se alimentam de matéria particulado e microrganismos, indicam lodo antigo e baixa depuração. Os tardígrados caracterizam efluente sem toxicidade, excelentes condições de degradabilidade, alta concentração de oxigênio dissolvido e baixa DBO (FIGUEIREDO e DOMINGUES, 2000).

Na Fase 1 foi observado a microfauna com grande diversidade de espécies, como protozoários do grupo dos ciliados (Figura 5.66) flagelados, amebas nuas – *Mayorella* e com teca (carapaça) *Arcella*, *Euglypha* e *Diffugia*, algumas destas podem ser encontradas na (Figura 5.65); micrometazoários do grupo dos rotíferos, nematóide – *Rhabditis* (Figura 5.66), anelídeos - *Aeolosoma* em grande quantidade, principalmente quando a oxigenação do BAS foi ótima para o sistema. Do grupo dos tardígrados o *Macrobotus* (Figura 5.67) foi encontrado em pequena quantidade sendo que os observados estavam mortos junto aos flocos do lodo. As bactérias filamentosas estiveram presentes, mas não em excesso. No 116º dia de operação,

quando o sistema se mostrava mais estabilizado foi observada a presença do ciliado *Aspidisca*, predador de floco e indicador de boa nitrificação do sistema aeróbio e também a o ciliado fixo *Vorticella*. A diversidade da microfauna indicou que nesta fase o sistema estava com bom desempenho, principalmente na nitrificação devido à presença de protozoários predadores de flocos.

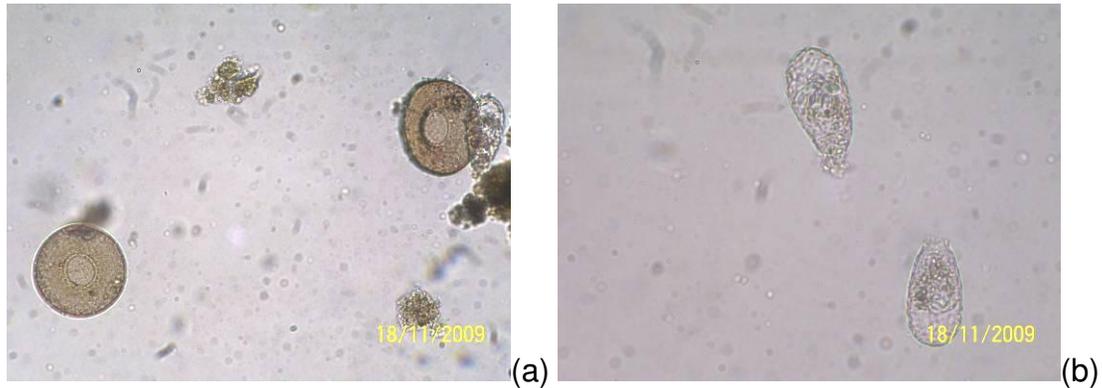


Figura 5.65: Fotos de microscopia óptica com aumento de 10X: (a) Amebas com teca - *Arcella*; (b) Amebas com teca – *Euglypha*.

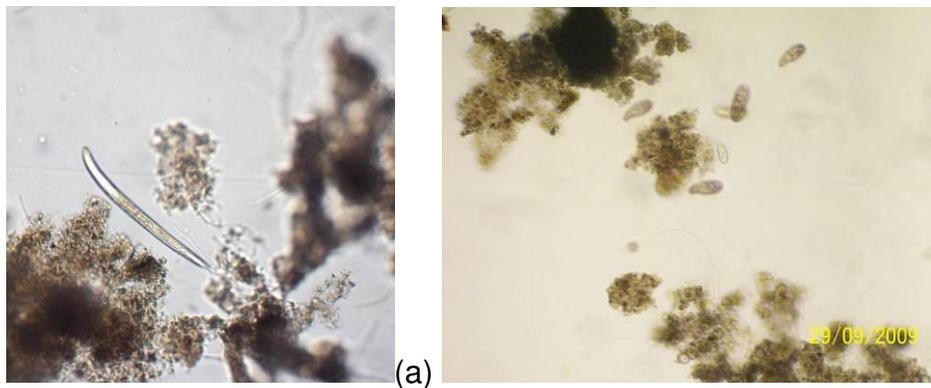


Figura 5.66: Fotos de microscopia óptica com aumento de 10X: (a) Nematóide - *Rhabditis*; (b) ciliados.

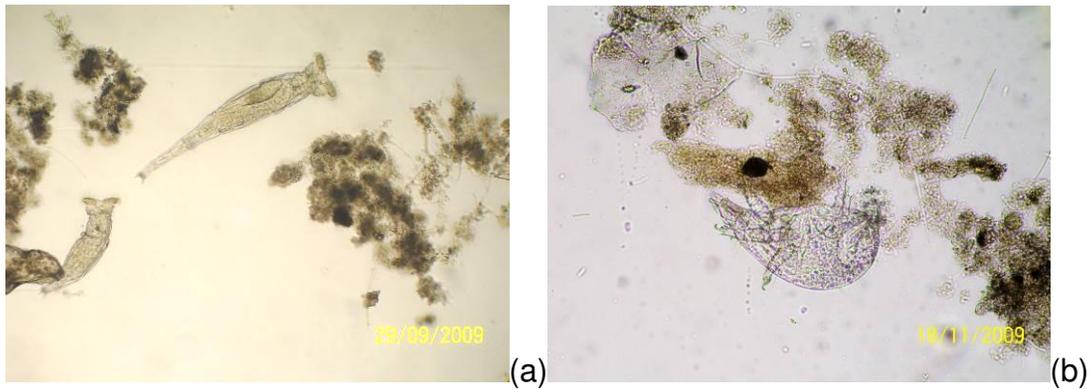


Figura 5.67: Fotos de microscopia óptica com aumento de 10X: (a) Floco bacteriano com rotíferos; (b) Micrometazoário do grupo dos tardígrados.

Na Fase 2 a microfauna apresentou redução na diversidade de espécies, como observado para o grupo das amebas, onde o número de amebas com teca encontradas foi menor. Dos organismos citados anteriormente foram observados a presença de *Aspidisca*, protozoários ciliados, flagelados (Figura 5.68) e fixo – *Vorticella*, e micrometazoários do grupo dos rotíferos, anelídeos (*Aeolosoma*) em grande quantidade (Figura 5.68), e *Macrobotus* mortos junto aos flocos do lodo. As bactérias filamentosas estiveram presentes mas não em excesso. No 275º dia de operação, houve queda na concentração de oxigênio dissolvido e também foi indicado pela redução da quantidade do organismo *Aeolosoma* durante a observada na visualização de uma amostra no microscópio. Mesmo com redução na diversidade, a presença destes organismos indica bom desempenho do sistema.

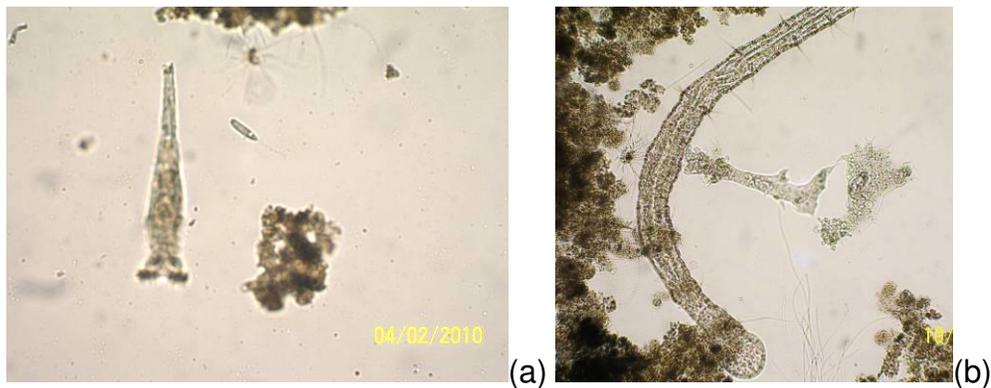


Figura 5.68: Fotos de microscopia óptica com aumento de 10X: (a) Rotífero e protozoário flagelado; (b) Micrometazoário do grupo dos anelídeos e ameba nua.

A Fase 3 caracterizou-se por apresentar inicialmente rotíferos, ciliados livres em grande quantidade, amebas nuas e com teca (*Arcella*), poucos anelídeos e tardígrados. Ao longo do período de estudo, devido à etapa de adaptação do sistema observou-se que o meio tornou-se mais seletivo com a redução da população de rotíferos grandes e a predominância dos menores (Figura 5.69), amebas, anelídeos e a grande quantidade de ciliados livres, fixos (*Vorticella*), *Zooglea* e filamentos, indicando que o sistema estava pouco eficiente, com choque de carga e com aeração deficiente. Com a estabilização do sistema houve um aumento da população de rotíferos, amebas nuas e anelídeos, os ciliados livre continuaram em grande quantidade e foi observado a presença de *Aspidisca* em pequeno número, assim o sistema mostrou-se eficiente novamente com boa capacidade de aeração.

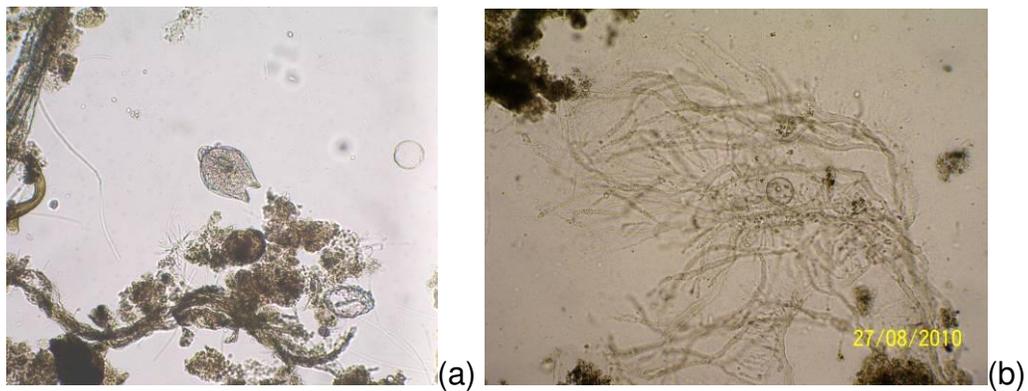


Figura 5.69: Fotos de microscopia óptica com aumento de 10X: (a) Rotífero; (b) Zooglea.

Na Fase 4, o lodo apresentou inicialmente rotíferos, ciliados livres e fixos e anelídeos em grande quantidade e atividade. Posteriormente foi observada baixa diversidade na microfauna, com poucos rotíferos, *Aeolosoma*, muitos ciliados grandes (Figura 5.70), *Vorticella* (Figura 5.70), *Aspidisca*, *Zooglea* e bactérias espiraladas (Figura 5.70). Nesta fase o sistema desestabilizou-se, fato relacionado a observação da presença de ciliados grandes indicando a entrada de efluente com concentração acima da usual e aeração deficiente, comprovando os resultados do monitoramento das variáveis físicas e químicas.

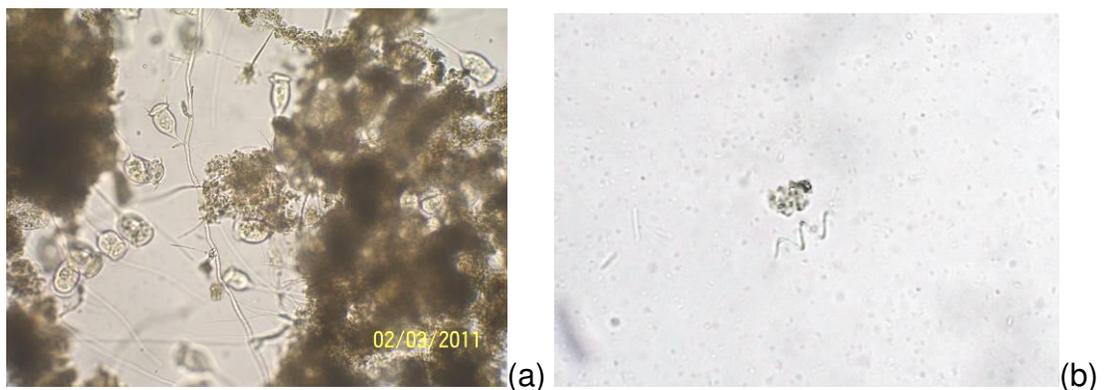


Figura 5.70: Fotos de microscopia óptica com aumento de 10X: (a) *Vorticella*; (b) Bactéria espiralada.

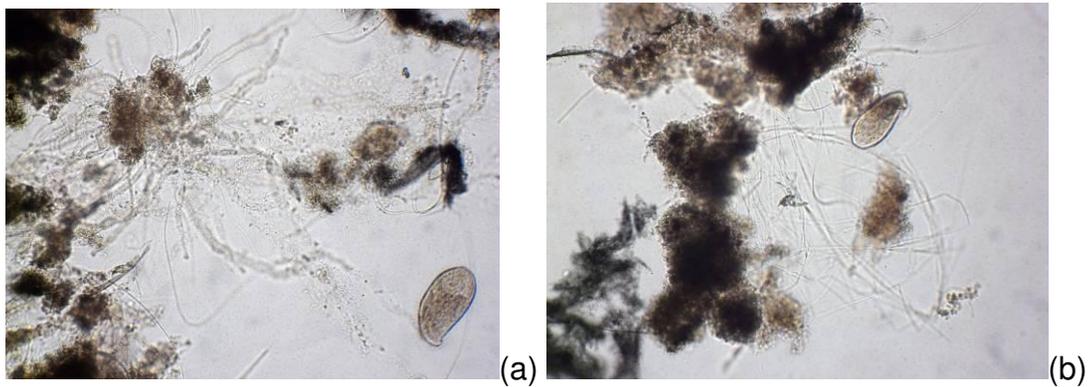


Figura 5.71: Fotos de microscopia óptica com aumento de 10X: (a) Zooglea e ciliado grande; (b) Filamentos e ciliado grande.

Dentre os organismos que estiveram sempre presentes, os ciliados foram os menos afetados tanto os livres quanto os fixos.

5.1.7 Avaliação geral do desempenho do sistema combinado

O sistema combinado de tratamento apresentou bons resultados ao longo do monitoramento em cada fase do trabalho. Para uma análise geral dos resultados obtidos em cada fase de estudo, serão representados na Tabela 5.6 os valores finais de cada fase de operação para algumas variáveis físicas e químicas e as eficiências de remoção da concentração de formaldeído, DQO e DBO.

Tabela 5.6: Valores finais do efluente do sistema

VARIÁVEL	Fase 1 (100 mg L ⁻¹)*		Fase 2 (200 mg L ⁻¹)*		Fase 3 (400 mg L ⁻¹)*		Fase 4 (500 mg L ⁻¹)*	
	MED	DP	MED	DP	MED	DP	MED	DP
OD (mg L ⁻¹)	6,0	0,7	6,1	0,7	5,6	1,1	4,6	1,1
pH	7,2	0,5	7,3	0,3	7,4	0,3	7,8	0,2
Formaldeído (mg HCHO L ⁻¹)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,7	1,3	3,8	1,3
Eficiência na redução de Formaldeído (%)	99,9	0,1	100,0	0,1	99,8	0,3	99,2	0,3
Eficiência na redução de DQO (%)	86	8	93	4	93	7	90	7
Eficiência na redução de DBO (%)	96,5	1,8	97,0	2,4	98,5	0,8	97,5	0,3
NH ₃ (mg L ⁻¹)	15	19	3	4	14	19	31	22
NO ₂ ⁻ (mg L ⁻¹)	1,6	3,1	0,4	0,3	1,8	2,7	0,7	0,2
NO ₃ ⁻ (mg L ⁻¹)	29,0	16,7	38,9	9,8	32,4	18,6	10,4	7,4

Sendo: (*): Concentração nominal de formaldeído

As Fases 1 e 2 obtiveram resultados muito semelhantes em relação ao OD, a partir da Fase 3 começou a diminuir a concentração e na Fase 4 a média obtida foi de 4,6 mg O₂ L⁻¹, concentração maior que a indicada para a biomassa aeróbia em sistemas de lodos ativados (VON SPERLING, 2002), no entanto foi observado que a difusão do ar proporcionada pelo compressor de ar também era importante, e a queda na concentração de OD se reflete na difusão, e com isso a redução do OD.

O pH manteve-se estável em todas as fases devido principalmente a adição de alcalinizante Na₂CO₃ mantendo o pH em torno de 7.

O formaldeído só começou a ser detectado em concentrações maiores na Fase 3 e na Fase 4 chegando a quase 4,0 mg HCHO L⁻¹. Mesmo assim o sistema não alterou significativamente a eficiência na redução da concentração de formaldeído, mantendo o bom desempenho. Comparando com os trabalhos de Batista (2007) e Castagnato (2006), a concentração de formaldeído no efluente foi menor e o sistema mostrou melhor eficiência.

A eficiência na redução da concentração de DQO foi crescente, indicando que o sistema assimilou a carga orgânica aplicada ao tratamento e também a crescente concentração de formaldeído. Na Fase 4, o aumento de 100 mg HCHO L⁻¹ tornou o afluente bruto mais tóxico para a biomassa, tanto anaeróbia quanto aeróbia e isto foi refletido na redução da eficiência para 90%. O mesmo comportamento foi observado para a DBO e mesmo apresentando eficiência final de 97,5% se manteve acima do limite estabelecido para o lançamento de efluentes da legislação federal (CONAMA 430/2011) e estadual (Lei 997/76 – art.18) que é de 60%.

As bactérias autotróficas que realizam a nitrificação, apresentaram elevada sensibilidade frente às condições adversas observadas ao longo do estudo como baixa concentração de OD, alcalinidade insuficiente e principalmente à toxicidade ao formaldeído. Os melhores desempenhos obtidos pelas bactérias autotróficas na nitrificação ocorreram nas Fase 2 e 3, devido ao eficiente suprimento de oxigênio dissolvido e alcalinidade e também as baixas concentrações de formaldeído na entrada do BAS. Na Fase 4, o aumento da concentração de formaldeído no efluente do FA, afluente do BAS, foi tóxico para as bactérias autotróficas, visto que a concentração de nitrito foi baixa, assim como o consumo de nitrogênio amoniacal para a nitrificação.

Considerando-se a concentração máxima de nitrogênio amoniacal estabelecida pela legislação federal (CONAMA 430/2011) para o lançamento de efluentes, os valores médios da concentração de nitrogênio amoniacal nas Fases 1, 2 e 3 se enquadram na legislação, estando abaixo do valor máximo recomendado de 20 mg NH₃ L⁻¹. Na Fase 4 este limite foi ultrapassado sendo necessário operar o sistema por um tempo maior, a fim de permitir a adaptação da biomassa para verificar se o sistema será capaz de recuperar a atividade das bactérias autótrofas nitrificantes na conversão do nitrogênio amoniacal em nitrito e nitrato.

Comparando o sistema operando nestas características com os trabalhos de Batista (2007) e Castagnato (2006), neste trabalho o sistema mostrou melhor eficiência, que pode ser associado a maior estabilidade devido ao maior tempo de operação tratando formaldeído em diversas concentrações; ao esgoto bruto

coletado, já que o esgoto da FEAGRI é um esgoto menos concentrado em termos de matéria orgânica e em relação à DQO; e a metodologia de análise do formaldeído, foi mais sensível, com menor limite de detecção e assim foi possível quantificar o formaldeído em concentrações até 0,009 mg HCHO L⁻¹.

O sistema como um todo foi eficiente, no entanto não foi possível verificar a estabilização da adaptação do sistema na Fase 4 devido ao pouco período de estudo.

5.2 Testes de toxicidade

Com o objetivo de se obter valores válidos das concentrações efetivas e/ou letais, foram realizados cinco ensaios para tipo de organismo. Conforme item 4.4, para todo ensaio de toxicidade foram preparadas soluções-teste das amostras do sistema e, foram avaliadas as variáveis físicas e químicas.

O controle negativo realizado com esgoto bruto sem adição de formaldeído, não apresentou toxicidade para nenhum organismo em todo período de estudo. Com isso foi possível comprovar que o esgoto bruto não contribuiu para a toxicidade obtida nos testes.

Os resultados dos testes de sensibilidade avaliando a toxicidade aguda com a substância de referência NaCl para os organismos-teste estudados foram: CI50/96h de $2,0 \pm 1,4$ mg L⁻¹ para *P. subcapitata* (média de 2 testes); CE50/48h de $2,5 \pm 0,4$ mg L⁻¹ para *D. similis* (média de 11 testes); CL50/96h de $11,4 \pm 0,7$ mg L⁻¹ para *P. reticulata* (média de 2 testes) e CL 50/96h de $5,7 \pm 0,5$ mg L⁻¹ para *G. tigrina* (média de 5 testes).

A seguir serão apresentados os resultados das variáveis físicas e químicas e ensaios toxicológicos para cada organismo estudado em cada uma das fases de estudo.

5.2.1 Fase 1: concentração de 100 mg L⁻¹ de formaldeído

A) *Pseudokirchneriella subcapitata*

Os indivíduos foram expostos a concentrações crescentes do efluente bruto contendo formaldeído (Ponto 1), efluente tratado pelo filtro anaeróbico (Ponto 2) e do efluente tratado pelo sistema (Ponto 3). Esses valores eram dependentes das características do esgoto bruto ao sistema, podendo variar entre uma coleta e outra.

As variáveis físicas e químicas (pH, OD, condutividade elétrica, temperatura e concentração de formaldeído) das soluções-teste foram avaliadas e estão representadas nas Figuras 5.72 a 5.76. Os indicadores “ini” e “fim” referem-se as soluções-testes avaliadas no início e final dos ensaios de toxicidade, tanto para os pontos P1, P2 e P3, referentes aos pontos de amostragem do sistema combinado, quanto para o controle (C) e o branco com esgoto bruto sem adição de formaldeído (CESF).

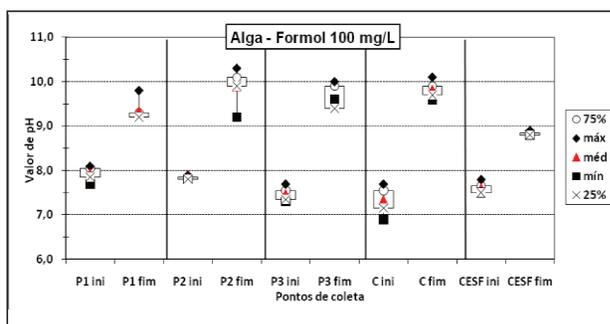


Figura 5.72: Valor do pH, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.

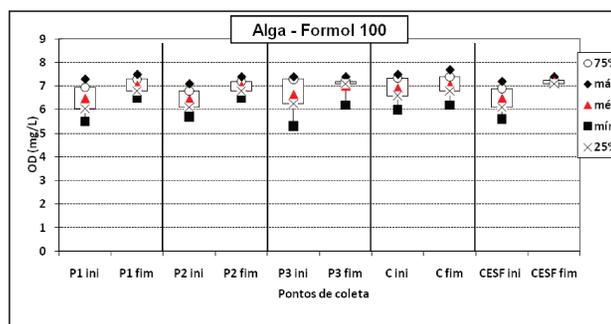


Figura 5.73: Concentração de OD, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.

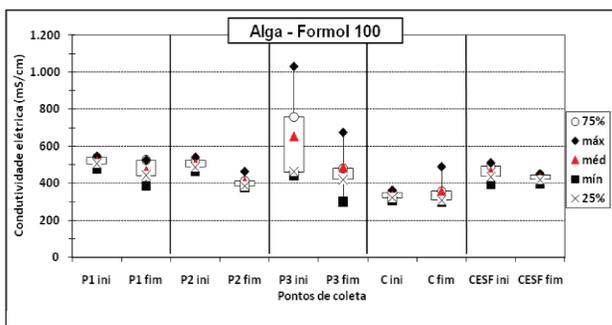


Figura 5.74: Condutividade elétrica, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.

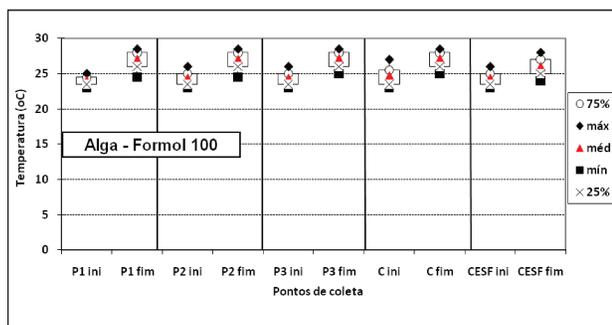


Figura 5.75: Valor da Temperatura, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.

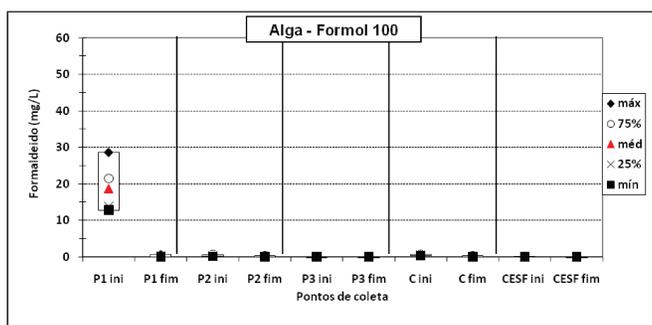


Figura 5.76: Concentração de Formaldeído, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.

