



Universidade Federal de Pernambuco
Centro de Tecnologia e Geociências
Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil
Área de Concentração em Tecnologia Ambiental e
Recursos Hídricos



Jaqueline Cabral Lopes

APLICAÇÃO DE REATORES HÍBRIDOS AERÓBIOS PARA O PÓS
TRATAMENTO DE REATORES ANAERÓBIOS ENFOCANDO A
NITRIFICAÇÃO DO SISTEMA

ORIENTADORES:

Prof^a. Dr^a. Maria de Lourdes Florêncio dos Santos (Orientador)

Prof^a. Dr^a Sávvia Gavazza dos Santos (Co-orientadora)

Recife - PE
Março de 2009

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

Jaqueline Cabral Lopes

APLICAÇÃO DE REATORES HÍBRIDOS AERÓBIOS PARA O PÓS
TRATAMENTO DE REATORES ANAERÓBIOS ENFOCANDO A
NITRIFICAÇÃO DO SISTEMA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, em cumprimento às exigências para a obtenção do grau de Mestre.

Área de Concentração: Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos

Orientadores:

Prof^a. Dr^a. Maria de Lourdes Florêncio dos Santos (Orientador)

Prof^a. Dr^a Sávía Gavazza dos Santos (Co-orientadora)

Recife - PE
Março de 2009

L864a

Lopes, Jaqueline Cabral.

Aplicação de reatores híbridos aeróbicos para o pós tratamento de reatores anaeróbicos enfocando a nitrificação do sistema / Jaqueline Cabral Lopes.-Recife: O Autor, 2009.
xiv, 90 folhas, il : tabs.,grafs.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2009.

Inclui Bibliografia e Apêndice.

1. Reator híbrido. 2.Nitrificação. 3.Desnitrificação. 4. Remoção de Matéria Orgânica. I. Título.

UFPE

**APLICAÇÃO DE REATORES HÍBRIDOS AERÓBIOS PARA O
PÓS-TRATAMENTO DE REATORES ANAERÓBIOS
ENFOCANDO A NITRIFICAÇÃO DO SISTEMA**

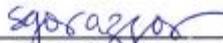
Jaqueline Cabral Lopes

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO COMO PARTE INTEGRANTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS À OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL

Aprovada por:



Maria de Lourdes Florêncio dos Santos, Ph. D.
(Orientador)



Sèvia Gavazza dos Santos Pessôa, D. Sc.
(Co-Orientador)



Cíbero Onofre de Andrade Neto, D. Sc.
(Examinador Externo)



Alessandra Carla Oliveira Chagas Spinelli, D. Sc.
(Examinador Externo)

Recife, PE – Brasil
Março de 2009

Dedico esse estudo

A família e aos amigos, que foram
indispensáveis neste momento da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Mauricio Pimenta, que me ajudou muito na realização deste trabalho. Aos colegas e amigos do Laboratório de Saneamento Ambiental, em especial a Polyana, Marcio, Daniele, Pedro, Victor e Kenia, que trabalharam diretamente comigo.

As orientadoras, Lourdinha Florêncio e Sália Gavazza, ao técnico do LSA Ronaldo Fonseca, ao operador a Estação de Tratamento e Efluentes da Mangueira (ETE Mangueira) Edmilson e a todas as pessoas que me ajudaram e contribuíram direta ou indiretamente para a realização desta dissertação.

Aos meus pais e minha irmã que nunca mediram esforços em apoiar os meus estudos

Aos meus amigos de forma especial a Janaína pessoa muito importante na minha jornada em solo pernambucano.

Ao Programa de Pesquisa em Saneamento Básico (PROSAB) da UFPE do qual foram obtidos os dados presente neste trabalho.

Ao Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq) pela concessão da bolsa de estudo.

À FINEP – Financiadora de Estudos e Projetos pelos os recursos financeiros.

A FIBRA TECNICA, responsável pela construção e implantação dos reatores pilotos.

SUMÁRIO

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	viii
LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABELAS	xi
RESUMO	xiii
ABSTRACT	xiv
1 INTRODUÇÃO	15
2 OBJETIVOS	16
2.1 Objetivo geral.....	16
2.2 Objetivos específicos	16
3 REVISÃO DE LITERATURA	17
3.1 Nitrogênio em efluentes domésticos	17
3.2 Remoção biológica do nitrogênio.....	20
3.3 Reatores híbridos.....	28
3.3.1 Reatores UASB – <i>Upflow Anaerobic Sludge Blanket</i>	29
3.3.2 Filtro anaeróbio ascendente com leito submerso	29
3.3.3 Reator de lodos ativados.....	30
3.3.4 Biofiltro aerado submerso.....	30
4 METODOLOGIA	33
4.1 Localização do experimento em escala piloto.....	33
4.2 Reatores em escala piloto.....	33
4.2.1 Reatores anaeróbios	35
4.2.2 Reatores aeróbios	36
4.3 Monitoramento do experimento em escala piloto.....