O valor de pH apresentou maior variação entre o início e o final do teste visto que houve aumento do mesmo. No entanto esta variação pode ter ocorrido devido ao desenvolvimento das algas, já que também foi observado aumento do pH no controle, indicando que não ocorreu toxicidade em relação ao pH.

Os resultados dos testes de toxicidade serão apresentados nas Figuras 5.77 a 5.79, em gráficos de barras indicando no eixo X (das abscissas) as concentrações das soluções-teste. Nos gráficos dos testes de algas o eixo X está indicando o controle, já que os cálculos são feitos com base na inibição do crescimento em relação ao controle. Os valores positivos indicam a inibição do crescimento em relação ao controle e os negativos a não inibição, ou seja, o crescimento da biomassa algácea acima do controle.

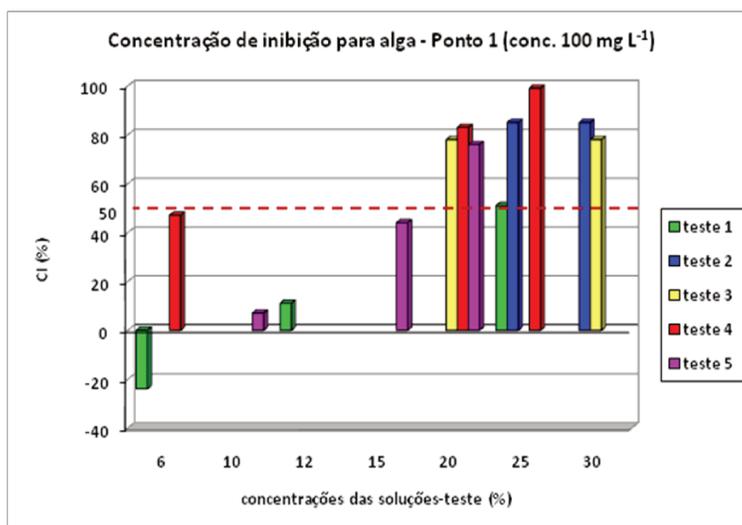


Figura 5.77: Concentração de inibição do Ponto 1 a 50% dos organismos, obtida nos ensaios utilizando *P. subcapitata* durante 96 h de exposição, a cada 20 dias na Fase 1.

Os resultados de inibição obtidos no Ponto 1 (Figura 5.77) não foram constantes. O valor mais próximo da CI₅₀/96h foi obtido no primeiro teste na diluição de 25%, apresentando inibição de 51% no crescimento. Porém, de acordo com as análises realizadas, foi verificado que a concentração real de formaldeído presente no Ponto 1 foi de 61 mg L⁻¹, abaixo da concentração teórica aplicada. Com base nos testes seguintes é possível dizer que o esgoto bruto contendo formaldeído a 100 mg L⁻¹ em concentrações acima de 20% causa toxicidade a *P. subcapitata* observada pela inibição do crescimento superior à CI₅₀.

Em concentrações abaixo de 6% não houve inibição do crescimento algáceo e o aumento de biomassa foi 20% maior que o controle, sendo que nesta diluição a concentração de formaldeído foi baixa, não causando, portanto toxicidade a *P. subcapitata*.

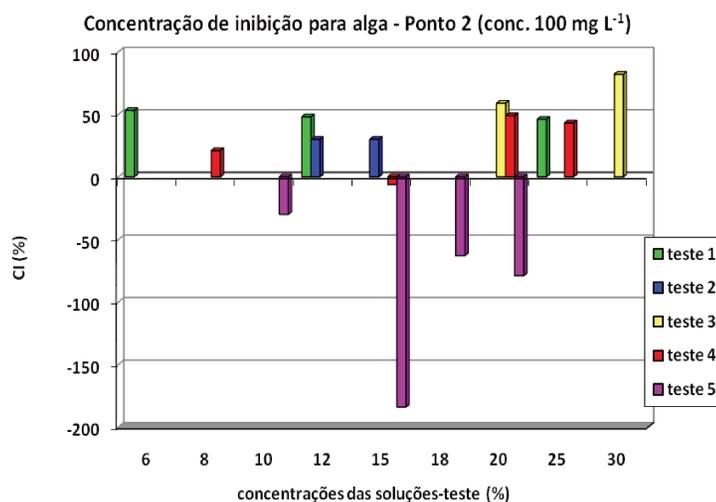


Figura 5.78: Concentração de inibição do Ponto 2 a 50% dos organismos, obtida nos ensaios utilizando *P. subcapitata* durante 96 h de exposição, a cada 20 dias na Fase 1.

A inibição do crescimento no Ponto 2, Figura 5.78, também foi variável. Inicialmente, as amostras do Ponto 2 apresentaram elevada toxicidade, observada pela inibição do crescimento maior que 50% no teste 1 (concentração de 6%). Ao longo do monitoramento no teste 3, as concentrações aplicadas causaram a inibição do crescimento e por fim, no último teste, foi observada não apenas ausência de inibição, mas crescimento algáceo acima do registrado para o controle. Esta variação na resposta pode ser causada devida a adaptação da biomassa do FA no tratamento do formaldeído e também às diferenças de características dos lotes de esgoto bruto.

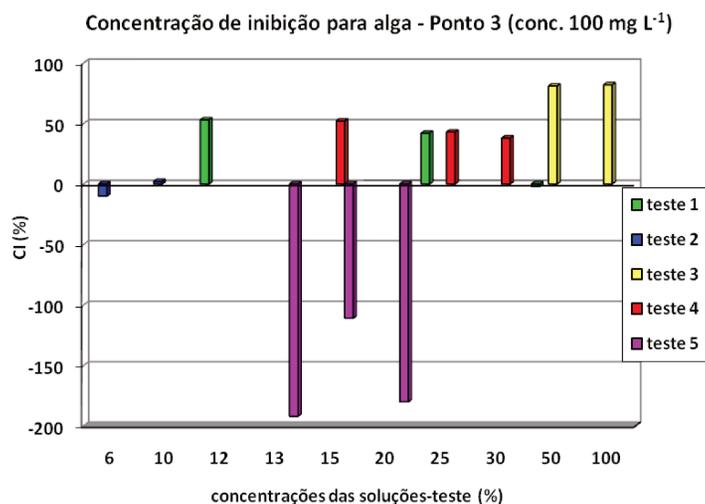


Figura 5.79: Concentração de inibição do Ponto 3 a 50% dos organismos, obtida nos ensaios utilizando *P. subcapitata* durante 96 h de exposição, a cada 20 dias na Fase 1.

Assim como ocorreu com o Ponto 2, também houve variações nos testes com o Ponto 3, Figura 5.79. Apesar de ter ocorrido inibição acima de 50% no Teste 1 – 12% e Teste 4 – 15%, nas soluções-teste acima desta não ocorreu toxicidade aguda que atingisse a CI50, a não ser no Teste 3, no qual ocorreu inibição do crescimento nas diluições 50% e 100% (amostra do ponto 3 sem diluição).

O Ponto 3 também apresentou condições favoráveis para *P. subcapitata*, onde foi observado crescimento considerável em relação ao controle. Uma das possíveis causas é a eficiência na nitrificação, pois pelos dados do monitoramento do sistema, houve a conversão de altas concentrações de nitrogênio amoniacal em nitrato. Como este é nutriente para os vegetais, pode ter favorecido ou estimulado o crescimento das algas.

Estas variações nas respostas obtidas podem ser provenientes de diversas fontes, como o próprio esgoto bruto, pela variabilidade na concentração de matéria orgânica presente e nutrientes, e a eficiência do sistema na remoção de substâncias tóxicas aos organismos vivos, como a amônia.

Com isto, foi possível verificar que os testes com algas, além de indicarem redução da toxicidade do formaldeído no sistema, também podem ser úteis na

avaliação da qualidade do efluente em relação a presença de nutrientes gerados na degradação.

B) *Daphnia similis*

Os indivíduos foram expostos a diversas concentrações do efluente bruto contendo formaldeído (Ponto 1), do efluente tratado pelo filtro anaeróbio (Ponto 2) e do efluente tratado pelo sistema (Ponto 3). Esses valores eram dependentes das características do esgoto bruto ao sistema, podendo variar entre uma coleta e outra.

Os resultados do monitoramento das variáveis físicas e químicas obtidos para as soluções-teste e controles estão demonstrados nas Figuras 5.80 a 5.85.

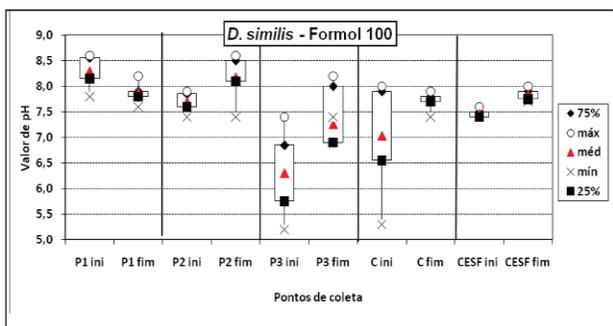


Figura 5.80: Valor do pH, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.

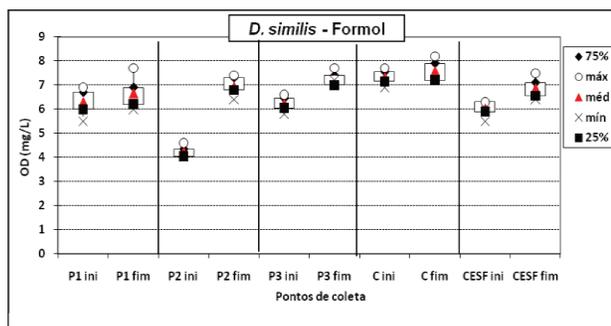


Figura 5.81: Concentração de OD, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.

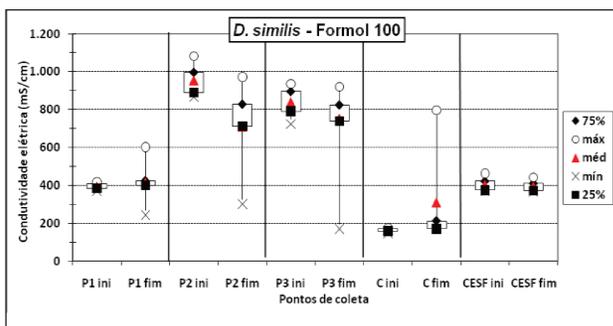


Figura 5.82: Condutividade elétrica, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.

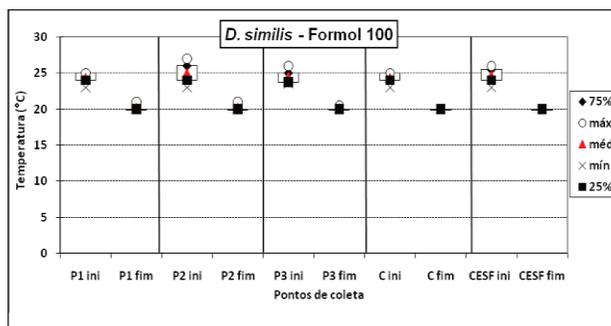


Figura 5.83: Valor da Temperatura, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.

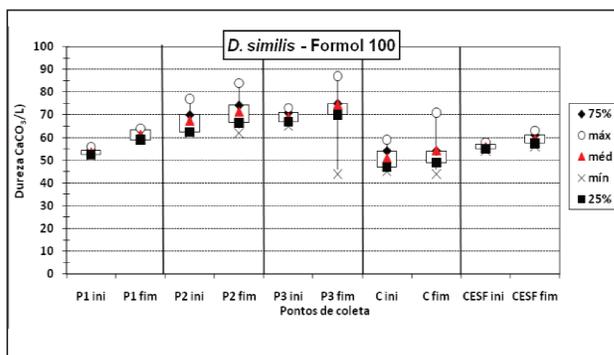


Figura 5.84: Concentração da Dureza, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.

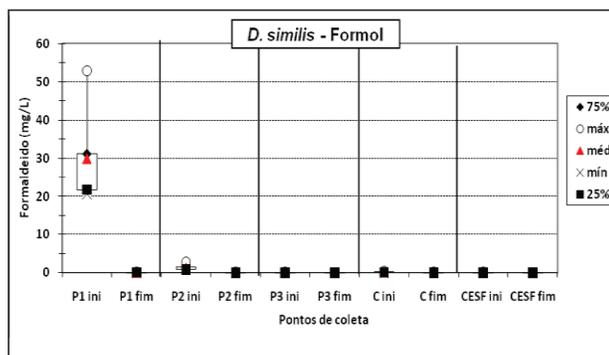


Figura 5.85: Concentração do Formaldeído, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.

A concentração de formaldeído no Ponto 1 variou de 61,14 a 96,20 mg L⁻¹, 2,5 a 12,63 mg L⁻¹ no Ponto 2 e <0,009 a 0,14 mg L⁻¹ no Ponto 3. O limite de detecção de formaldeído no método utilizado é de 0,009 mg L⁻¹, por isto o valor mínimo encontrado para o Ponto 3 foi considerado inferior à este limite.

Os resultados dos testes de toxicidade foram indicados nos gráficos contendo o valor da CE50/48h a amplitude de variação por meio dos valores máximos e mínimos do intervalo de confiança indicado pelo método Trimmed Spearman Karber. A CE50/48h para Ponto 1 e Ponto 2 estão representadas Figura 5.86 e 5.87.

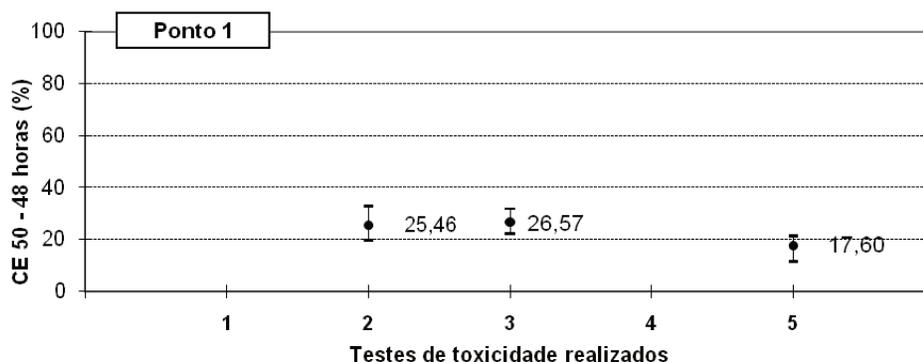


Figura 5.86: Concentração efetiva do Ponto 1 a 50% dos organismos, obtida nos ensaios utilizando *Daphnia similis* durante 96 h de exposição, a cada 20 dias na Fase 1.

Foram obtidos três resultados válidos para o Ponto 1. O fomaldeído com esgoto bruto na concentração de 100 mg L⁻¹ causou imobilidade a 50% dos organismos-teste em concentrações menores que 30%, mostrando elevada toxicidade.

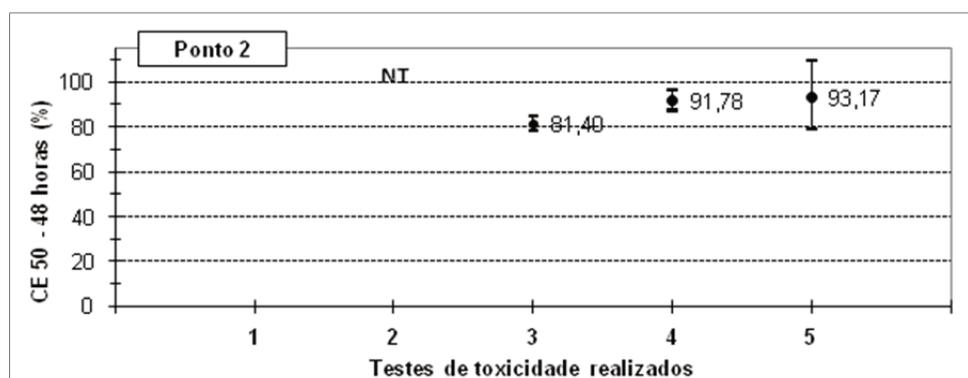


Figura 5.87: Concentração efetiva do Ponto 2 a 50% dos organismos, obtida nos ensaios utilizando *Daphnia similis* durante 96 h de exposição, a cada 20 dias na Fase 1.

O sistema mostrou-se eficiente no tratamento do fomaldeído no FA (Ponto 2 – Figura 5.80). Foram obtidos quatro resultados válidos e as concentrações que provocaram a inibição do crescimento a 50% dos organismos testados permaneceram acima de 80%. No segundo teste não foi detectado efeito adverso aos organismos-teste, por isto este teste foi considerado não tóxico (NT). Os testes seguintes apresentaram toxicidade, no entanto é possível observar a recuperação do FA, visto que a toxicidade diminuiu devido ao aumento da CE 50/48h.

O Ponto 3 não apresentou toxicidade aguda para a espécie estudada quando submetidas às condições do teste (80 e 100%), portanto o efluente tratado não foi considerado tóxico para *D. similis* nestas condições (Fase 1 – 100 mg L⁻¹).

C) *Poecilia reticulata*

Organismos da espécie *Poecilia reticulata* foram expostos por um período de 96 h em amostras coletadas de esgoto bruto com formaldeído (Ponto 1), efluente tratado pelo FA (Ponto 2) e efluente tratado pelo BAS (Ponto 3), posteriormente, calculada a CL50/96 h. Esses valores eram dependentes das características do esgoto bruto ao sistema, podendo variar entre uma coleta e outra.

Os resultados obtidos na avaliação das variáveis físicas e químicas das soluções-teste serão apresentados nas Figuras 5.88 a 5.89.

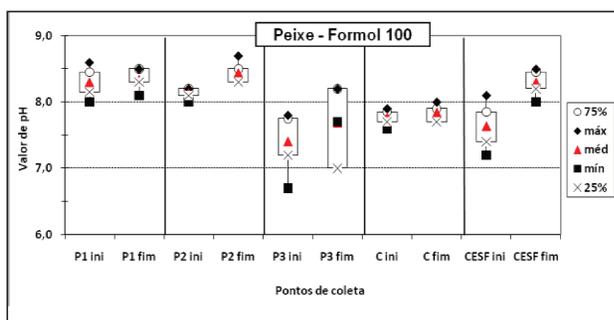


Figura 5.88: Valor do pH, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.

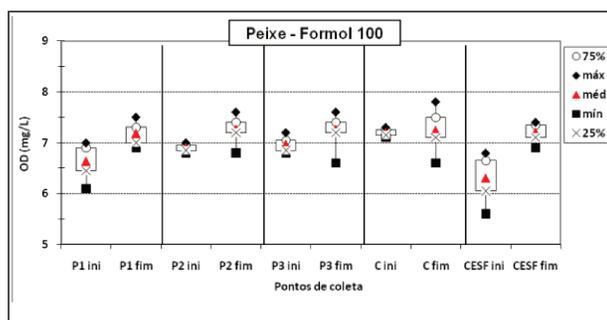


Figura 5.89: Concentração de OD, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.

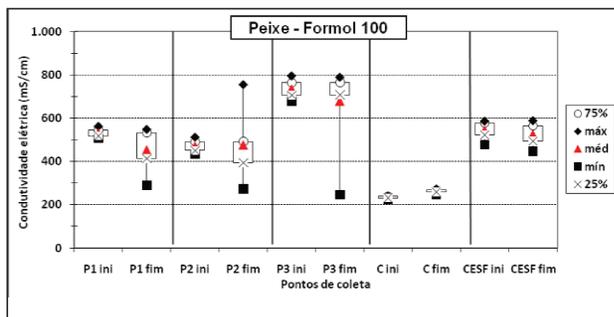


Figura 5.90: Condutividade elétrica, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.

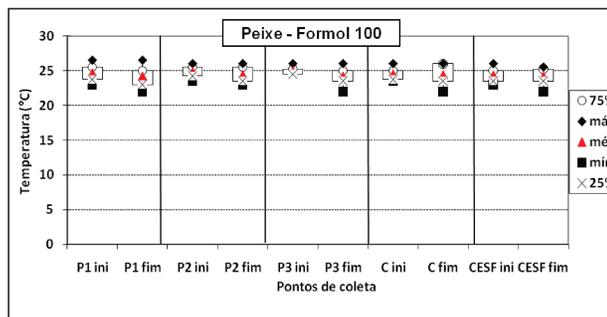


Figura 5.91: Valor da Temperatura, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.

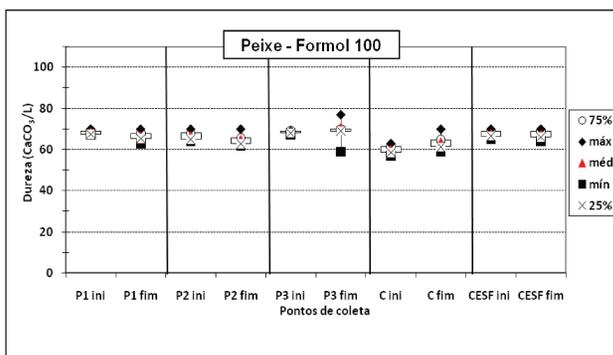


Figura 5.92: Concentração da Dureza, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.

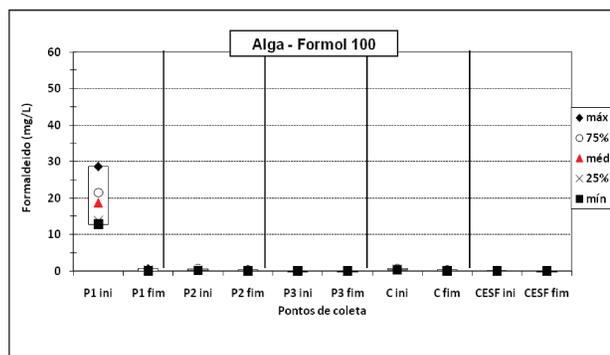


Figura 5.93: Concentração do Formaldeído, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.

Os valores obtidos para as diversas variáveis físicas e químicas apresentaram pouca variabilidade, garantindo a não interferência destes parâmetros nos valores de toxicidade obtidos.

No Ponto 1, Figura 5.94, a concentração causadora da letalidade a 50% dos organismos-teste (CL50/96h) ficou abaixo de 50%. Pode-se ver que a espécie *P. reticulata* mostrou-se menos sensível a ao Ponto 1, quando comparada às outras espécies. No Teste 5, houve aumento da toxicidade em relação aos testes anteriores e isto pode ter ocorrido devido a alta concentração de nitrogênio amoniacal registrada no dia do teste.

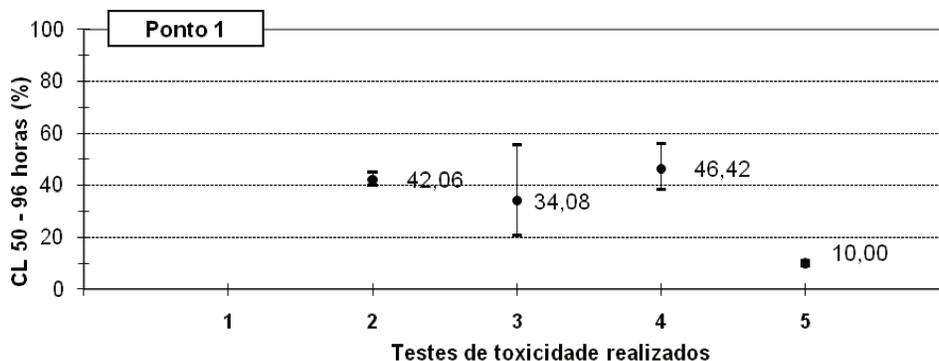


Figura 5.94: Concentração letal do Ponto 1 a 50% dos organismos, obtida nos ensaios utilizando *P. reticulata* durante 96 h de exposição, a cada 20 dias na Fase 1.

A degradação do esgoto e produção de subprodutos tóxicos, não exclusivos do formaldeído, pode ser ressaltada analisando a Figura 5.95, referente ao Ponto 2. Nesta etapa, a espécie *P. reticulata* foi mais sensível e obteve a CL50/96h em concentrações menores que 20%. Neste ponto a concentração de formaldeído estava baixa, sendo $2,7 \pm 4,1 \text{ mg L}^{-1}$, por isto, assim como ocorrido no Ponto 1, este aumento da toxicidade, pode ser consequencia do N-Amoniacal presente em altas concetrações na saída do FA, já que a amônia é tóxica para os peixes.

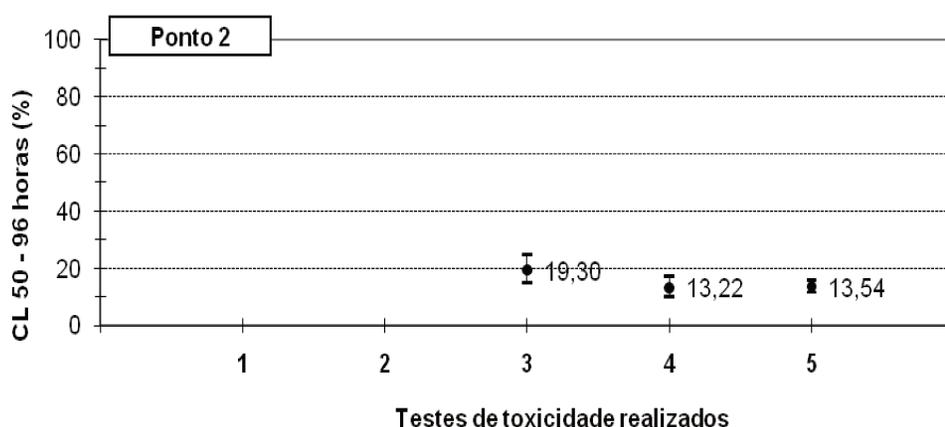


Figura 5.95: Concentração letal do Ponto 2 a 50% dos organismos, obtida nos ensaios utilizando *P. reticulata* durante 96 h de exposição, a cada 20 dias na Fase 1.

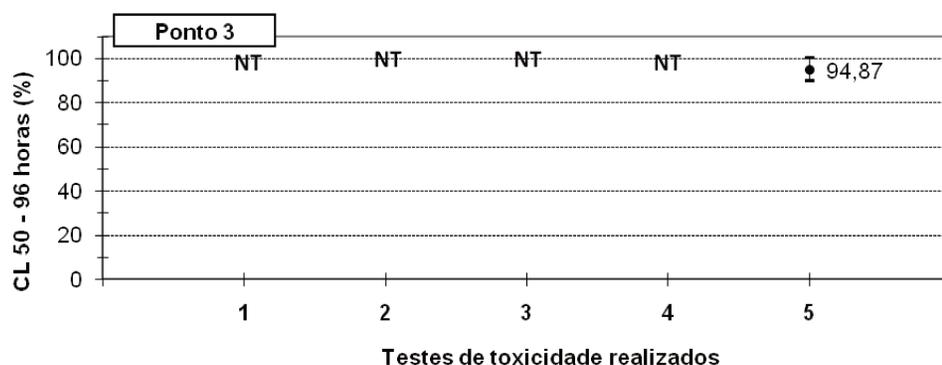


Figura 5.96: Concentração letal do Ponto 3 a 50% dos organismos, obtida nos ensaios utilizando *P. reticulata* durante 96 h de exposição, a cada 20 dias na Fase 1.

Apesar do aumento da toxicidade no FA, esta foi reduzida após o tratamento no BAS, visto pelos valores da CL50 no Ponto 3 – Figura 5.96. Estes resultados indicam boa estabilidade do sistema na redução da toxicidade devido ao formaldeído.

A espécie *P. reticulata* mostrou-se bom organismo indicador de toxicidade para o presente estudo, principalmente quanto à presença de amônia, tóxica para este organismo, conforme pode ser observado para o resultados obtidos no Ponto 2.

D) *Girardia tigrina*

O teste de toxicidade aguda expôs o organismo *Girardia tigrina*, por um período de 96 h em amostras coletadas de esgoto bruto com formaldeído (Ponto 1), efluente tratado pelo FA (Ponto 2) e efluente tratado pelo BAS (Ponto 3) e posteriormente calculada a CL50/96h. Esses valores eram dependentes das características do esgoto bruto ao sistema, podendo variar entre uma coleta e outra.

Os resultados de pH, OD, condutividade, dureza e formaldeído serão apresentados nas Figuras 5.97 a 5.102, respectivamente.

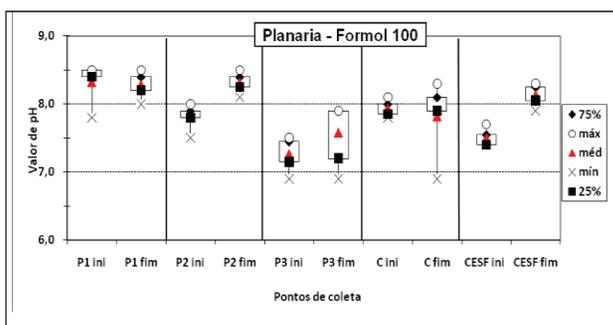


Figura 5.97: Valor do pH, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.

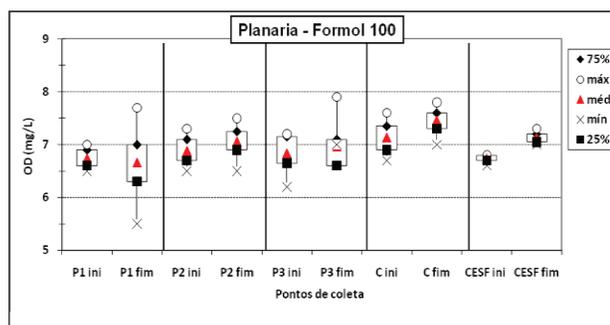


Figura 5.98: Concentração de OD, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.

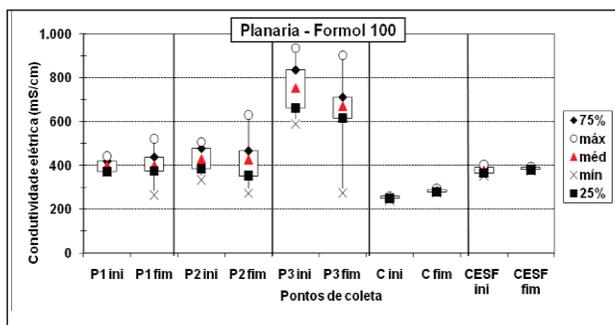


Figura 5.99: Condutividade elétrica, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.

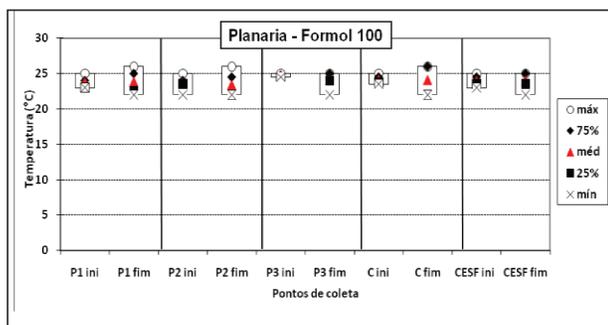


Figura 5.100: Valor da Temperatura, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.

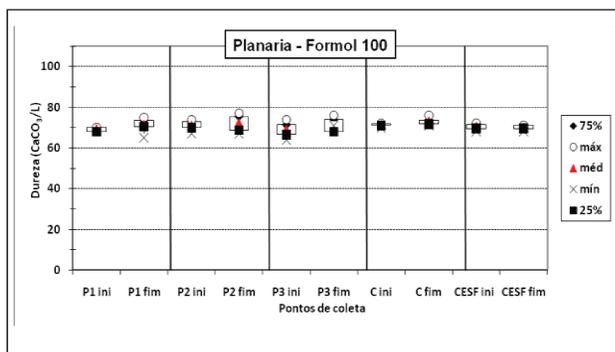


Figura 5.101: Concentração da Dureza, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.

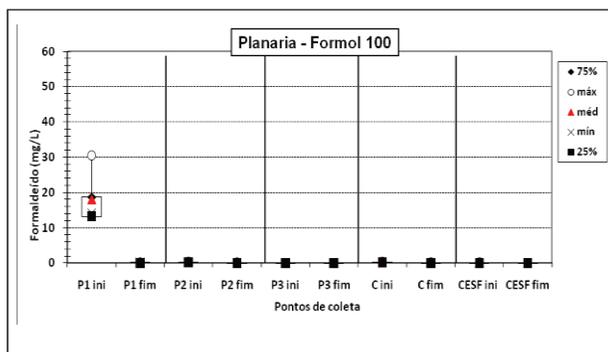


Figura 5.102: Concentração do Formaldeído, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.

Os resultados das variáveis físicas e químicas no início e fim dos ensaios não apresentaram alterações significativas e mantiveram-se dentro dos níveis para manutenção dos organismos, indicando que esses valores não exerceram influência significativa na toxicidade. O formaldeído foi o único a apresentar grande diferença entre o inicial e final, porém isto ocorreu provavelmente devido à sua volatilização e reação com os compostos presentes no esgoto.

Os resultados obtidos no Ponto 1, Figura 5.103, indicam a elevada toxicidade provocada pelo formaldeído, cuja concentração letal a 50% dos organismos manteve-se abaixo de 20%. A espécie *G. tigrina* mostrou-se sensível ao esgoto bruto contendo formaldeído assim como as espécies anteriores.

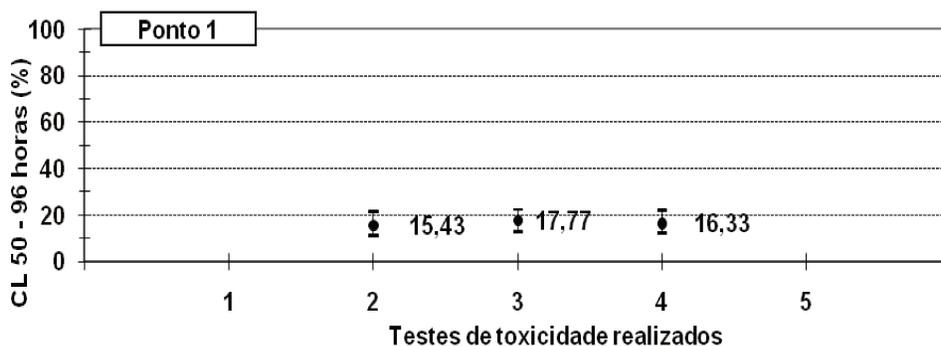


Figura 5.103: Concentração letal do Ponto 1 a 50% dos organismos, obtida nos ensaios utilizando *G. tigrina* durante 96 h de exposição, a cada 20 dias na Fase 1.

O efluente do FA, foi tóxico para *G. tigrina*, assim como para a espécie *P. reticulata*, conforme Figura 5.104. Neste caso pode-se fazer a mesma relação indicando que a presença de amônia que também causa toxicidade a alguns organismos.

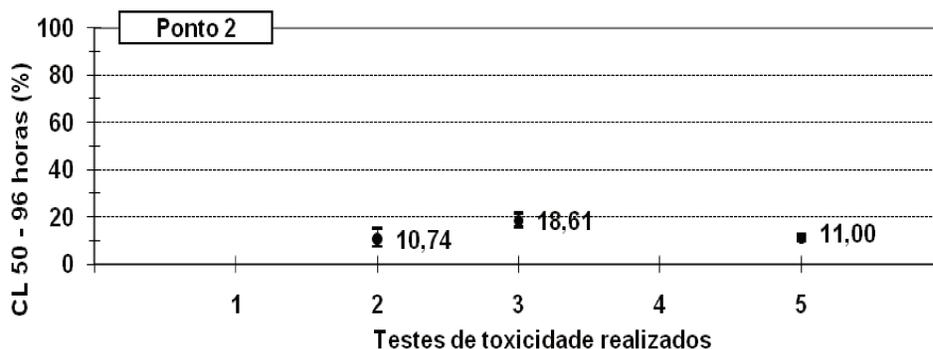


Figura 5.104: Concentração letal do Ponto 2 a 50% dos organismos, obtida nos ensaios utilizando *G. tigrina* durante 96 h de exposição, a cada 20 dias na Fase 1.

Ponto 3 não apresentou toxicidade aguda na exposição ao organismo sob as condições de estudo, demonstrando a alta capacidade do BAS na redução da concentração de formaldeído e conseqüentemente da toxicidade causada por ele.

Nas condições de estudo observa-se que a espécie *G. tigrina* apresenta-se como um organismo viável para testes de toxicidade aguda na avaliação dos efeitos do formaldeído aplicado ao esgoto.

5.2.2 Fase 2: concentração de 200 mg L⁻¹ de formaldeído

A) *Pseudokirchneriella subcapitata*

As variáveis físicas e químicas (pH, OD, condutividade elétrica, temperatura e formaldeído) das soluções-teste foram avaliadas e estão representadas nas Figuras 5.98 a 5.102.

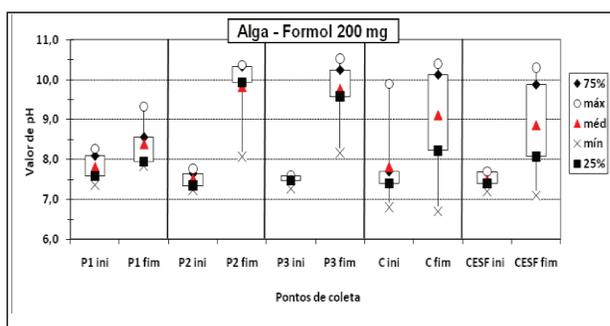


Figura 5.105: Valor do pH, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.

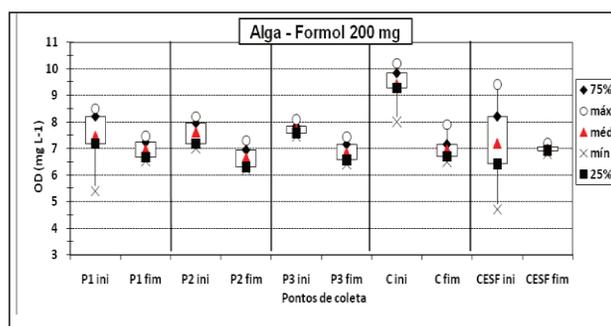


Figura 5.106: Concentração de OD, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.

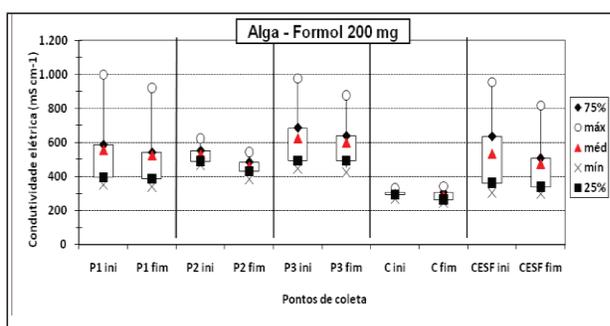


Figura 5.107: Condutividade elétrica, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.

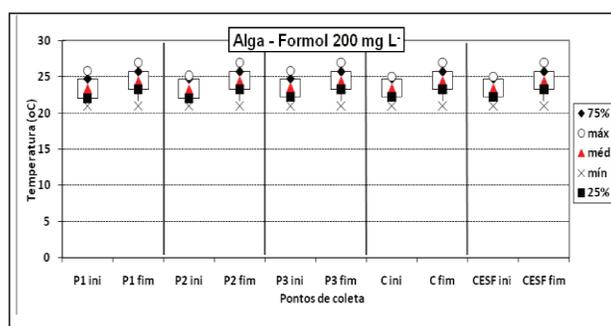


Figura 5.108: Valor da Temperatura, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.

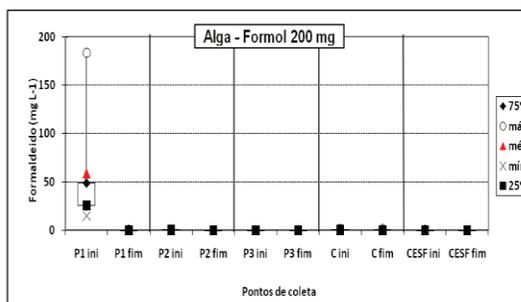


Figura 5.109: Concentração de Formaldeído, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.

Assim como visto na Fase 1 houve aumento nos valores de pH entre o início e o final do teste, que tem relação com o desenvolvimento das algas. As demais variáveis não apresentaram variações significativas que poderiam interferir na toxicidade os testes.

Os resultados dos testes de toxicidade serão apresentados nas Figuras 5.110, 5.111 e 5.112, em gráficos de barras indicando no eixo X (das abscissas) as concentrações das soluções-teste. Os valores positivos indicam a inibição do crescimento em relação ao controle e os negativos a não inibição, ou seja, o crescimento da biomassa algácea acima do controle.

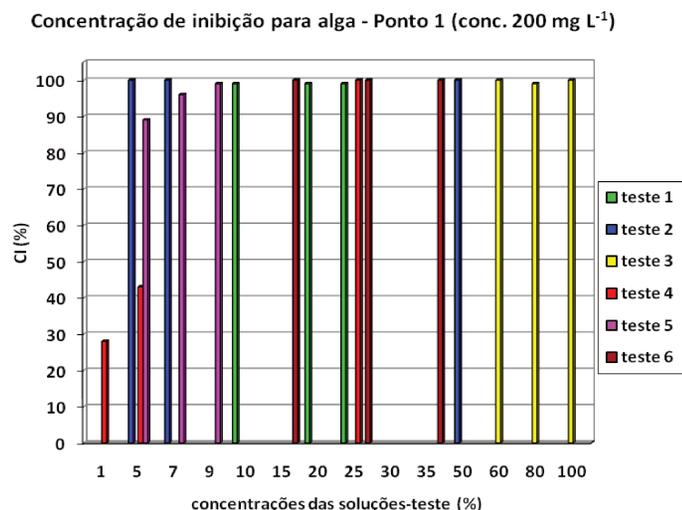


Figura 5.110: Concentração de inibição do Ponto 1 a 50% dos organismos, obtida nos ensaios utilizando *P. subcapitata* durante 96 h de exposição, a cada 20 dias na Fase 2.

A concentração de 200 mg L⁻¹ de formaldeído foi muito tóxica para a espécie *P. subcapitata* pois na concentração 5%, o crescimento foi inibido em mais de 90 % no Ponto 1.

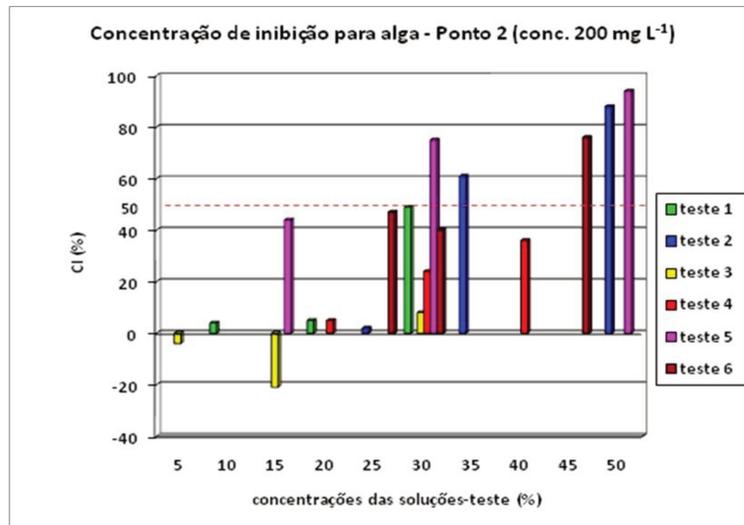


Figura 5.111: Concentração de inibição do Ponto 2 a 50% dos organismos, obtida nos ensaios utilizando *P. subcapitata* durante 96 h de exposição, a cada 20 dias na Fase 2.

O Ponto 2 apresentou inibição variável ao longo dos testes realizados, no entanto, pelo maior número de resultados próximos a CI50%/96h, pode-se dizer que a faixa de concentração compreendida de 25 a 35%, causou a inibição de 50% no crescimento.

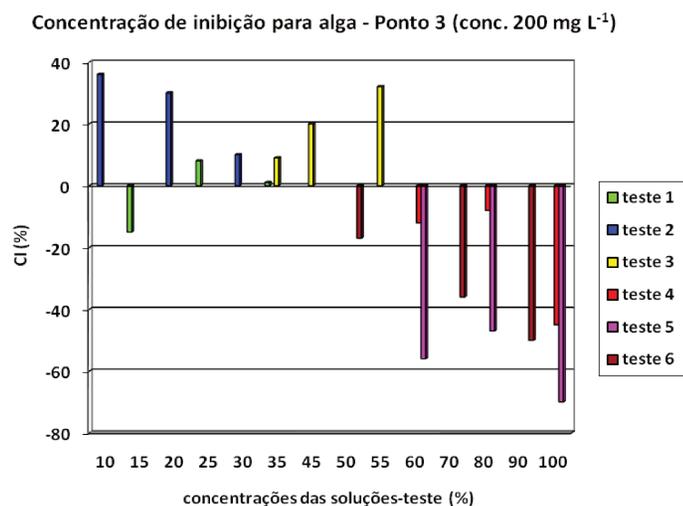


Figura 5.112: Concentração de inibição do Ponto 3 a 50% dos organismos, obtida nos ensaios utilizando *P. subcapitata* durante 96 h de exposição, a cada 20 dias na Fase 2.

Assim como ocorreu com o Ponto 2, também ocorreram variações nos testes do Ponto 3, Figura 5.105, porém nenhuma das concentrações analisadas causaram a inibição de 50% dos organismos.

Ao contrário dos outros pontos de amostragem do sistema, nas concentrações mais baixas do primeiro teste, foram registradas inibição do crescimento e nas mais altas, houve crescimento maior que o controle. Isto pode ter ocorrido mais devido a presença de nitrogênio na forma de nitrato, que esteve alta nos últimos testes, que a presença de formaldeído, já que sua concentração no Ponto 3 foi menor que 1 mg L⁻¹.

B) *Daphnia similis*

Os resultados do monitoramento das variáveis físicas e químicas obtidos para as soluções-teste e controles estão demonstrados nas Figuras 5.113 a 5.118.

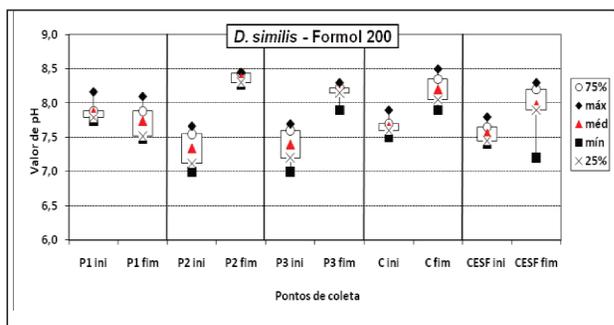


Figura 5.113: Valor do pH, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.

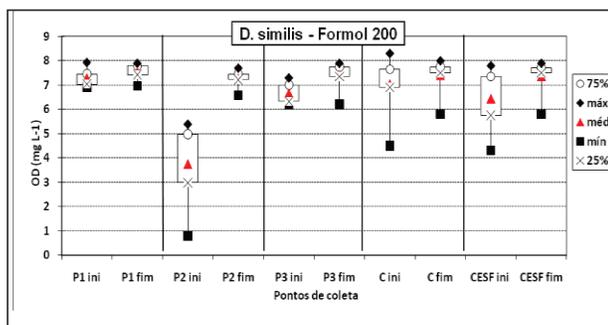


Figura 5.114: Concentração de OD, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.

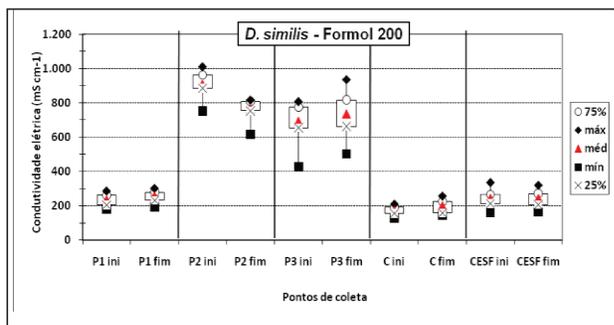


Figura 5.115: Condutividade elétrica, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.

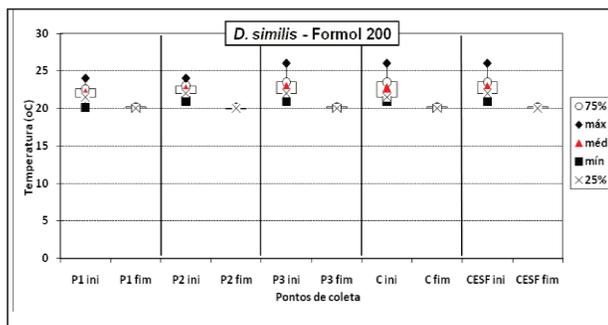


Figura 5.116: Valor da Temperatura inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.

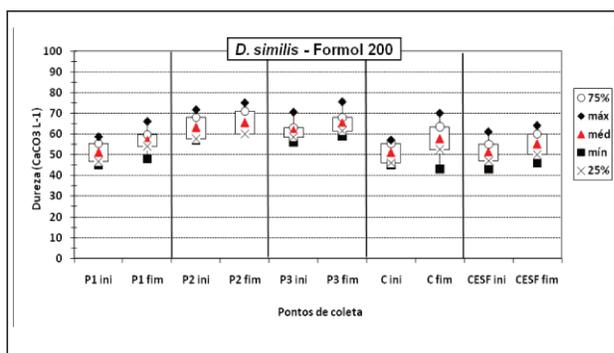


Figura 5.117: Concentração da Dureza, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.

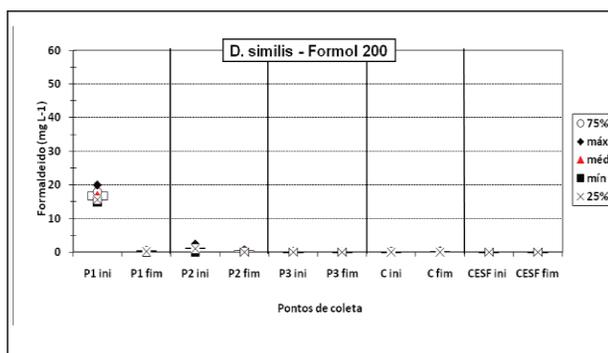


Figura 5.118: Concentração do Formaldeído, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.

As variáveis físicas e químicas mesmo apresentando valores diferentes daqueles estabelecidos como ideais para o cultivo, não influenciaram diretamente

nos resultados obtidos para a *D. similis*, exceto o formaldeído. A concentração de formaldeído no Ponto 1 variou de 15,0 a 19,4 mg HCOH L⁻¹, <0,009 a 0,14 mg HCOH L⁻¹ no Ponto 2, maior que na fase anterior, e <0,009 mg HCOH L⁻¹ no Ponto 3.

Os resultados dos testes de toxicidade foram indicados nos gráficos contendo o valor da EC50/48h a amplitude de variação por meio dos valores máximos e mínimos todos obtidos pelo programa Trimmed Spearman Karber. A CE50/48h para Ponto 1 e Ponto 2 estão representadas Figura 5.119 e 5.120.

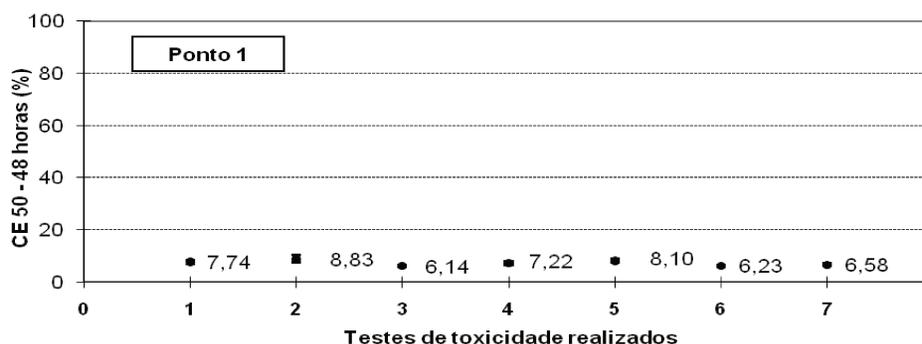


Figura 5.119: Concentração efetiva do Ponto 1 a 50% dos organismos, obtida nos ensaios utilizando *Daphnia similis* durante 96 h de exposição, a cada 20 dias na Fase 2.

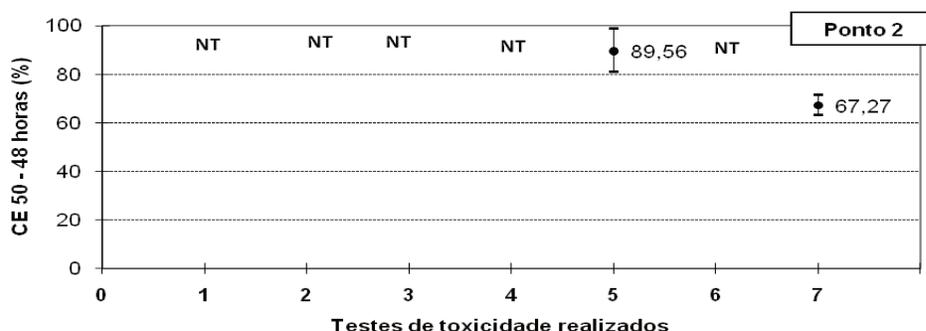


Figura 5.120: Concentração efetiva do Ponto 2 a 50% dos organismos, obtida nos ensaios utilizando *Daphnia similis* durante 96 h de exposição, a cada 20 dias na Fase 2.

No Ponto 1, as soluções-teste que causaram imobilidade a 50% dos organismos foram em concentrações menores que 10%. mostrando elevada toxicidade.

Observando os resultados obtidos no Ponto 2, o efluente não apresentou toxicidade na maioria dos testes realizados, indicando melhora na qualidade do efluente quando comparado com a Fase 1. Nos últimos testes houve aumento da toxicidade aos organismos, no entanto os resultados foram sempre superiores a média de 67% e podem estar associados ao aumento na concentração de matéria orgânica no esgoto bruto e a concentração de nitrogênio amoniacal.

Considerando o sistema como um todo, o efluente tratado contendo Formaldeído não apresentou toxicidade aguda em nenhum dos ensaios do Ponto 3, confirmando a elevada eficiência do sistema combinado.

C) *Poecilia reticulata*

Os resultados obtidos na avaliação das variáveis físicas e químicas das soluções-teste são apresentados nas Figuras 5.121 a 5.126.

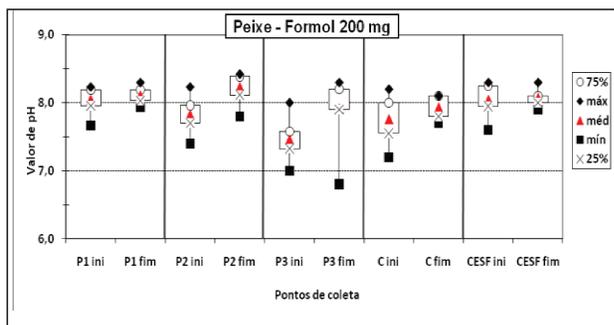


Figura 5.121: Valor do pH, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.

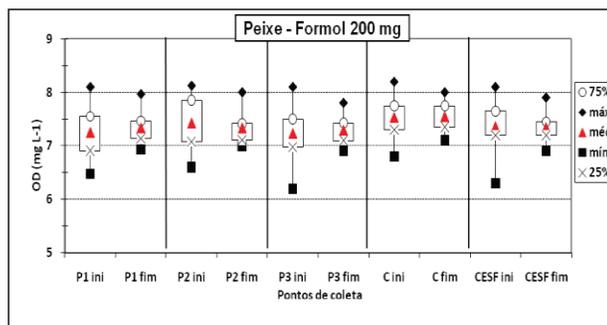


Figura 5.122: Concentração de OD, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.

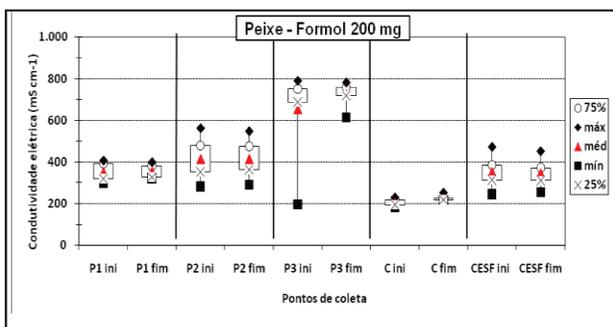


Figura 5.123: Condutividade elétrica, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.

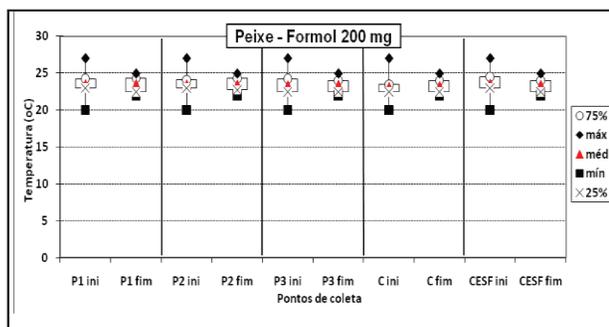


Figura 5.124: Valor da Temperatura, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.

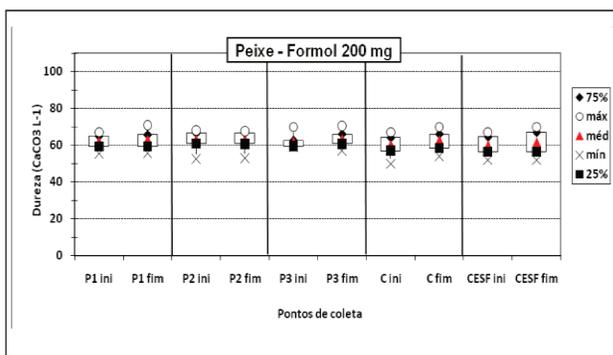


Figura 5.125: Concentração da Dureza, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.

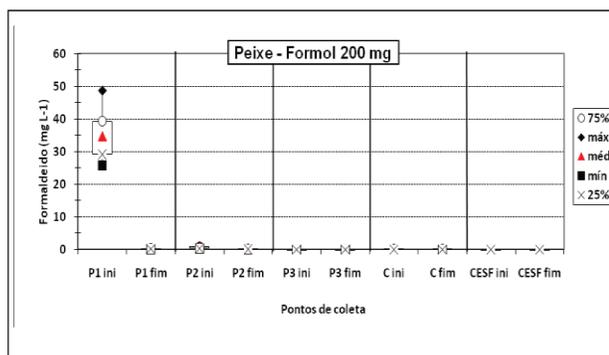


Figura 5.126: Concentração do Formaldeído, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.

Os valores obtidos para as diversas variáveis apresentaram pouca variabilidade, garantindo a não interferência destes parâmetros nos valores de toxicidade obtidos.

Nas Figuras 5.127, 5.128 e 5.129 encontram-se os resultados das CL50/96h obtidos para *P. reticulata*.

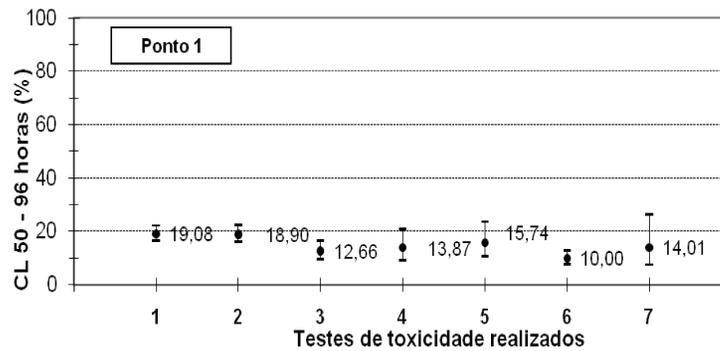


Figura 5.127: Concentração de efetiva do Ponto 1 a 50% dos organismos, obtida nos ensaios utilizando *P. reticulata* durante 96 h de exposição, a cada 20 dias na Fase 2.

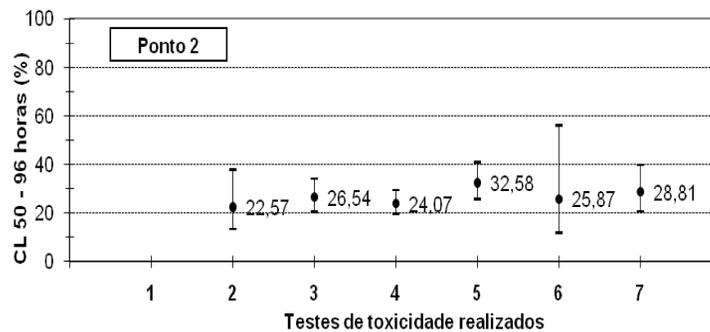


Figura 5.128: Concentração letal do Ponto 2 a 50% dos organismos, obtida nos ensaios utilizando *P. reticulata* durante 96 h de exposição, a cada 20 dias na Fase 2.

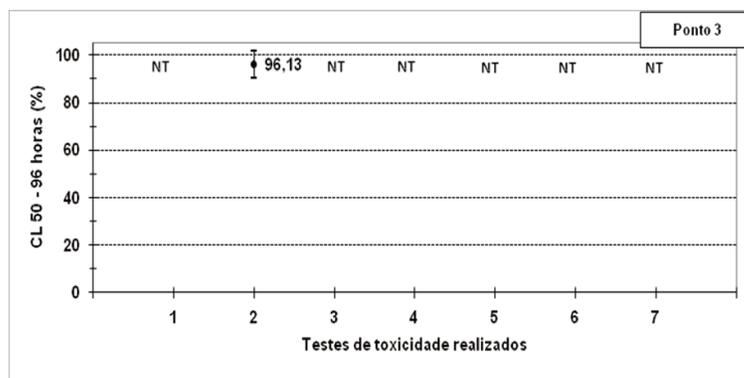


Figura 5.129: Concentração letal do Ponto 3 a 50% dos organismos, obtida nos ensaios utilizando *P. reticulata* durante 96 h de exposição, a cada 20 dias na Fase 2.

Os resultados dos testes de toxicidade no Ponto 1, indicam que a concentração de causadora da toxicidade a 50% dos organismos manteve-se abaixo de 20%, valor menor que aquele registrado na fase anterior. O Ponto 2 também foi mais tóxico nesta fase, visto que as médias das concentrações foram abaixo de 20%.

Para a espécie *P. reticulata*, o sistema como um todo não apresentou toxicidade aguda, na maioria dos testes do Ponto 3. A CE50/96h registrada no 2º teste pode ser decorrente da fase de adaptação, já que nos testes posteriores o efluente do Ponto 3 não foi tóxico aos organismos.

D) *Girardia tigrina*

Os resultados das análises das variáveis: pH, OD, condutividade elétrica, dureza e formaldeído são apresentados nas Figuras 5.130 a 5.135, respectivamente.

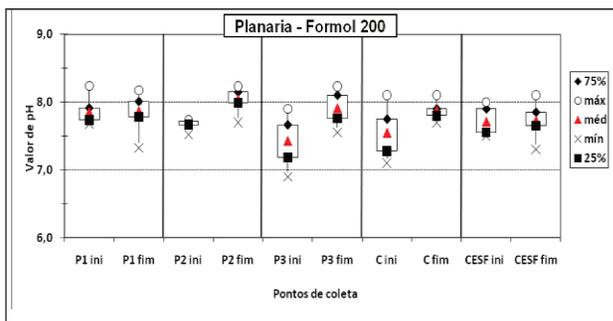


Figura 5.130: Valor do pH, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.

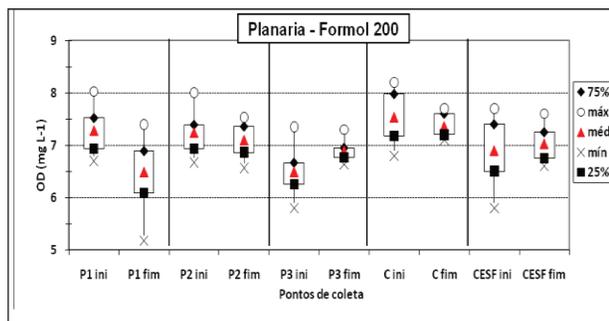


Figura 5.131: Concentração de OD, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.

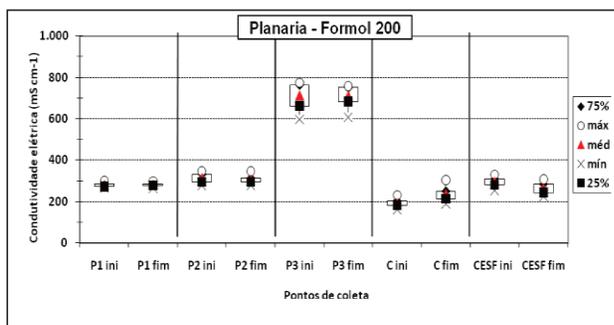


Figura 5.132: Condutividade elétrica, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.

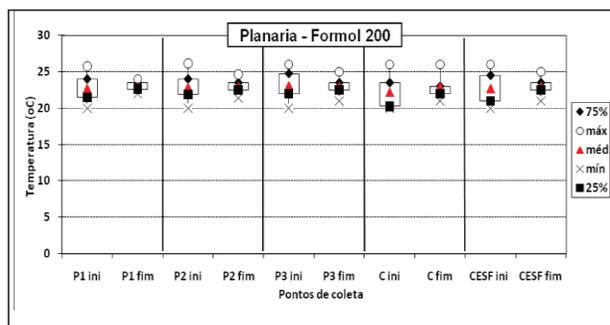


Figura 5.133: Valor da Temperatura, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.

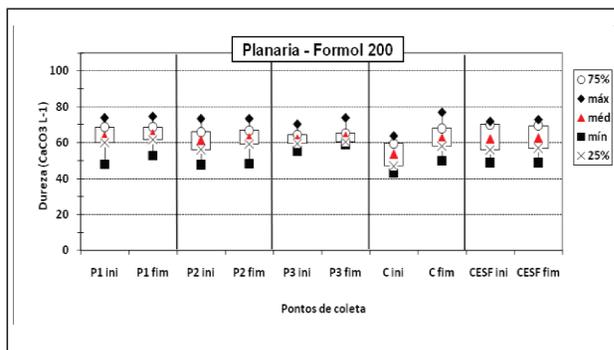


Figura 5.134: Concentração da Dureza, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.

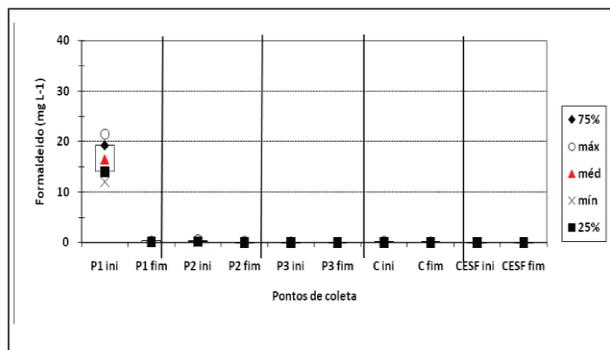


Figura 5.135: Concentração do Formaldeído, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.

Os resultados das variáveis físicas e químicas no início e fim dos ensaios não apresentaram alterações significativas que poderiam causar toxicidade. Foi registrado elevado valor de condutividade elétrica no efluente do BAS, no entanto não apresentou problema aos organismos teste.

As Figuras 5,136, 5,137 e 5.138 mostram os valores de CL50/96h obtidos nos testes com a planária *G. tigrina*.

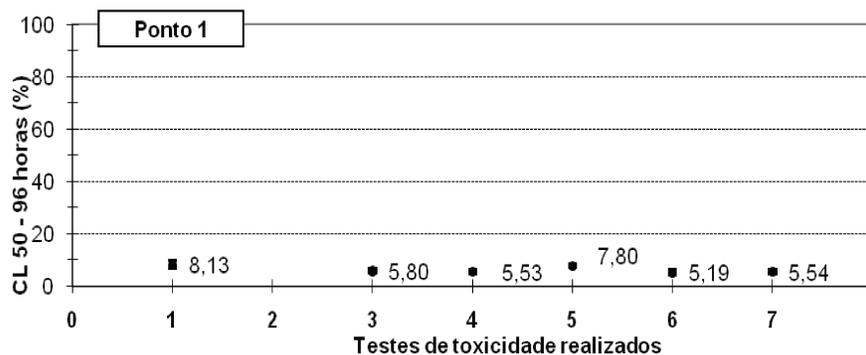


Figura 5.136: Concentração letal do Ponto 1 a 50% dos organismos, obtida nos ensaios utilizando *G. tigrina* durante 96 h de exposição, a cada 20 dias na Fase 2.

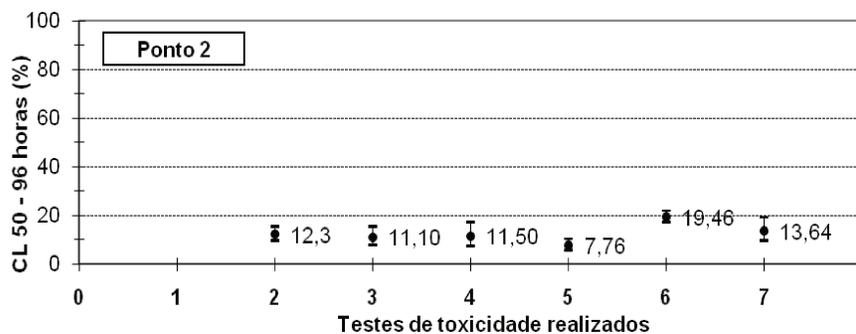


Figura 5.137: Concentração letal do Ponto 2 a 50% dos organismos, obtida nos ensaios utilizando *G. tigrina* durante 96 h de exposição, a cada 20 dias na Fase 2.

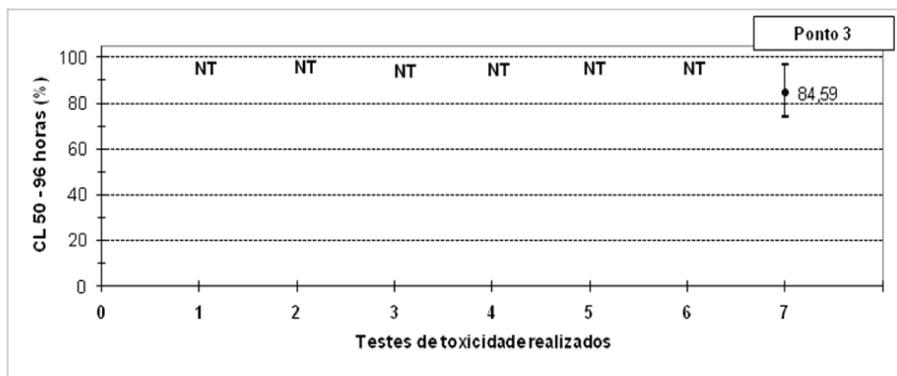


Figura 5.138: Concentração letal do Ponto 3 a 50% dos organismos, obtida nos ensaios utilizando *G. tigrina* durante 96 h de exposição, a cada 20 dias na Fase 2.

O Ponto 1, mostra a alta toxicidade provocada pelo formaldeído à *G. tigrina*, cuja concentração letal a 50% dos organismos manteve-se abaixo de 10%. O efluente do FA apresentou elevada toxicidade já que os valores obtidos para CL50/96h ficaram sempre abaixo de 20%.

Mesmo com o aumento da toxicidade no FA, o BAS manteve a eficiência conferindo a maioria dos resultados de CL50/96h, ausência de toxicidade aguda. Assim como ocorreu no teste de toxicidade com o organismo *P. reticulata* na Fase 2, Figura 5.129, a toxicidade no Teste 5 pode ser devido ao esgoto que esteve mais concentrado em termos de matéria orgânica e em relação à DQO na entrada do sistema.

5.2.3 Fase 3: concentração de 400 mg L⁻¹ de formaldeído

A) *Pseudokirchneriella subcapitata*

As variáveis físicas e químicas (pH, OD, condutividade elétrica, temperatura e formaldeído) das soluções-teste foram avaliadas e estão representadas nas Figuras 5.139 a 5.143.

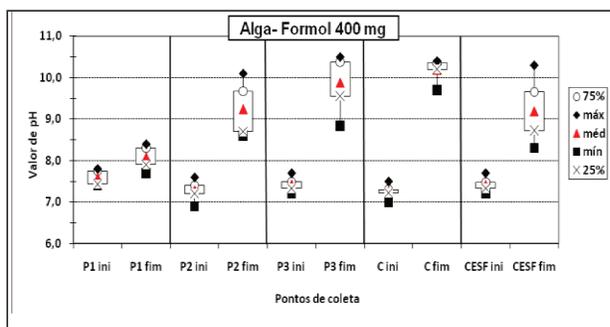


Figura 5.139: Valor do pH, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.

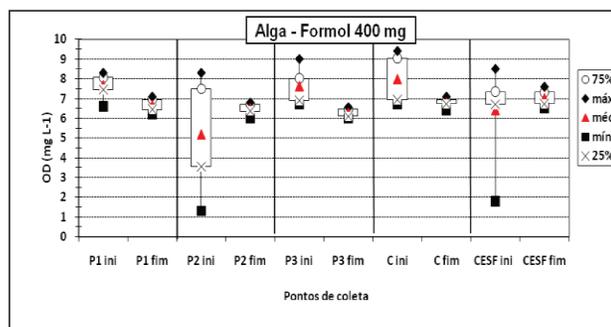


Figura 5.140: Concentração de OD, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.

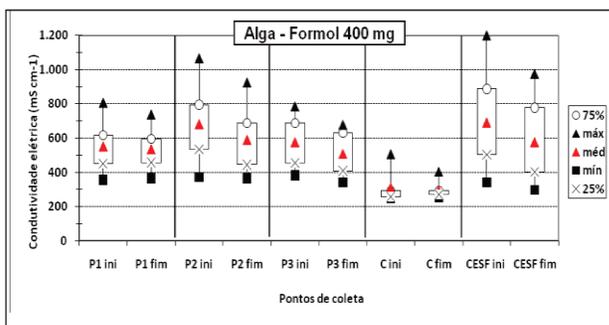


Figura 5.141: Condutividade elétrica, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.

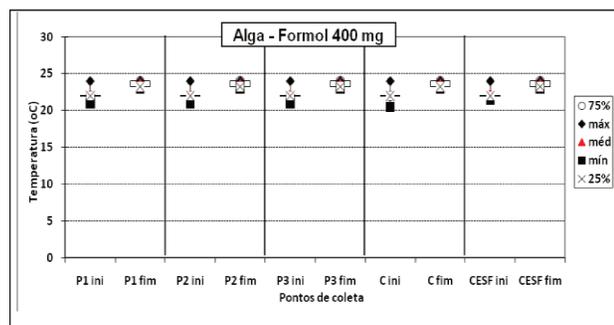


Figura 5.142: Valor da Temperatura, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.

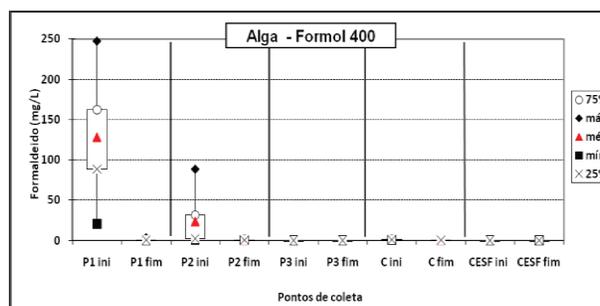


Figura 5.143: Concentração de Formaldeído, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.

Dentre as variáveis analisadas foram registradas altas concentrações de formaldeído no Ponto 1, devido ao aumento da concentração no afluente bruto e assim como discutido no item 5.1.3-A, também aumentou a concentração de formaldeído no Ponto 2, refletida nas análises das variáveis na Fase 3. As demais variáveis analisadas não apresentaram variação significativa.

A concentração de 400 mg L⁻¹ no esgoto bruto, Ponto 1, pode ser considerada tóxica para o organismo *P. subcapitata*. Como pode ser observado na Figura 5.144, em concentrações da solução-teste acima de 1% houve inibição de mais de 50% no crescimento algal.

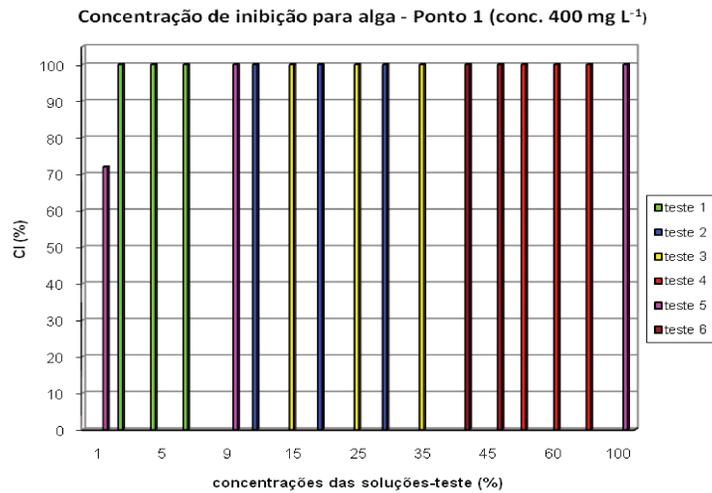


Figura 5.144: Concentração de inibição do Ponto 1 a 50% dos organismos, obtida nos ensaios utilizando *P. subcapitata* durante 96 h de exposição, a cada 20 dias na Fase 3.

No Ponto 2 (Figura 5.145), Teste 1, realizado após as 16 horas de aplicação da nova concentração, não refletiu o real impacto da mudança da concentração pois foi menos tóxico que os demais testes realizados com concentrações das soluções-teste inferiores. Com isso verifica-se que a toxicidade do efluente aumentou ao longo do período de estudo e no Teste 6, na concentração de 15% da solução-teste, foi atingida a CI_{50/96h}.

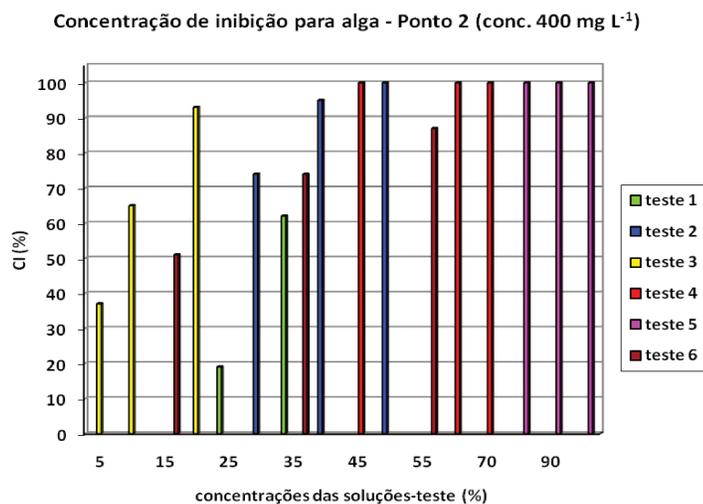


Figura 5.145: Concentração de inibição do Ponto 2 a 50% dos organismos, obtida nos ensaios utilizando *P. subcapitata* durante 96 h de exposição, a cada 20 dias na Fase 3.

O Ponto 3, causou maior toxicidade para a alga *P. subcapitata*. Como pode ser visto na Figura 5.146, em concentrações de solução-teste acima de 35%, o Ponto 3 houve inibição do crescimento acima de 50%. Na Fase 3 mesmo o sistema apresentando boa eficiência na nitrificação, reduzindo a concentração de amônia no efluente e assim, não causou interferência no teste como na Fase 2.

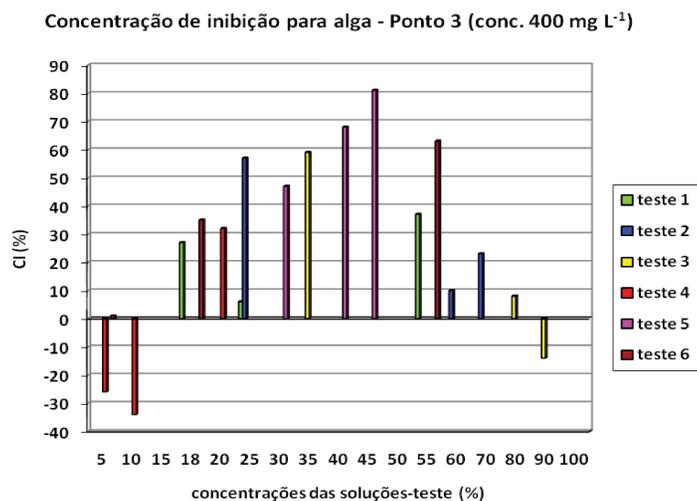


Figura 5.146: Concentração de inibição do Ponto 3 a 50% dos organismos, obtida nos ensaios utilizando *P. subcapitata* durante 96 h de exposição, a cada 20 dias na Fase 3.

B) *Daphnia similis*

Os resultados do monitoramento das variáveis físicas e químicas obtidos para as soluções-teste e controles estão demonstrados nas Figuras 5.147 a 5.152.

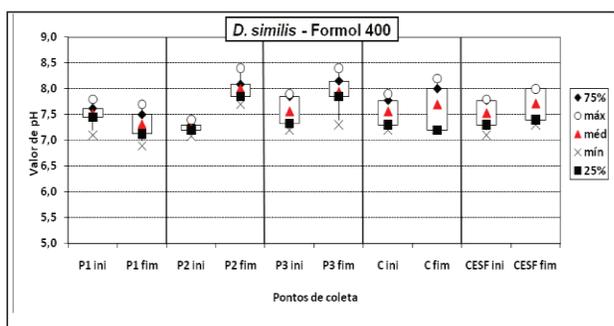


Figura 5.147: Valor do pH, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.

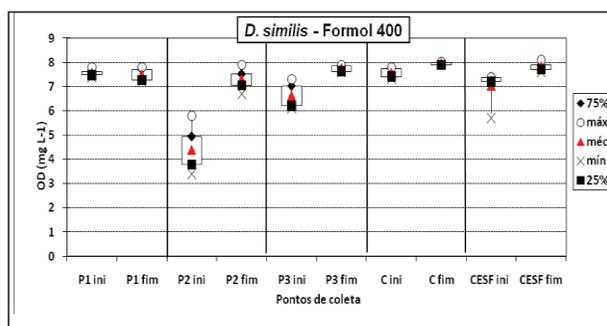


Figura 5.148: Concentração de OD, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.

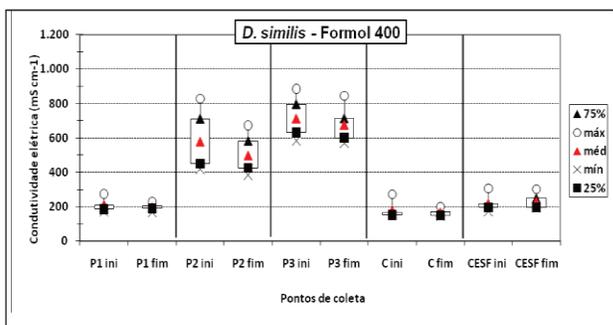


Figura 5.149: Condutividade elétrica, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.

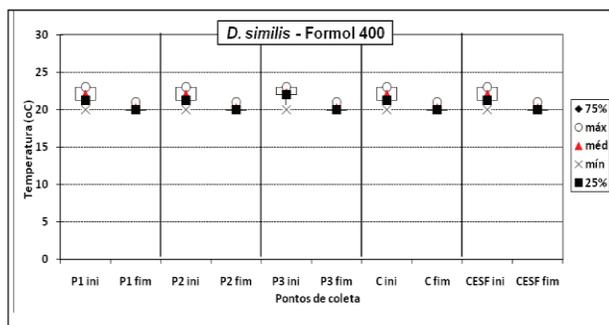


Figura 5.150: Valor da Temperatura, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.

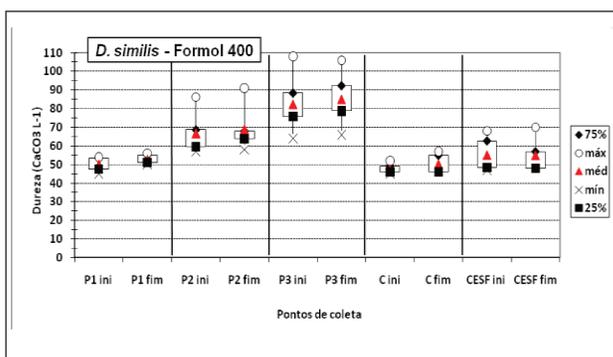


Figura 5.151: Concentração da Dureza, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.

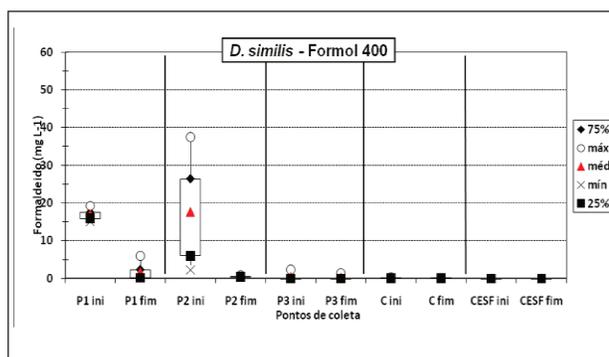


Figura 5.152: Concentração do Formaldeído, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.

As variáveis mantiveram o mesmo comportamento observado nas fases anteriores, porém no Ponto 2, a concentração de formaldeído inicial foi maior, causando maior efeito tóxico nos organismos.

Nas Figuras 5.153 e 5.154, podem ser observados os efeitos provocado pela adição de formaldeído na concentração de 400 mg L⁻¹.

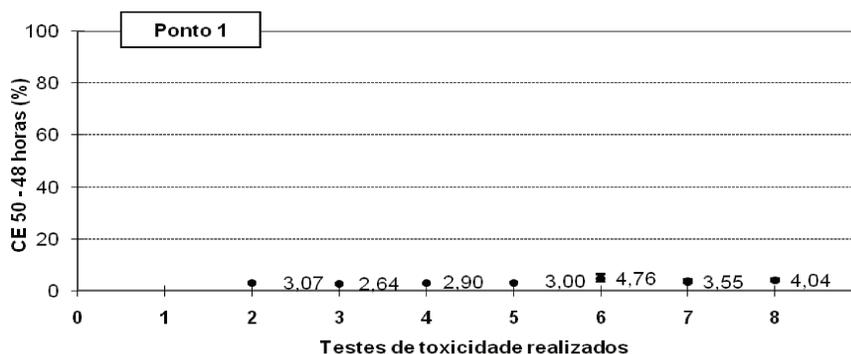


Figura 5.153: Concentração efetiva do Ponto 1 a 50% dos organismos, obtida nos ensaios utilizando *Daphnia similis* durante 96 h de exposição, a cada 20 dias na Fase 3.

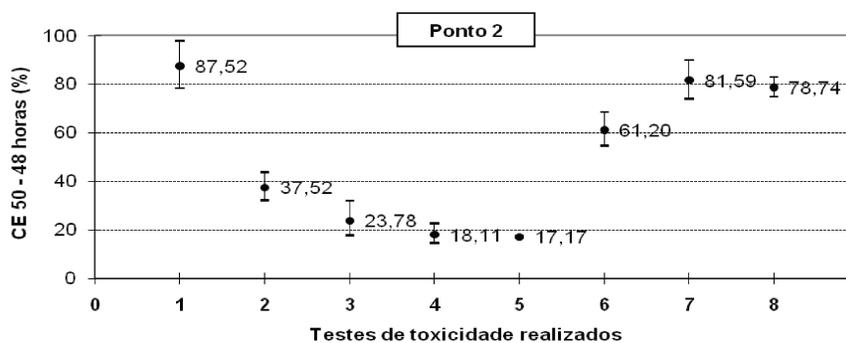


Figura 5.154: Concentração efetiva do Ponto 2 a 50% dos organismos, obtida nos ensaios utilizando *Daphnia similis* durante 96 h de exposição, a cada 20 dias na Fase 3.

O Ponto 1 causou elevada toxicidade para a *D. similis* onde a média das CE50/48h foi menor que 5%. No Ponto 2, foi possível observar a variação do efeito ao longo do período de estudo. É possível acompanhar o aumento progressivo da toxicidade observado pelos valores da CE50/48h em menores concentrações das soluções-teste. A partir do teste 6, o FA mostra recuperação no desempenho pela elevação dos valores da CE50 acima de 60%.

O sistema combinado manteve sua eficiência mesmo com estas variações na toxicidade dos pontos anteriores, visto que as amostras do Ponto 3 não foram consideradas tóxicas nos testes realizados na Fase 3.

C) *Poecilia reticulata*

Os resultados obtidos na avaliação das variáveis físicas e químicas das soluções-teste serão apresentados nas Figuras 5.155 a 5.160.

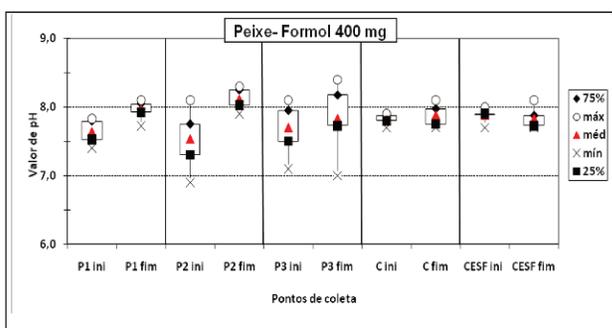


Figura 5.155: Valor do pH, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.

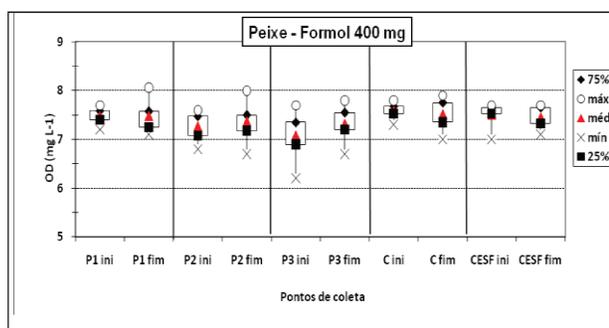


Figura 5.156: Concentração de OD, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.

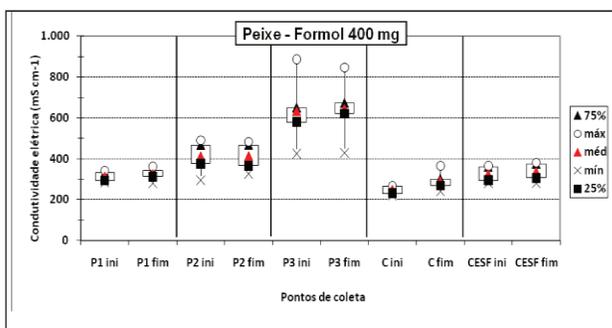


Figura 5.157: Condutividade elétrica, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.

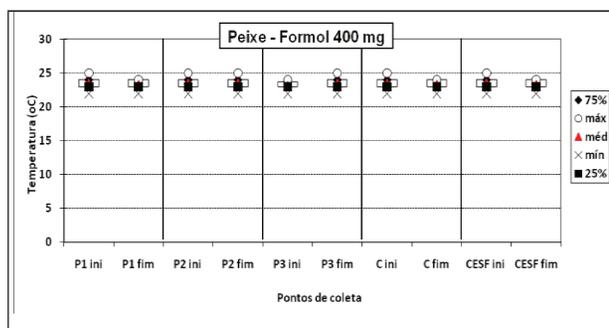


Figura 5.158: Valor da Temperatura, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.

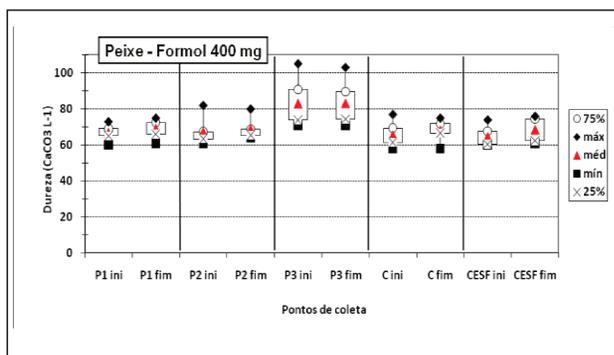


Figura 5.159: Concentração da Dureza, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.

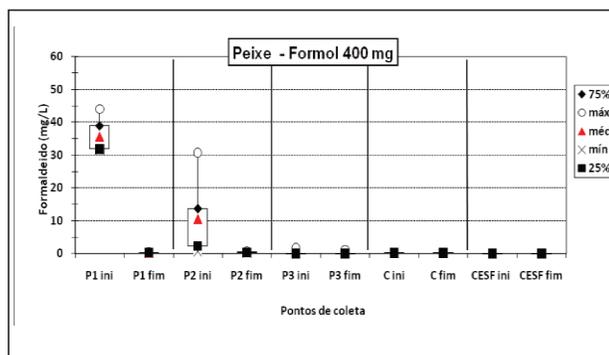


Figura 5.160: Concentração do Formaldeído, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.

Não houve alteração significativa nas variáveis analisadas exceto pelo aumento da concentração inicial de formaldeído no Ponto 2, assim como registrado para os outros organismos.

A CL50/96h no Ponto 1 (Figura 5.154) foi elevada, com as médias das concentrações abaixo de 12%, indicando alta toxicidade para o organismo-teste.

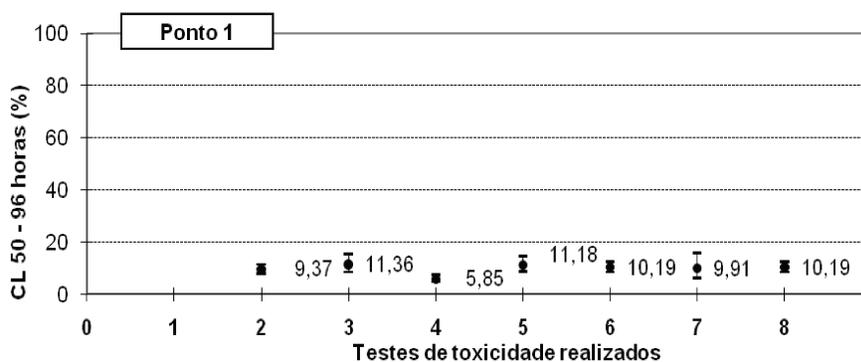


Figura 5.161: Concentração letal do Ponto 1 a 50% dos organismos, obtida nos ensaios utilizando *P. reticulata* durante 96 h de exposição, a cada 20 dias na Fase 3.

O Ponto 2, Figura 5.155, apesar de inicialmente (Teste 1 e 2) ter apresentado alta toxicidade, ao longo do período de estudo, com a adaptação da biomassa anaeróbia à concentração de 400 mg HCHO L⁻¹, mostra a recuperação do desempenho do FA verificado pelo aumento da CL50/96h média. Como essa média

passa a ser maior que a obtida na Fase 2, pode-se dizer que a adaptação nesta fase tornou o sistema mais eficiente.

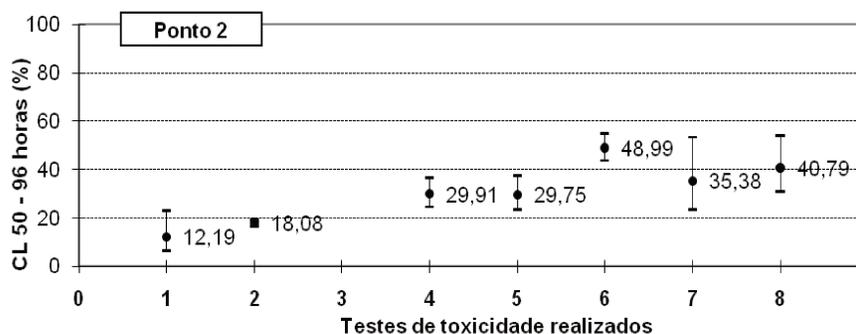


Figura 5.162: Concentração letal do Ponto 2 a 50% dos organismos, obtida nos ensaios utilizando *P. reticulata* durante 96 h de exposição, a cada 20 dias na Fase 3.

Na maioria dos testes realizados com o efluente do sistema, o Ponto 3 (Figura 5.156) não foi tóxico à *P. reticulata*. Apenas nos testes 4 e 5, devido à aeração insuficiente do compressor de ar, a nitrificação foi reduzida aumentando a concentração de nitrogênio amoniacal no Ponto 3. Por ser tóxica a alguns organismos como os peixes, a amônia em excesso está mais relacionada com a toxicidade observada nos testes 3 e 4 do que a concentração de formaldeído no efluente, que em ambos os testes foi menor que $0,009 \text{ mg HCHO L}^{-1}$. Outro fator que sustenta esta hipótese é o fato do efluente voltar a não apresentar toxicidade após a troca do compressor de ar e a nitrificação voltar a ocorrer.

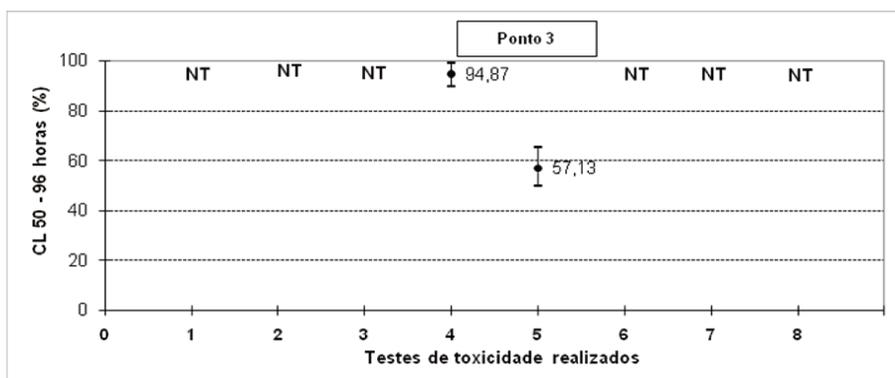


Figura 5.163: Concentração letal do Ponto 3 a 50% dos organismos, obtida nos ensaios utilizando *P. reticulata* durante 96 h de exposição, a cada 20 dias na Fase 3.

D) *Girardia tigrina*

Os resultados das análises das variáveis: pH, OD, condutividade, dureza e formaldeído serão apresentados nas Figuras 5.164 a 5.169, respectivamente.

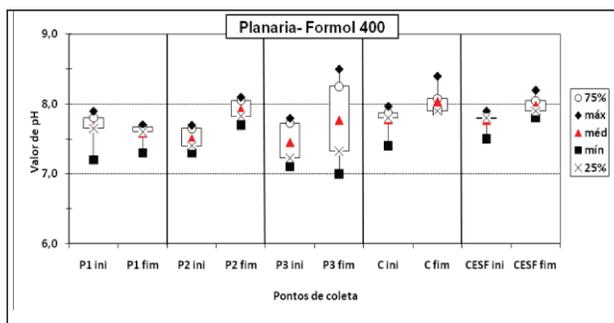


Figura 5.164: Valor do pH, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.

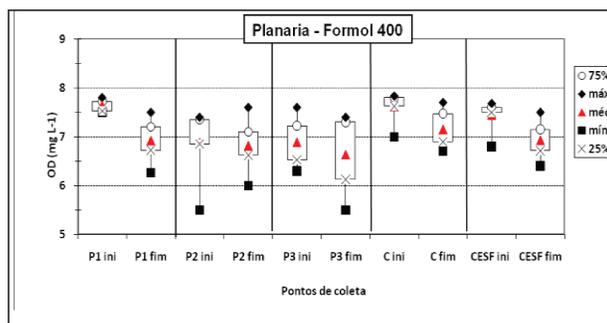


Figura 5.165: Concentração de OD, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.

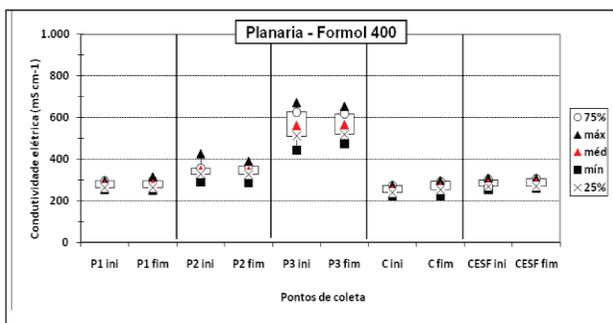


Figura 5.166: Condutividade elétrica, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.

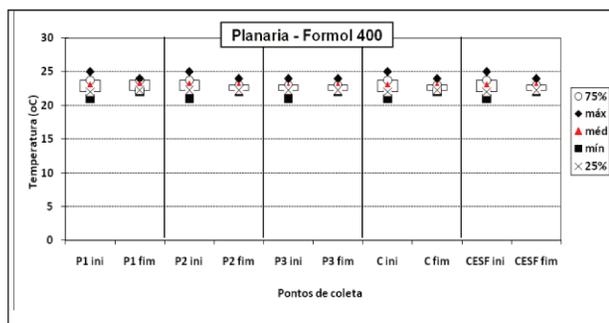


Figura 5.167: Valor da Temperatura, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.

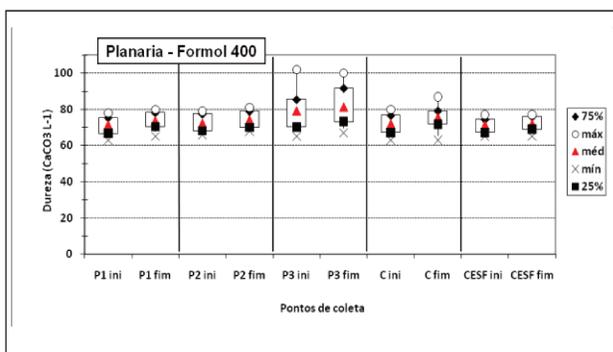


Figura 5.168: Concentração da Dureza, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.

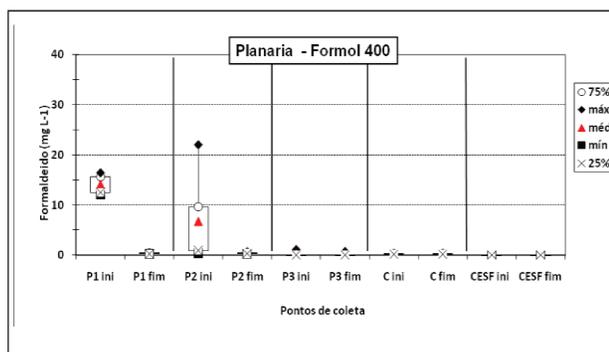


Figura 5.169: Concentração do Formaldeído, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.

As variáveis físicas e químicas analisadas apresentaram o mesmo comportamento observado com o monitoramento dos organismos anteriores, inclusive com o aumento da concentração inicial do ponto 2.

As Figuras 5.170 a 5.172 a seguir referem-se às CL50/96h da espécie *G. tigrina*, obtida nos pontos 1, 2 e 3 do sistema.

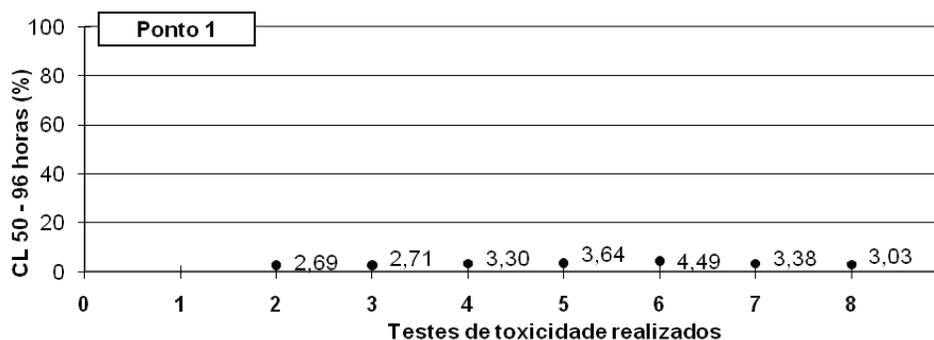


Figura 5.170: Concentração letal do Ponto 1 a 50% dos organismos, obtida nos ensaios utilizando *G. tigrina* durante 96 h de exposição, a cada 20 dias na Fase 3.

Pode ser observado que o Ponto 1 também apresentou elevada toxicidade para *G. tigrina*, com a média da CL50/96h abaixo de 5%. A toxicidade no Ponto 2 também foi elevada e a recuperação no desempenho observada na resposta dos organismos nessa mesma fase também foi observada, porém foi menos expressiva, com as médias da CL50 abaixo de 20%.

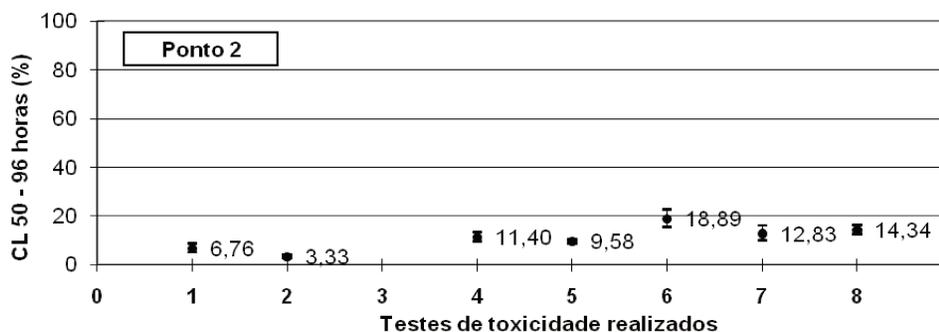


Figura 5.171: Concentração letal do Ponto 2 a 50% dos organismos, obtida nos ensaios utilizando *G. tigrina* durante 96 h de exposição, a cada 20 dias na Fase 3.

O Ponto 3 não foi tóxico para a maioria dos testes nesta fase, apresentando toxicidade pouco significativa apenas no teste 2, que pode ser devido a adaptação do BAS a nova concentração de estudo.

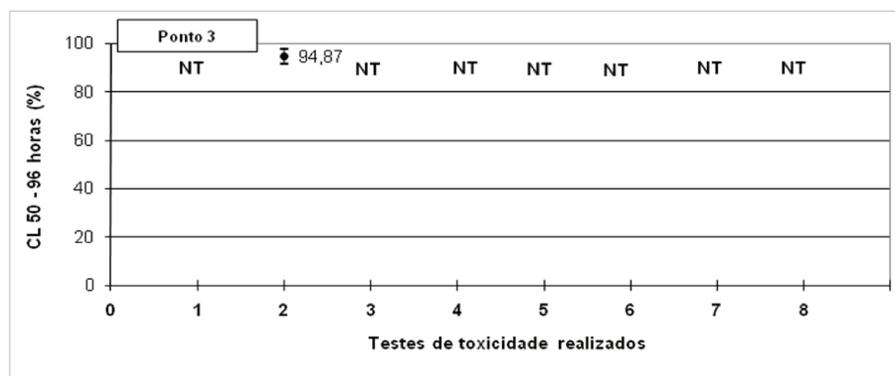


Figura 5.172: Concentração de efetiva do Ponto 3 a 50% dos organismos, obtida nos ensaios utilizando *G. tigrina* durante 96 h de exposição, a cada 20 dias na Fase 3.

5.2.4 Fase 4: concentração de 500 mg L⁻¹ de formaldeído

Nesta fase foram realizados apenas três testes de toxicidade com objetivo de avaliar se o aumento na concentração de formaldeído a 500 mg HCHO L⁻¹ poderia causar aumento mais expressivo na toxicidade, como já observado na Fase 2, e se o sistema manteria o desempenho da Fase 4.

A) *Pseudokirchneriella subcapitata*

As variáveis físicas e químicas (pH, OD, condutividade elétrica, temperatura e formaldeído) das soluções-teste foram avaliadas e estão representadas nas Figuras 5.173 a 5.177.

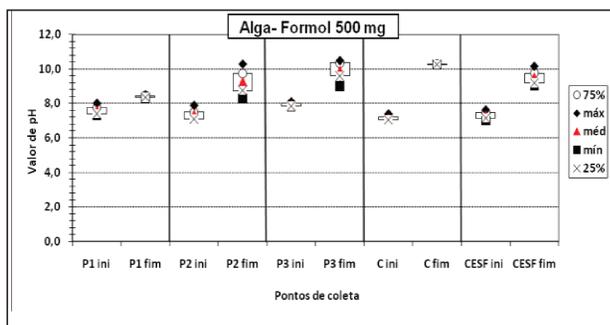


Figura 5.173: Valor do pH, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.

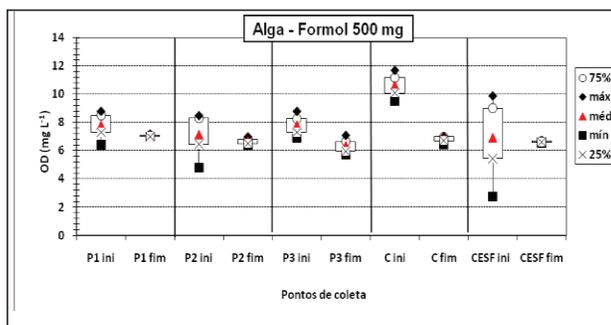


Figura 5.174: Concentração de OD, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.

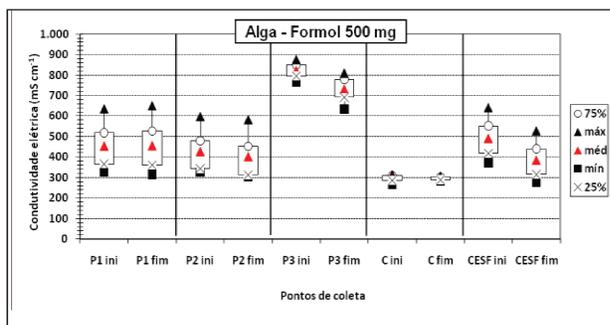


Figura 5.175: Condutividade elétrica, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.

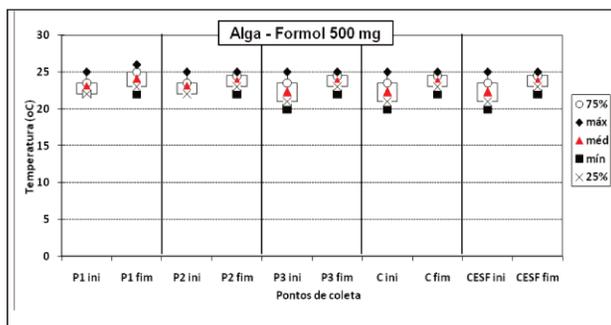


Figura 5.176: Valor da Temperatura, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.

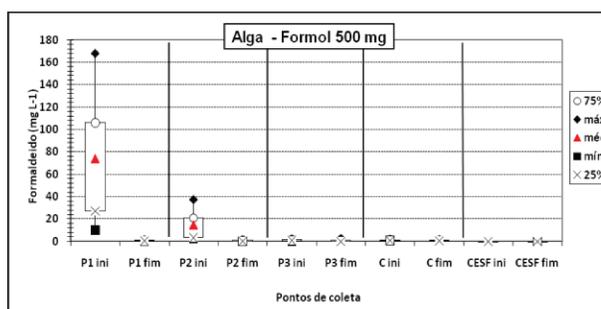


Figura 5.177: Concentração de Formaldeído, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.

O mesmo comportamento observado em todos os testes das variáveis físicas e químicas também foi obtido nesta fase, não sendo significativo para causar toxicidade dos organismos-testes. As diferenças foram em relação a concentração de formaldeído iniciais maiores no Ponto 1 e menores no Ponto 2.

Nas Figura 5.178 a 5.180 serão apresentadas as CI50/96h para *P. subcapitata* ao longo do estudo.

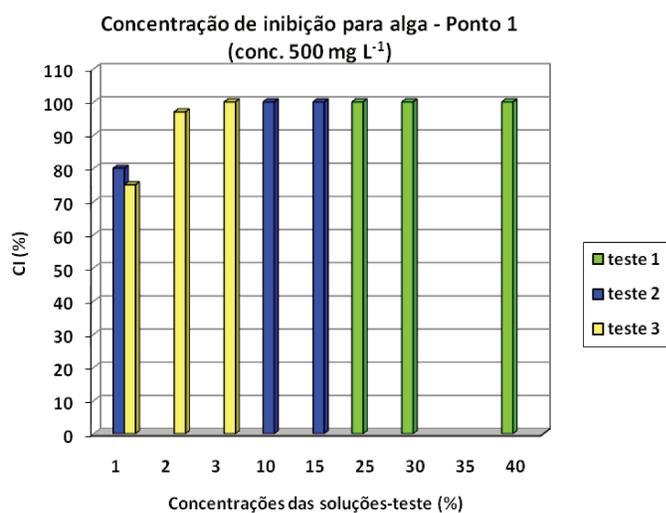


Figura 5.178: Concentração de inibição do Ponto 1 a 50% dos organismos, obtida nos ensaios utilizando *P. subcapitata* durante 96 h de exposição, a cada 20 dias na Fase 4.

O aumento em 500 mg L⁻¹ de formaldeído no esgoto bruto elevou a toxicidade do Ponto 1. Como pode ser visto na Figura 5.178, na concentração mínima de 1% da solução-teste já provocou a inibição de mais de 70% no crescimento da biomassa algácea e por isto o Ponto 1 foi considerado tóxico para *P. subcapitata* nesta fase.

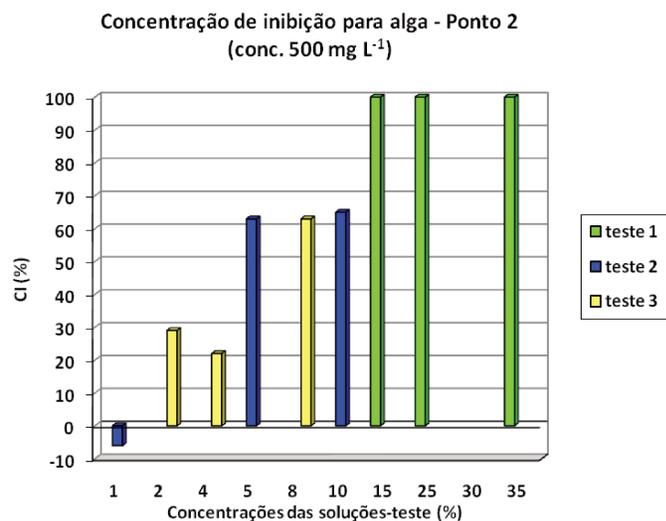


Figura 5.179: Concentração de inibição do Ponto 2 a 50% dos organismos, obtida nos ensaios utilizando *P. subcapitata* durante 96 h de exposição, a cada 20 dias na Fase 4.

O Ponto 2 apresentou inibição do crescimento acima da concentração de 5% da solução-teste sendo mais tóxico que na Fase 3. No Ponto 3 em concentrações da solução-teste acima de 50% foi observada a inibição do crescimento acima de 50%, e devido ao aumento da concentração de formaldeído no afluente do BAS que consequentemente o aumentou da toxicidade do efluente, não houve a interferência provocada pela presença de nutrientes, verificada também pela baixa concentração de nitrato no efluente, não ocorrendo crescimento acima do observado no controle.

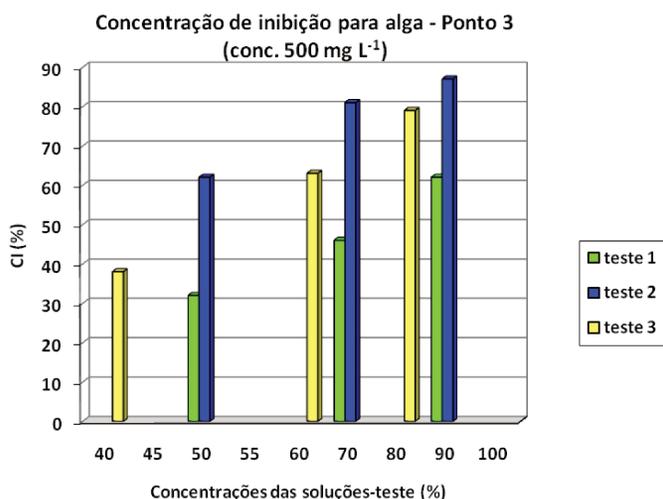


Figura 5.180: Concentração de inibição do Ponto 3 a 50% dos organismos, obtida nos ensaios utilizando *P. subcapitata* durante 96 h de exposição, a cada 20 dias na Fase 4.

B) *Daphnia similis*

As variáveis físicas e químicas foram pouco alteradas nesta fase de estudo. As concentrações iniciais de formaldeído nos Pontos 1 e 2 foram elevadas e foi observado a presença de formaldeído em concentrações maiores que o limite de detecção (LD=0,009 mg HCHO L⁻¹) no Ponto 3, sendo a maior concentração inicial observada a de 2,6 mg HCHO L⁻¹. Os resultados do monitoramento das variáveis obtidos para as soluções-teste e controles estão demonstrados nas Figuras 5.181 a 5.186.

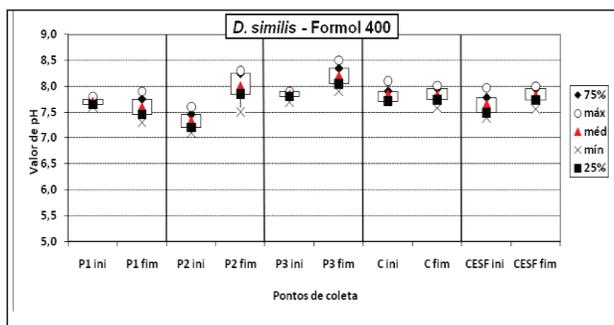


Figura 5.181: Valor do pH, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.

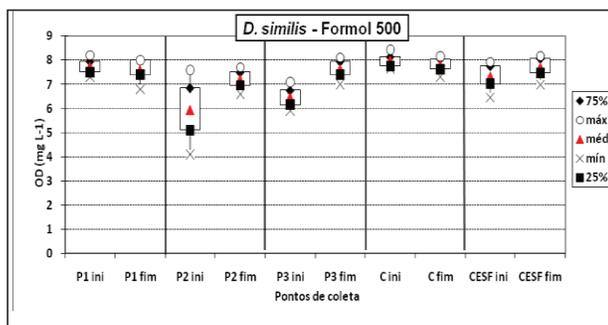


Figura 5.182: Concentração de OD, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.

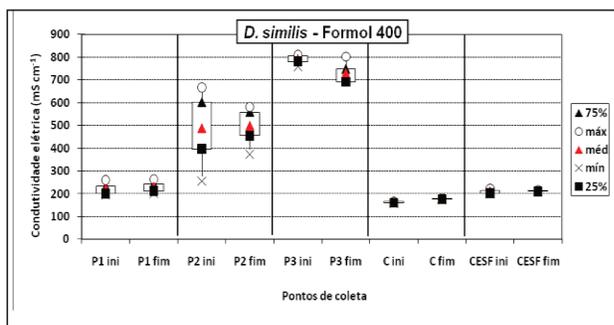


Figura 5.183: Condutividade elétrica, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.

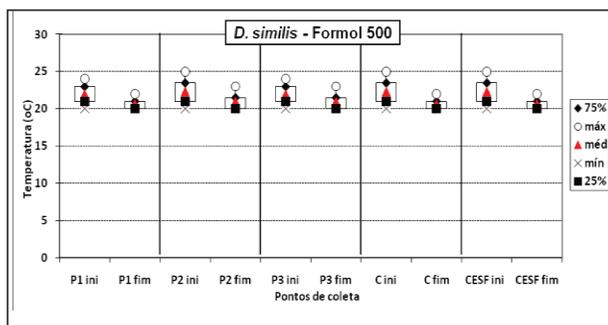


Figura 5.184: Valor da Temperatura, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.

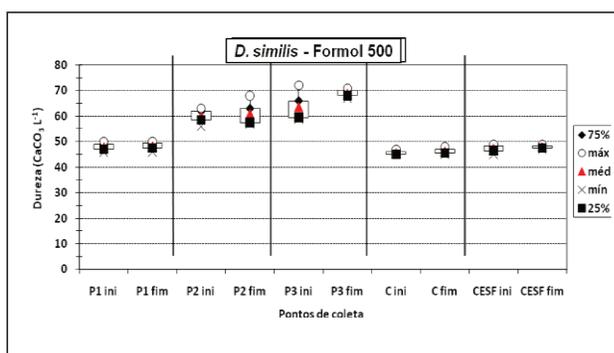


Figura 5.185: Concentração da Dureza, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.

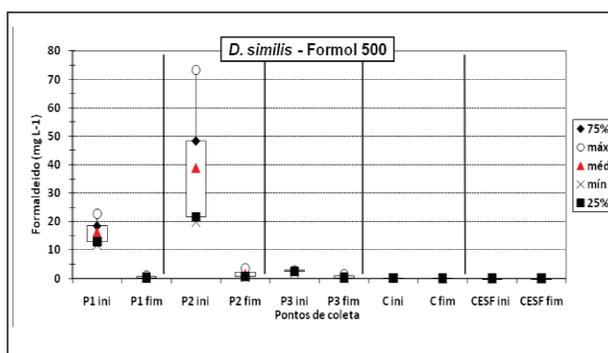


Figura 5.186: Concentração do Formaldeído, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.

Os resultados dos testes realizados com *D. similis* estão representados na Figura 5.187.

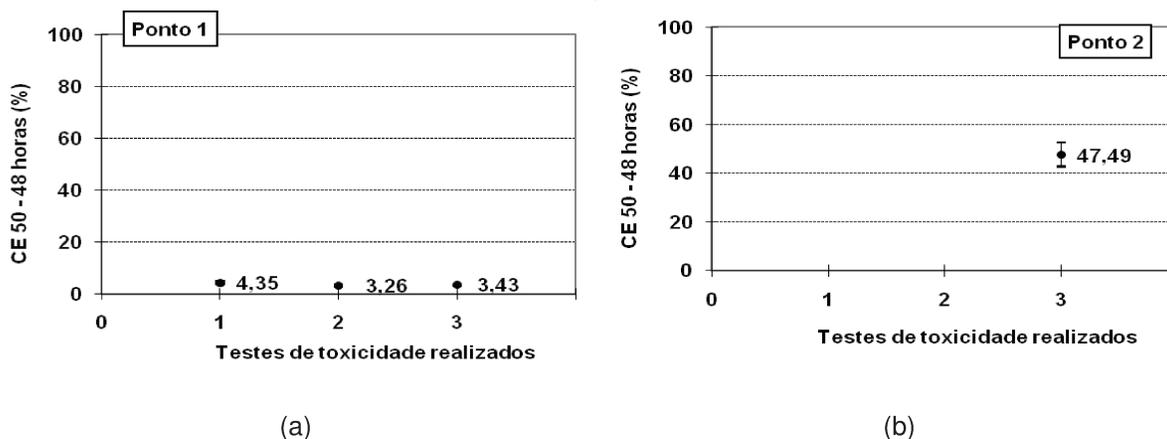


Figura 5.187: Concentração efetiva a 50% dos organismos, obtida nos ensaios utilizando *Daphnia similis* durante 96 h de exposição, a cada 20 dias na Fase 4: (a) Ponto 1; (b) Ponto 2.

A média da CE50/48h para *D. similis* apresentou pequeno aumento, mantendo-se abaixo de 4,5%. A instabilidade observada no FA devido ao aumento da concentração inicial de formaldeído, conforme já discutido no item 5.1.4, também interferiu nos resultados de toxicidade, pois só foi possível obter um teste com resultado confiável. Com isso não foi possível avaliar se houve recuperação do desempenho do FA.

Mesmo com a instabilidade verificada no Ponto 2, o Ponto 3 não foi tóxico para o organismo-teste *D. similis*.

C) *Poecilia reticulata*

Os resultados obtidos na avaliação das variáveis físicas e químicas das soluções-teste representados nas Figuras 5.188 a 5.193, não indicam variação significativa nos valores. Os valores das concentrações de formaldeído (Figura 5.179) nos Pontos 1 e 2 foram elevados e, assim como ocorreu para *D. similis*, a concentração de formaldeído detectada no Ponto 3 foi maior, sendo 3,0 mg HCHO L⁻¹ a concentração máxima inicial.

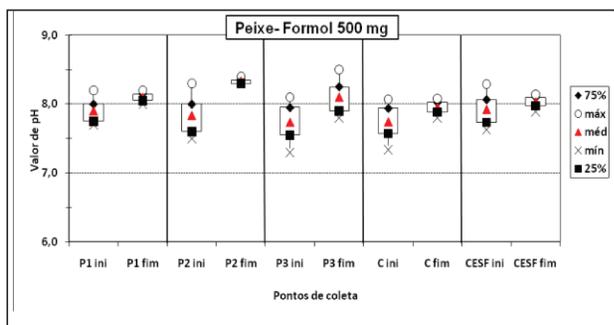


Figura 5.188: Valor do pH, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.

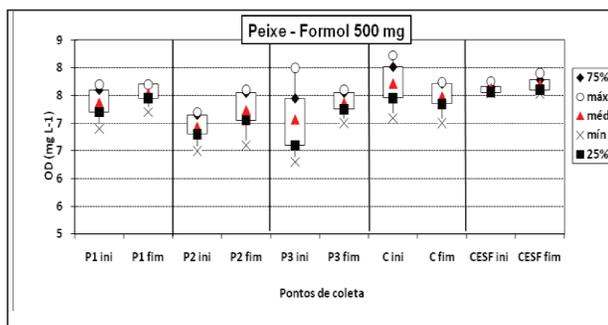


Figura 5.189: Concentração de OD, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.

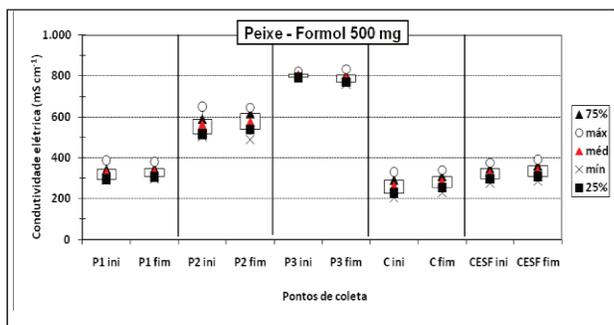


Figura 5.190: Condutividade elétrica, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.

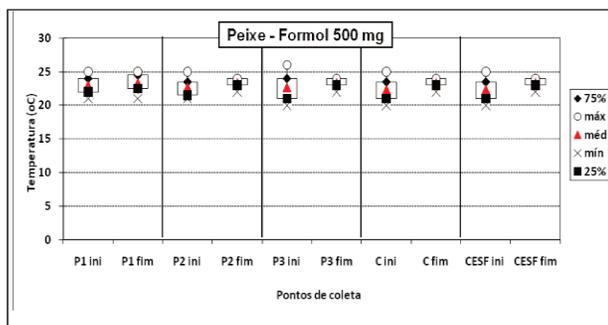


Figura 5.191: Valor da Temperatura, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.

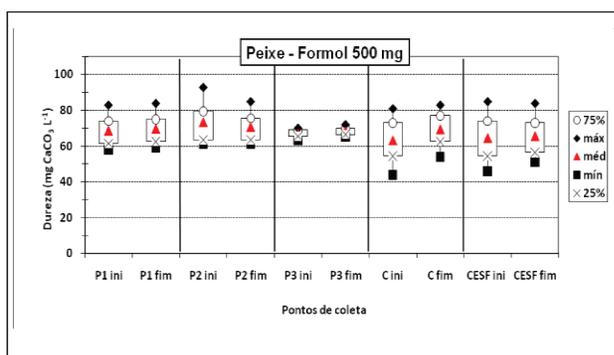


Figura 5.192: Concentração da Dureza, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.

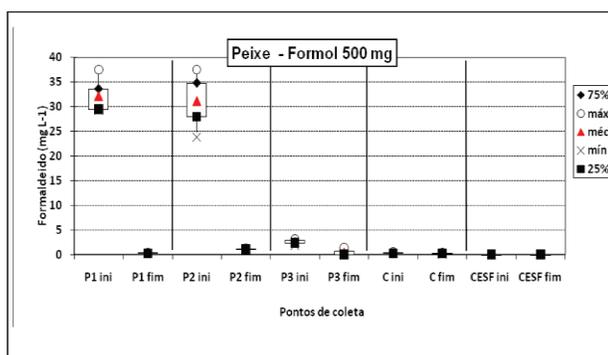


Figura 5.193: Concentração do Formaldeído, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.

As CL50/96h obtidas para *P. reticulata* estão representadas na Figura 5.194.

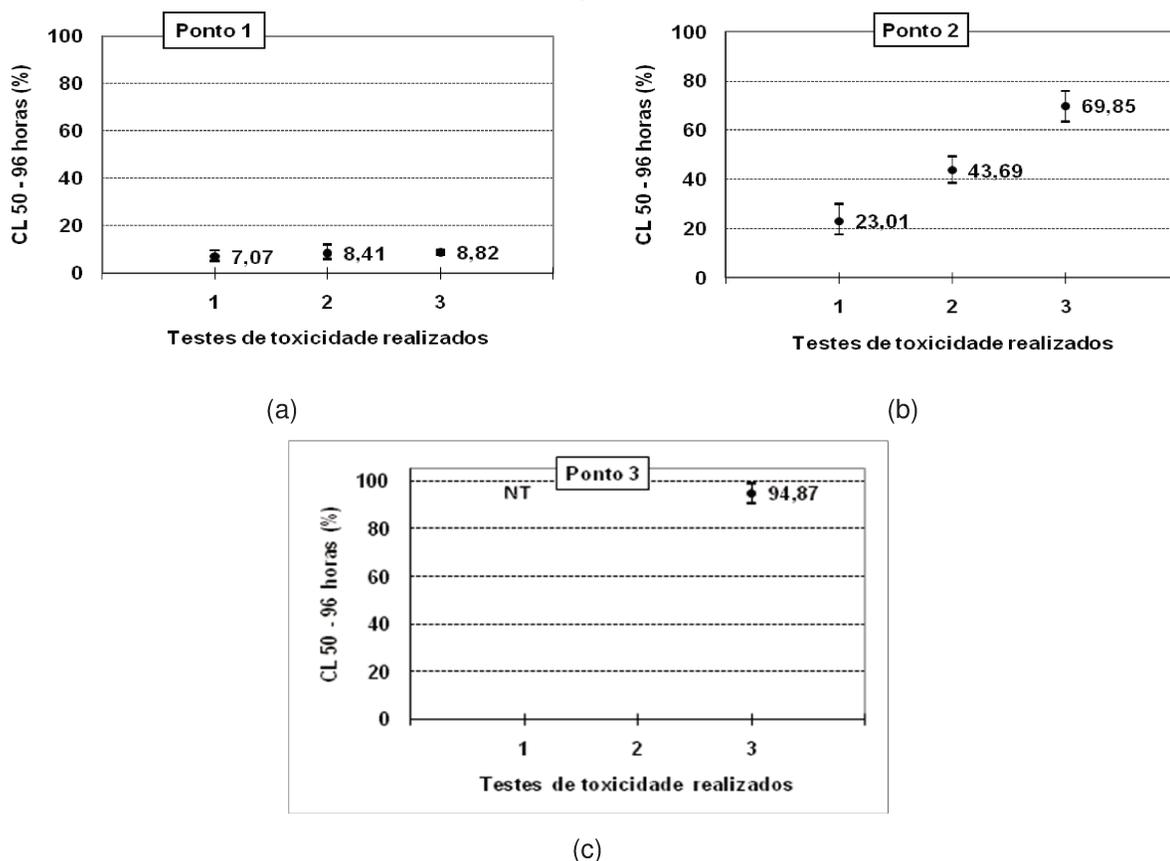


Figura 5.194: Concentração letal a 50% dos organismos, obtida nos ensaios utilizando *P. reticulata* durante 96 h de exposição, a cada 20 dias na Fase 4: (a) Ponto 1; (b) Ponto 2; (c) Ponto 3.

No Ponto 1, foi observado aumento na toxicidade e as médias das CL50/96h ficaram abaixo de 9%. O peixe *P. reticulata* foi menos susceptível a instabilidade do FA, sendo possível observar nos resultados obtidos a recuperação gradativa do FA ao longo do período de estudo. Nesta fase, o Ponto 2 foi menos tóxico para *P. reticulata* nos Teses 2 e 3, relação as Fase 2 e 3. O Ponto 3 apresentou toxicidade no Teste 3, em baixa concentração, porém não foi possível a realização de mais testes para verificar se o sistema teria capacidade de se recuperar e reduzir a toxicidade nos Pontos 2 e 3.

D) *Girardia tigrina*

Os resultados das análises de pH, OD, condutividade, dureza e formaldeído serão apresentados nas Figuras 5.195 a 5.200, respectivamente. As variáveis analisadas mantiveram o mesmo comportamento, com exceção à concentração de formaldeído. A concentração de formaldeído inicial foi maior nos pontos de amostragem, em comparação com as fases posteriores, mas também foi detectado em concentrações acima do limite de detecção do método nas análises finais. A concentração máxima na análise final de formaldeído foi de 0,5 mg HCHO L⁻¹ no Ponto 1, 0,9 mg HCHO L⁻¹ no Ponto 2 e 1,4 mg HCHO L⁻¹ no Ponto 3.

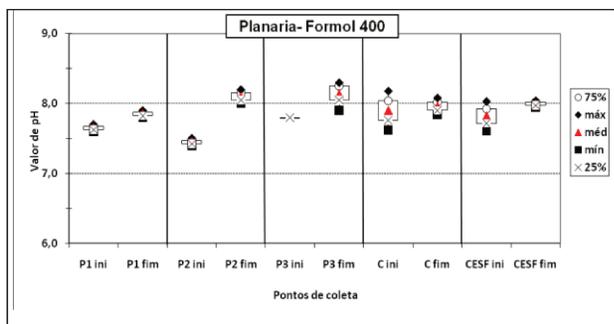


Figura 5.195: Valor do pH, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.

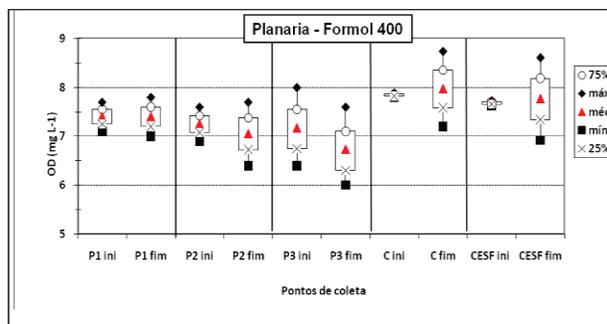


Figura 5.196: Concentração de OD, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.

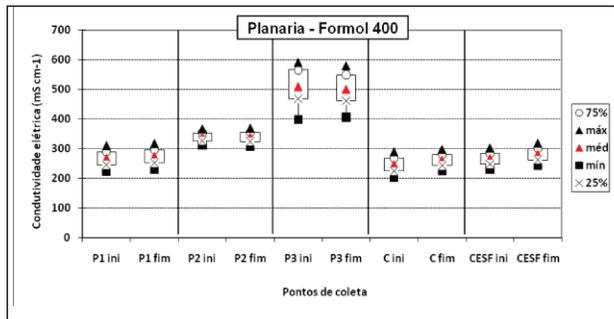


Figura 5.197: Condutividade elétrica, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.

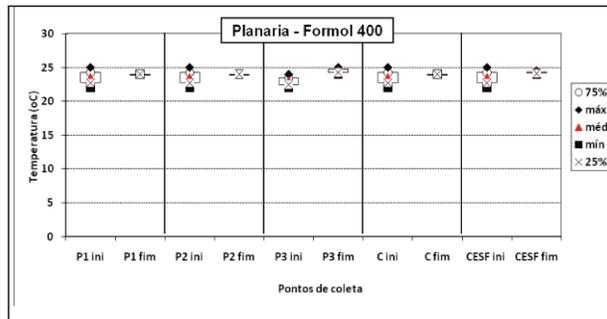


Figura 5.198: Valor da Temperatura, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.

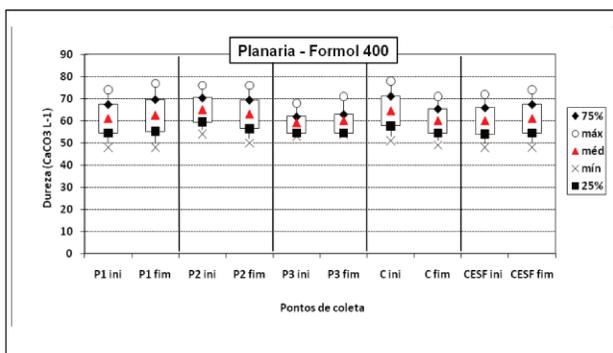


Figura 5.199: Concentração da Dureza, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.

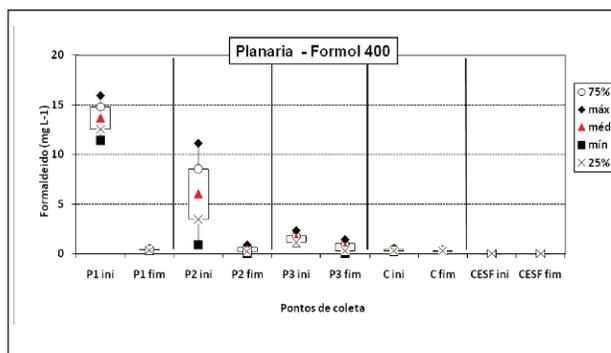
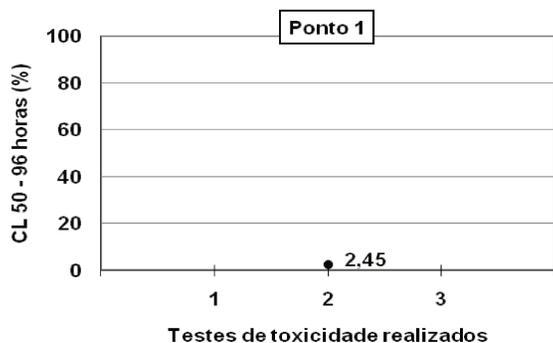
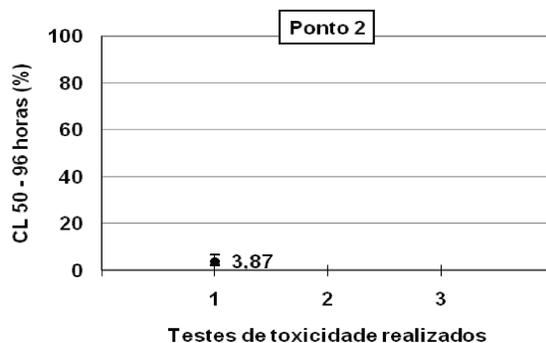


Figura 5.200: Concentração do Formaldeído, inicial e final, verificada nas soluções-teste para cada ponto de amostragem.

Os resultados de CE50/48 h para *G. tigrina* nos pontos de amostragem, com aplicação de 500 mg L⁻¹ de formaldeído estão representados na Figura 5.201 e 5.202.



(a)



(b)

Figura 5.201: Concentração letal a 50% dos organismos, obtida nos ensaios utilizando *G. tigrina* durante 96 h de exposição, a cada 20 dias na Fase 4: (a) Ponto 1; (b) Ponto 2.

O primeiro teste do Ponto 1 houve 100% de letalidade dos organismos-teste na menor concentração da solução-teste utilizada, 2%, por isso neste teste, o Ponto 1 foi considerado tóxico. Já no teste seguinte a toxicidade foi menor, porém ainda alta, visto que a CL50 foi menor que 3%.

No Ponto 2 foi obtido apenas um resultado válido, devido a instabilidade do efluente, porém o resultado obtido indica elevada toxicidade, com a CL50 menor que 4%.

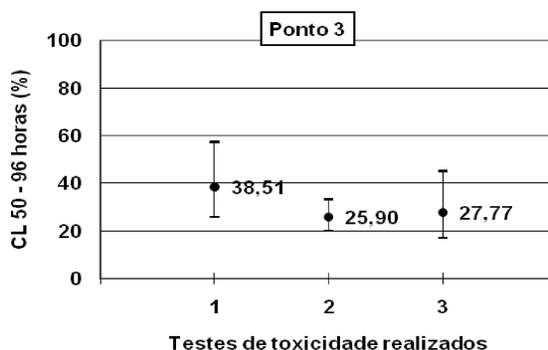


Figura 5.202: Concentração letal do Ponto 3 a 50% dos organismos, obtida nos ensaios utilizando *G. tigrina* durante 96 h de exposição, a cada 20 dias na Fase 4.

Pode ser visto no Ponto 3, Figura 5.502, que a toxicidade foi maior em relação aos testes passados e aumentou no período de estudo, isto pode ser devido principalmente pelo aumento da concentração de formaldeído no afluente do BAS que não foi totalmente reduzida, sendo detectada na saída do sistema (após decantação). Nos três testes realizados observa-se que há aumento na CL50 no teste 3 que pode indicar a adaptação da biomassa do BAS e recuperação no desempenho.

5.2.5 Avaliação geral da toxicidade do efluente

No decorrer do estudo, em cada alteração da concentração do formaldeído no afluente bruto do sistema, um número muito grande de resultados e informações foram obtidos. Neste item serão discutidas as respostas de cada organismo frente as diversas condições avaliadas no decorrer do trabalho.

O esgoto bruto contendo formaldeído foi altamente tóxico para os organismos-teste e esta toxicidade elevou-se com o aumento da concentração de formaldeído aplicada ao esgoto bruto. Os organismos foram bastante sensíveis e de acordo com os resultados obtidos, observa-se o aumento gradual da toxicidade em cada fase do estudo, sendo obtida na última fase a toxicidade a 50% dos organismos em concentrações das soluções-teste a partir de 1%. No geral, dentre os organismos-teste estudados a *P. subcapitata* e a *G. tigrina* foram as mais sensíveis, seguidas pela *D. similis* e *P. reticulata*.

O FA foi bastante susceptível às mudanças de concentração e a cada alteração na concentração de formaldeído, sendo necessário um período de adaptação da biomassa anaeróbia maior para assimilar o aumento da carga orgânica e da toxicidade devido ao formaldeído. Esta adaptação pôde ser observada nos testes de toxicidade do Ponto 2, onde ela foi reduzida ao longo do estudo. Alguns organismos responderam de diversas formas a esta adaptação, visto que a sensibilidade de cada espécie é diferente.

Na Fase 1, houve o estímulo do crescimento da *P. subcapitata* quando comparado ao controle, a *D. similis* apresentou a variação provocada pela adaptação com recuperação no final da Fase, fato que não foi observado para os demais organismos, visto que o Ponto 2 não apresentou toxicidade para a maioria dos testes com peixes e apresentou elevada toxicidade para planárias.

Na Fase 2, os resultados obtidos para a maioria dos organismos foram melhores que os da Fase 1, visto que houve a redução da toxicidade, exceto para a *G. tigrina* onde a toxicidade foi maior.

Na Fase 3 foi possível observar no início dos testes aumento da toxicidade, que contudo se reduziu ao longo desta fase de estudo. Vale ressaltar que cada organismo respondeu de forma diferenciada, sendo o organismo-teste *Daphnia* o que apresentou maior estabilidade de resultados para o Ponto 2.

Já na Fase 4, a adaptação da biomassa às novas condições foi melhor representada no teste de *P. reticulata*. Quanto a sensibilidade das espécies ao Ponto

2, a *G. tigrina* foi a mais sensível e a *D. similis* foi a menos sensível desde o início do estudo.

O Ponto 3, efluente tratado do sistema combinado, sofreu menor influência das alterações da concentração do formaldeído, devido ao eficiente tratamento do FA, reduzindo a toxicidade do efluente, exigindo menos da biomassa do BAS.

Analisando os resultados obtidos ao longo do estudo, observa-se que na Fase 1 o efluente apresentou toxicidade maior à *P. subcapitata* (CI50/96h acima da concentração de 50% da solução-teste) e não foi tóxico para os organismos.

Na Fase 2, O sistema melhorou o desempenho e em nenhum momento o efluente foi tóxico para *P. subcapitata*. A baixa toxicidade ocorreu apenas em um teste para a espécie *P. reticulata* no meio do período de estudo, provavelmente decorrente a adaptação do sistema, em virtude da existência de recuperação posterior. No caso da *G. tigrina*, a toxicidade pode ter sido ocasionada pelo aumento da carga orgânica, fato verificado pelo valor da DQO nesta amostragem.

A partir da Fase 3 o efluente passou a ser mais tóxico, principalmente para a alga. Para *P. reticulata* e *G. tigrina* observou-se o aumento da toxicidade no meio do período de estudo, porém após a adaptação à nova concentração o efluente voltou a não apresentar toxicidade. Na Fase 4 a toxicidade do efluente foi mais expressiva para a *G. tigrina*, enquanto que para *P. reticulata* foi menor. Em todas as fases do estudo, o efluente do sistema combinado não foi tóxico para a espécie *D. similis*, sendo esta a menos sensível e a *G. tigrina* a mais sensível.

Em relação ao sistema, os resultados dos testes de toxicidade comprovam que a robustez do FA frente ao tratamento de substâncias de caráter tóxico como o formaldeído. Verificou-se que o FA foi o responsável pela maior parte do tratamento e redução da toxicidade do formaldeído, cabendo ao BAS realizar o pós-tratamento, melhorando as qualidades do efluente do FA e reduzindo a concentração do formaldeído.

Foi observado que a partir de certo ponto o aumento da concentração de formaldeído, por menor que seja, causa aumento expressivo na toxicidade, como

pode ser visto na alteração da concentração da Fase 3 para a 4, onde o aumento de 100 mg L^{-1} na concentração inicial provocou a elevação da toxicidade.

A espécie *P. subcapitata*, também mostrou alta sensibilidade, no entanto com a degradação do efluente fazendo que os nutrientes ficassem disponíveis para assimilação das algas, houve alteração na resposta, já que ao invés de ocorrer a inibição do crescimento, havia a produção de biomassa acima do registrado para o controle. Esta interferência causada principalmente devido as elevadas concentrações de nitrato no Ponto 3, foi reduzida a medida que a concentração de formaldeído aumentou, desestabilizando o metabolismo das bactérias autotróficas nitrificantes, interferindo de forma negativa na nitrificação. Por mais que possa ter ocorrido interferência nos resultados, este fato pode ser útil em estudos de efluentes com elevada nitrificação, de forma a avaliar o potencial risco de eutrofização a ser provocado pelo lançamento de efluentes com alta concentração de nitrato. Sendo assim o comportamento da *P. subcapitata* nas Fases 1 e 2 indicou que o efluente tratado pode potencializar a eutrofização de corpos d'água, devido a elevada concentração de nitrato presente que provocou crescimento excessivo das algas.

A *D. similis*, apresentou maior sensibilidade ao Ponto 1, e menor no Ponto 2 sendo menos sensível que o peixe, que pertence a um nível maior na cadeia trófica. Porém o microcrustáceo mostrou-se menos susceptível à toxicidade provocada pela amônia, tanto no Ponto 2 como no Ponto 3, por isto não foi afetada. Mesmo não apresentando sensibilidade ao Ponto 3, o uso deste organismo foi importante para o monitoramento do comportamento do sistema, principalmente por ser o organismo com resposta mais rápida (48 h), e por indicar a variação da toxicidade, quando o sistema mostrou-se em fase de adaptação.

O peixe *P. reticulata*, apresentou boa sensibilidade em todo o teste nos pontos de amostragem estudados. Assim como a planária, o peixe também é um organismo que apresenta elevada toxicidade à amônia permitindo verificar nos testes a interferência da amônia nas toxicidades apresentadas no ponto 3.

Contudo podemos verificar que a espécie *G. tigrina* foi a mais sensível dentre os organismos-testes utilizados, principalmente quando o efluente apresentou

elevadas concentrações de amônia. Alonso e Camargo (2011), em um estudo de longo prazo com planárias da espécie *Polycelis felina*, comprova a sensibilidade deste organismo à amônia que causa alteração comportamental visto pela redução da velocidade de locomoção. Assim, estudos utilizando planárias devem ser mais difundidos e padronizados, pois trata-se de uma espécie altamente sensível a ser utilizada em testes, principalmente para águas residuárias.

A realização dos testes de toxicidade como forma de monitoramento comprovou que mesmo a caracterização do sistema utilizando as variáveis físicas e químicas indicando elevada eficiência do sistema, como foi visto pela redução da concentração de formaldeído e de matéria orgânica pela DBO e DQO, não representa o real efeito do lançamento do efluente no ambiente.

Verificou-se que em concentrações acima de 500 mg HCHO L⁻¹, o efluente passou a ser consideravelmente tóxico a dois organismos, e esta constatação, mesmo que o sistema não esteja adaptado totalmente, indica que se há a pretensão de aplicar uma concentração maior de formaldeído, deverão ser feitas melhorias tratamento para garantir a ausência de toxicidade efluente.

6 CONCLUSÕES

As conclusões obtidas foram:

Fases 1 e 2

- Devido ao longo tempo em que o sistema encontra-se em operação, este não apresentou alterações no comportamento e desempenho nestas duas fases, indicando alta estabilidade e adaptação da biomassa ao formaldeído.
- Mesmo com a concentração de formaldeído maior que a Fase 1, a Fase 2 (200 mg HCHO L⁻¹) mostrou-se mais estável e eficiente na redução das concentrações de formaldeído (100 ± 1 mg HCHO L⁻¹) e DQO (97,0 ± 2,4 mg L⁻¹) e na conversão do nitrogênio amoniacal em nitrito e nitrato.
- A variável mais limitante nestas fases foi a concentração de oxigênio dissolvido para manter a biomassa nitrificante em atividade realizando a conversão do nitrogênio amoniacal em nitrito e nitrato.
- Em ambas as fases a redução da concentração de DBO foram acima de 95% atendendo os padrões de lançamento de efluentes do Estado de São Paulo (Lei 997/76 – art.18), sendo o limite de lançamento de 60 mg O₂ L⁻¹, ou remoção de pelo menos 80% de DBO, e em esfera federal (CONAMA 430/2011) que determina a remoção mínima de 60%.

Fase 3

- O sistema combinado de tratamento FA/BAS mostrou-se adequado na redução da concentração de formaldeído com boa recuperação do sistema na Fase 3, com adição de 400 mg HCHO L⁻¹ ao esgoto bruto e obtido 99,8 ± 0,3% de eficiência na redução da concentração de formaldeído com média de 0,7 ± 1,3 mg HCHO L⁻¹ no efluente final.

- Considerando a legislação federal (CONAMA 430/2011) e do Estado de São Paulo (Lei 997/76 – art.18) o sistema manteve o desempenho atendendo os padrões de lançamento de efluentes, com redução da concentração de DBO de $98,5 \pm 0,8\%$ e com concentração de nitrogênio amoniacal de $14 \pm 19 \text{ mg NH}_3 \text{ L}^{-1}$.

Fase 4

- Na Fase 4, o sistema mostrou grande instabilidade à concentração de $500 \text{ mg HCHO L}^{-1}$. Até o fim do período de estudo, o sistema manteve elevada eficiência na redução de concentração de formaldeído de $99,2 \pm 0,3\%$, porém com concentração final no efluente de $3,8 \pm 1,3 \text{ mg HCHO L}^{-1}$.
- A nitrificação foi afetada pelo aumento da concentração de formaldeído, na Fase 5, verificado pela baixa concentração de nitrato no efluente ($10,4 \pm 7,4 \text{ mg NO}_3^- \text{ L}^{-1}$), e redução na conversão de nitrogênio amoniacal mantendo no efluente a média de $31 \pm 22 \text{ mg NH}_3 \text{ L}^{-1}$, acima da concentração máxima permitida para lançamento da legislação federal (CONAMA 430/2011).
- A redução da concentração de DBO pelo sistema manteve-se acima de 90%, sendo $99,2 \pm 0,3\%$ na Fase 4. Assim permaneceu adequada ao limite estabelecido para o lançamento de efluentes da legislação federal (CONAMA 430/2011) e estadual (Lei 997/76 – art.18).
- O filtro anaeróbio mostrou-se robusto no tratamento do formaldeído com esgoto sanitário sendo responsável pela maior porcentagem de assimilação das diferentes concentrações de formaldeído e variações de carga do esgoto sanitário.
- O BAS foi responsável por melhorar a qualidade do efluente do FA garantindo ao sistema eficiência acima de 90% na redução da concentração de formaldeído, DQO e DBO.

- A adição de alcalinidade ao sistema é necessária para suprir as necessidades da biomassa nitrificante e, principalmente quando o formaldeído é adicionado em elevadas concentrações, para garantir a estabilidade do valor do pH no FA.

Testes de toxicidade

- As espécies estudadas indicaram serem organismos-teste adequados a estudos de toxicidade de esgoto sanitário contendo formaldeído tratado pelo sistema combinado estudado.
- Pelos resultados obtidos nos testes de toxicidade aguda com a planária *G. tigrina*, conclui-se que a metodologia utilizada no teste de toxicidade aguda, foi viável.
- O efluente bruto contendo formaldeído, Ponto 1, foi altamente tóxico para os organismos-teste.
- A toxicidade foi reduzida ao longo do sistema e mesmo que para alguns organismos o efluente do FA tenha apresentado toxicidade, esta foi reduzida no BAS, verificando assim, a importância da combinação de ambos os processos, anaeróbio e aeróbio, de tratamento.
- O sistema combinado na configuração utilizada neste estudo, foi considerado adequado para a redução de toxicidade até a concentração de 400 mg HCHO L⁻¹.
- O período de 80 dias não foi suficiente para avaliar a adaptação do sistema após a adição da 500 mg HCHO L⁻¹ sendo necessário um período maior de monitoramento para verificar se há a redução da toxicidade.
- Nas Fases de 1 a 3, o efluente do sistema apresentou toxicidade aguda pouco significativa para *P. subcapitata*, *P. reticulata*; e *G. tigrina*, e na Fase 4 o efluente foi significativamente tóxico aos organismos: *P. subcapitata*, *P. reticulata* e *G. tigrina*.

- O efluente do sistema combinado não apresentou toxicidade aguda para *Daphnia similis* nas quatro fases do estudo com aplicação de 100, 200, 400 e 500 mg L⁻¹ de formaldeído, confirmando a importância da realização de testes de toxicidade com mais de 1 organismo de diferente nível trófico para obter um resultado mais confiável.
- As espécies *P. reticulata*, e *G. tigrina* apresentaram boa sensibilidade em todo o teste nos pontos de amostragem estudados e também apresentaram toxicidade à amônia permitindo verificar nos testes a interferência da amônia nas toxicidades apresentadas no Ponto 3.
- Em relação aos resultados obtidos no monitoramento do sistema até a Fase 3, da mesma forma que o sistema manteve boa eficiência enquadrando-se nos limites estabelecidos pelas legislações estadual e federal, não apresentou toxicidade significativa aos organismos-teste estudados. Com base nestes resultados pode-se dizer que o formaldeído até a concentração de 500 mg L⁻¹ pode ser misturado ao esgoto sanitário e submetido a esse sistema de tratamento e o efluente poderia ser lançado no ambiente respeitando às exigências da legislação federal (CONAMA 430/2011).
- Na Fase 4, o sistema mostrou-se instável até o fim do período de estudo, verificando tanto na operação quanto nas análises ecotoxicológicas, sendo necessário um tempo maior de monitoramento para avaliar a recuperação do desempenho.
- Os organismos-testes apresentaram sensibilidades diferentes quando expostos ao efluente tratado pelo sistema. A ordem crescente de sensibilidade do menos ao mais sensível verificada foi: *D. similis* < *P. reticulata* < *P. subcapitata* < *G. tigrina*. Assim, nessas condições de estudo os organismos que mais representaram o possível impacto causado pelo formaldeído foram *G. tigrina*, *P. subcapitata* e *P. reticulata*.

Este estudo utilizando um efluente real, permitiu o fornecimento de dados mais próximos da realidade sendo uma fonte de informação importante e necessária

para a avaliação de desempenho de um sistema de tratamento de efluentes. Quando este estudo está associado a avaliação ecotoxicológica faz-se ainda mais importante, pois não há muitos estudos dessa amplitude.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, A.O. **Reator com leito de biomassa aderida aerado parcialmente aplicado ao tratamento de esgoto sanitário**. 2010. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos.

ALONSO, A.; CAMARGO, J.A. The freshwater planarian *Polycelis felina* as a sensitive species to assess the long-term toxicity of ammonia. **Chemosphere**. 84: 533–537, 2011.

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

ARAUJO, C.V.M.; COHIN-DE-PINHO, S.J.; CHASTINET, C.B.A.; SANTOS, J.S.; DA SILVA, E.M. Discriminating the pH toxicity to *Poecilia reticulata* Peters, 1859 in the Dunas Lake (Camaçari, BA, Brazil). **Chemosphere**, 73, 365–370, 2008.

ARAUJO, F.G.; PEIXOTO, M.G.; PINTO, B.C.T.; TEIXEIRA, T.P. Distribution of guppies *Poecilia reticulata* (Peters, 1860) and *Phalloceros caudimaculatus* (Hensel, 1868) along a polluted stretch of the Paraíba do Sul River, Brazil. **Brazilian Journal of Biology**. 69 (1) : 41-48, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15088:2004**. Ecotoxicologia aquática – Toxicidade aguda – Método de ensaio com peixes – 19 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12648:2005**. Ecotoxicologia aquática – Toxicidade crônica – Método de ensaio com algas (*Chlorophyceae*) – 24 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12713:2009**. Ecotoxicologia aquática – Toxicidade aguda – Método de ensaio com *Daphnia spp.* – 23 p.

ATSDR. Toxicological Profile for Formaldehyde (Final Report). NTIS Accession No. PB99-166654. Atlanta, GA: **Agency for Toxic Substances and Disease Registry**. 451 p, 1999.

BARROS, G.S.; ANGELIS, D.F.; FURLAN, L.T.; CORRÊA-JUNIOR, B. Utilização de Planárias da Espécie *Dugésia* (*Girardia*) *tigrina* em Testes de Toxicidade de Efluentes de Refinaria de Petróleo. **Journal of Brazilian Society Ecotoxicology**: Curitiba, v.1, n 1, p. 67-70, 2006.

BATISTA, V.M. **Tratamento de esgoto sanitário contendo formaldeído utilizando filtro anaeróbio seguido de biofiltro aerado submerso: desempenho e avaliação da biomassa**. 2007. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil, Urbanismo e Arquitetura, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

BEATRICI, A.C.; ARENZON, A.; COIMBRA, N.J.; RAYA-RODRIGUEZ, M.T. Fertilidade e sensibilidade de *Daphnia similis* e *Daphnia magna* submetidas a diferentes cultivos. **Journal of the Brazilian Society of Ecotoxicology**, v. 1, n. 2, 123-126, 2006.

BERNET, N.; DELGENES, N.; AKUNNA, J.C.; DELGENES, J.P.; e MOLETTA, R. Combined anaerobic-aerobic SBR for the treatment of piggery wastewater. **Water Research**, v. 34, n. 2, p. 611-619, 2000.

BERTOLETTI, E. Sensibilidade de algumas espécies de peixes de água doce utilizadas no Brasil. **Journal of the Brazilian Society of Ecotoxicology**. v. 4, n. 1-3, 9-13, 2009

BEUX, S; NUNES, E; BARANA, A.C. Effect of temperature on two-phase anaerobic reactors treating slaughterhouse wastewater. **Braz. arch. biol. technol**; v.50, n. 6, p.1061-1072, 2007.

BODKHE, S. Development of an improved anaerobic filter for municipal wastewater treatment. **Bioresource Technology**. 99, 222–226, 2008.

BRASIL - Ministério da Saúde – MS. Agência Nacional de Vigilância Sanitária - ANVISA. - **Resolução nº 35 – Dispõe sobre conservantes permitidos para produtos saneantes**. De 29 de maio de 2008. Diário Oficial da União, Brasília, 3 de junho de 2008a.

BRASIL - Ministério da Saúde – MS. Agência Nacional de Vigilância Sanitária - ANVISA. - **Resolução nº 37 – Proíbe o uso de pastilhas contendo paraformaldeído ou formaldeído nos processos de desinfecção e esterilização**. De 29 de maio de 2008. Diário Oficial da União, Brasília, 3 de junho de 2008b.

BRASIL - Ministério do Meio Ambiente - MMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA - **Resolução nº 357 – Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências**. De 17 de março de 2005. Diário Oficial da União, Brasília, 18 de março de 2005, 23p.

BRASIL - Ministério do Meio Ambiente - MMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA - **Resolução nº 430 – Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA**. De 13 de maio de 2011. Diário Oficial da União, Brasília, 16 de maio de 2011a, 8 p.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego – MTE. **Norma Regulamentadora N°15 – Atividades e operações insalubres**. Diário Oficial da União, Brasília, 6 de julho de 1978. Disponível em: <http://www.mte.gov.br/legislacao/normas_regulamentadoras/nr_15.pdf>. Acesso em 09 jul. 2011b.

BURATINI S.V.; BERTOLETTI E.; ZAGATTO P.A. Evaluation of *Daphnia similis* as a test species in ecotoxicological assays. **Bull. Environ. Contam. Toxicol.**, 73, 878–882, 2004.

CALOTO-OLIVEIRA, A. **Toxicidade de elementos traço para consumidores primários na presença de exopolissacarídeos produzidos por organismos fitoplanctônicos**

(**Chlorophyceae e Cianophyceae**). 106f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

CAMPOS, J.L.; SÁNCHEZ, M.; MOSQUERA, A.; MÉNDEZ, R.; LEMA, J.M. Coupled BAS and anoxic USB system to remove urea and formaldehyde from wastewater. **Water Research**. 37: 3445-3451, 2003.

CARVALHO, K.S. **Influência do formol utilizado para conservação de cadáveres na obtenção de DNA nuclear em tecido muscular**. 2009. Defesa (mestrado) - Faculdade de Odontologia de Piracicaba, da Universidade Estadual de Campinas. Piracicaba.

CASTAGNATO, R. **Tratabilidade de esgoto sanitário contendo formaldeído em um sistema combinado filtro anaeróbio – biofiltro aerado submerso**. 2006. Dissertação (mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Universidade de Campinas, Campinas.

CHERNICARO, C.A.L. **Reatores anaeróbios**. 2º ed. – Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - UFMG, 2007. 380 p. (Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias; v. 5).

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. CETESB. **Microbiologia de Lodos Ativados**. Editora da CETESB, São Paulo, 2000.

CONSTABLE, M.; CHARLTON, F.; JENSEN, K.; MCDONALD, G.; CRAIG, G. e TAYLOR, K.W. An ecological risk assessment of ammonia in the aquatic environment. **Human and Ecological Risk Assessment**. 9 : 527-548, 2003.

COSTA, C.R.; OLIVI, P.; BOTTA, C.M.R.; ESPINDOLA, E.L.G.. A toxicidade em ambientes aquáticos: discussão e métodos de avaliação. **Química Nova [online]**. vol.31, n.7, pp. 1820-1830, 2008.

DANTZGER, M. **Fosfatases de *Daphnia similis* como biomarcadores da ecotoxicidade de agroquímicos**. 2010. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Biologia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

DILALLO, R.; ALBERTSON, O.E. Volatile acids by direct titration. **J. Water Pollution Control Federation**. v. 33, n. 4, p. 357-365, 1961.

DOMINGUES, L.M. **Sistema combinado filtro-anaeróbio-biofiltro aerado submerso: avaliação da partida e da nitrificação do esgoto sanitário**. 2005. 166f. Dissertação (Mestrado em Saneamento e Ambiente) – Faculdade de Engenharia Civil, Urbanismo e Arquitetura, Universidade de Campinas, Campinas.

EIROA, M., KENNES, M.C., VEIGA, M.C. Formaldehyde and urea removal in a denitrifying granular sludge blanket reactor. **Water Research**. 38, 3495-3502, 2004.

EIROA, M., KENNES, C., VEIGA, M.C.. Simultaneous nitrification and formaldehyde biodegradation in an activated sludge unit. **Bioresource Technology**. 96, 1914–1918, 2005a.

EIROA, M., VILAR, A., AMOR, L., KENNES, C., VEIGA, M.C. Biodegradation and effect of formaldehyde and phenol on the denitrification process. **Water Research**. 39, 449–455, 2005b.

FARAH, C.R.T. **Conjugação de processos físico-químicos (UV; H₂O₂; UV/H₂O₂; reagente de Fenton; foto-Fenton) e biológico (lodos ativados) para tratamento de águas residuárias contendo formol**. 2007. Tese (doutorado) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Universidade de Campinas, Campinas.

FARRE, M.; BARCELO, D. Toxicity testing of wastewater and sewage sludge by biosensors, bioassays and chemical analysis. **Trends in Analytical Chemistry**, Vol. 22, No. 5, 2003.
FERRAO-FILHO, A.D.S.; SOARES, M.C.S.; DE FREITAS MAGALHAES, V.; AZEVEDO, S.M.F.O. Biomonitoring of cyanotoxins in two tropical reservoirs by cladoceran toxicity bioassays. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, Volume 72, Issue 2, Pages 479-489, 2009.

FIGUEIREDO, M.G.; DOMINGUES, V.B. **Microbiologia de Lodos Ativados**. CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental.. São Paulo: CETESB, 48 p. 2000.

FOCO, M.L.R. **Filtro anaeróbio seguido de biofiltro aerado submerso: produção de biomassa, conversão de matéria orgânica e de nitrogênio**. 2010. Defesa (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Universidade de Campinas, Campinas.

FONTANA, H. **Pós-tratamento de esgoto sanitário com biofiltro aerado submerso preenchido com carvão granular : desempenho técnico e estudo de viabilidade econômica**. 2007. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos.

FORNERIS, L. Platelminhos Turbelários. In: JOLY, C.A.; BICUDO, C.E.M. (Orgs.). **Biodiversidade do estado de São Paulo. Síntese do conhecimento ao final do século XX**. (Vol 4: Invertebrados de Água Doce). FAPESP, São Paulo, pags. 18-23, 1999.

GAETE, H.; ARANGUIZ, F.; CIENFUEGOS, G.; TEJOS, M. Metales pesados y toxicidad de aguas el Río Aconcagua en Chile. **Quimica Nova**, Vol. 30, No. 4, 885-891, 2007.

GARBOSSA, L.H.P.; LAPA, K.R.; ZAIAT, M.; FORESTI, E. Development and evaluation of a radial anaerobic reactor treating organic matter and nitrogen in sewage. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, Brasil, v. 22, n. 04, p. 511-519, 2005.

GARRIDO, J.M., MENDEZM, R., LEM, J.M. Simultaneous urea hydrolysis, formaldehyde removal and denitrification in a multifed upflow filter under anoxic and anaerobic conditions. **Water Research**. Vol. 35, No. 3, pp. 691-698, 2001.

GONÇALVES, R.F.; CHERNICARO, C.A.L.; ANDRADE NETO, C.O.; ALÉM SOBRINHO, P.; KATO, M.T.; COSTA, R.H.R.; AISSE, M.M.; ZAIAT, M. Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios por reatores com biofilme. in: CHERNICARO, C.A.L. (Coord.). **Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios**. Belo Horizonte: Projeto PROSAB, 2001. Cap.4. p. 171-271.

HAMILTON, M.A., RUSSO, R.C. Y THURSON, R.V. Trimmed Spearman-Karber method for estimating median lethal concentrations in toxicity bioassays. **Environmental Science Technology**. 11(7): 714-719, 1977.

HERNANDO, M.D; FERNANDEZ-ALBA, A.R; TAULER, R; BARCELO, D. Toxicity assays applied to wastewater treatment. **Talanta** 65: 358-366, 2005.

HOHREITER, D.W.; RIGG, D.K. Derivation of ambient water quality criteria for formaldehyde, **Chemosphere** 45 pp. 471–486, 2001.

HORVAT, T.; KALAFATIC, M.; KOPJAR, N.; KOVACEVIC, G. Toxicity testing of herbicide norflurazon on an aquatic bioindicator species-the planarian *Polycelis felix* (Daly). **Aquatic Toxicology**, v.73, p. 342-352, 2005.

IARC – International Agency for Research on Cancer. Wood Dust and Formaldehyde. **Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risk of Chemicals to Humans**. vol. 262. Lyon, France. 478 pp, 2006.

IANNACONE, J, ONOFRE, R; HUANQUI, O. Efectos ecotoxicológicos del cartap sobre *Poecilia reticulata* "guppy" (Poeciliidae) y *Paracheirodon innesi* "neon tetra" (Characidae). **Gayana** (Concept.), vol.71, n.2, p.170-177, 2007.

INCA – Instituto Nacional de Câncer. Disponível em: <http://www.inca.gov.br/conteudo_view.asp?id=795> Acesso em: 20/09/2009.

JONES, M.N. Nitrate reduction by shaking with cadmium: Alternative to cadmium columns. **Water Research** 18, Pages 643-646, 1984.

JORDÃO, E.P.; PESSOA, C.A. **Tratamento de esgotos domésticos** - 5ª ed. Rio de Janeiro. ABES, 2009.

KACZALA, F., MARQUES, M., HOGLAND, W. Biotreatability of wastewater generated during machinery washing in a wood-based industry: COD, formaldehyde and nitrogen removal. **Bioresource Technology**. 101. 8975-8983, 2010.

KASSAB, G.; HALALSHEH, M.; Klapwijk, A.; FAYYAD, M.; van LIER, J. Sequential anaerobic-aerobic treatment for domestic wastewater- A review. **Bioresource Technology** 101, pp. 3299-3310, 2010.

MA, J.; WANG, P.; CHEN, J.; SUN, Y. Differential Response of Green *Pseudokirchneriella subcapitata quadricauda*, *Scenedesmus obliquus* and *Chlorella pyrenoidosa*. **Polish Journal of Environmental Studies** Vol. 16, No. 6, 847-851, 2007.

MARTINS, J; OLIVA TELES, L; VASCONCELOS, V Assays with *Daphnia magna* and *Danio rerio* as alert systems in aquatic toxicology. **Environ Intern** 33: 414–425, 2007.

MERINO, L. Development and Validation of a Method for Determination of Residual Nitrite/Nitrate in Foodstuffs and Water Zinc Reduction. **Food Anal. Methods** 2:212–220, 2009.

MOREIRA S.M.; MOREIRA-SANTOS, M.; RENDÓN-VON OSTEN, J.; da SILVA, E.M.; RIBEIRO, R.; GUILHERMINO, L.; SOARES, A.M.V.M. Ecotoxicological tools for the tropics: Sublethal assays with fish to evaluate edge-of-field pesticide runoff toxicity. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, Vol.73, pp.893-899, 2010.

MOTELEB, M.A.; SUIDAN M.T.; KIM J.; MALONEY S.W.. Pertubated loading of a formaldehyde waste in an anaerobic granular activated carbon fluidized bed reactor. **Water Research** 36: 3775-3785, 2002.

MOUSSAVI, G.; YAZDANBAKHSB, A.; HEIDARIZADA, M. The removal of formaldehyde from concentrated synthetic wastewater using $O_3/MgO/H_2O_2$ process integrated with the biological treatment. **Journal of Hazardous Materials** 171 907–913, 2009.

MOUSSAVI, G.; HEIDARIZADA, M. Biodegradation of mixture of phenol and formaldehyde in wastewater using a single-basin MSCR process. **Journal of Biotechnology**. 150, 240–245, 2010.

MOUSSAVI, G.; HEIDARIZADA, M. The performance of SBR, SCR, and MSCR for simultaneous biodegradation of high concentrations of formaldehyde and ammonia. **Separation and Purification Technology**. 77,187–195, 2011.

NEWMAN, M.; UNGER, M.A. **Fundamentals of Ecotoxicology**. CRC Press; 2010, 3rd edition.

NIOSH Manual of Analytical Methods, 2nd ed., V.1, P&CAM 125, **U.S. Department of Health, Education, and Welfare**, Publ. 77-157-A (1977).

NOUR, E.A.A.; BARRETTO, A.S.; CANDELLO, F.P.; DOMINGUES, L.M.; SANTOS, E.M.R.. Uso de sistema combinado filtro anaeróbio seguido de biofiltro aerado submerso no tratamento de esgoto sanitário contendo formaldeído. In: **26º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, 2011, Porto Alegre, RS. ABES-Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2011.

OECD SIDS initial assessment report for SIAM 14: Formaldehyde. **Paris, Organisation for Economic Co-operation and Development**, 2002.

OLIVEIRA, S.V.W; MORAES, E.M.; ADORNO, M.A.T.; VARESCHE, M.B.A.; FORESTI, E.; ZAIAT, M. Formaldehyde degradation in an anaerobic packed-bed bioreactor. **Water Research**, vol.38, pp.1685-1694, 2004.

PEREIRA, N.S; ZAIAT, M. Degradation of Formaldehyde in Anaerobic Sequencing Batch Biofilm Reactor (ASBBR). **Journal of Hazardous Materials**, v. 163, p. 777-782, 2008.

PONTES, A.F.V. **Avaliação de desempenho de reator anaeróbio-aeróbio com recirculação da fase líquida no tratamento de água residuária proveniente de abatedouro de aves**. 2009. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2009.

PRÁ, D.; LAU, A.H.; KNAKIEVICZ, T.; CARNEIRO, F.R.; ERDTMANN, B. Environmental genotoxicity assessment of an urban stream using freshwater planarians. **Mutation Research**, v. 585, n. 1–2, p. 79–85, 2005.

PREZA, D.L.C., SMITH, D.H. Use of newborn *Girardia tigrina* (Girard, 1950) in acute toxicity tests. **Ecotoxicology and Environmental Safety** 50, 1–3, 2001.

PRIYA, K.R., SANDHYA, S., SWAMINATHAN, K. Kinetic analysis of treatment of formaldehyde containing wastewater in UAFB reactor. **Chemical Engineering Journal**. 148, 212–216, 2009.

RAMÍREZ, R.P.; MENDOZA, C.A. (compiladoras). **Ensayos toxicológicos para la evaluación de sustancias químicas en agua y suelo. La experiencia en México**. Instituto Nacional de Ecología – Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales - SEMARNAT, México, D.F., 2008.

RIPLEY, L.E.; BOYLE, W.C., CONVERSE, J.C. Improved alkalimetric monitoring for anaerobic digestion of high-strength wastes. **J. Water Pollution Control Federation**. v. 58, n. 5, p. 406-411, 1986.

ROCHA, O.; GÜNTZEL, A. Crustáceos Branquiópodos. In: JOLY, C.A.; BICUDO, C.E.M. (Orgs.). **Biodiversidade do estado de São Paulo. Síntese do conhecimento ao final do século XX**. (Vol 4: Invertebrados de Água Doce). FAPESP, São Paulo, pags. 107-120, 1999.

SHAW, J.R., *et al.* *Daphnia* as an emerging model for toxicological genomics. In: **Advances in experimental biology on toxicogenomics**. eds. C. Hogstrand and P. Kille. Elsevier Press. Volume 2:165-219, 2008.

SOUPILAS, A., PAPADIMITRIOU, C.A., SAMARAS, P., GUDULAS, K., PETRIDIS, D. Monitoring of industrial effluent ecotoxicity in the greater Thessaloniki area. **Desalination** 224, 261–270, 2008.

TCHOBANOGLIOUS, G.; BURTON, F.L.; STENSEL, H.D. **Wastewater Engineering: Treatment and Reuse** / Metcalf & Eddy Inc. New York, NY: McGraw-Hill, 2003, 1819p.

US ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). **OPPTs 850.5400**. Ecological Effect Test Guidelines, Algal Toxicity. 1996.

VON SPERLING, M. **Lodos Ativados**. 2º ed. – Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG, 2002. 428 p. (Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias; v.4).

VON SPERLING, M. **Princípios básicos do tratamento de esgotos**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; UFMG, 1996. 211 p. (Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias; v.2).

WALKER, C.H.; HOPKIN, S.P.; SIBLY, R.M.; PEAKALL, D.B. **Principles of Ecotoxicology**, 3rd ed.;CRC: Boca Raton, FL: Taylor & Francis, 2006.

ZAGATTO, P.A.; BERTOLETTI, E. **Ecotoxicologia aquática – Princípios e aplicações.**
478 p. São Carlos: RIMA, 2006.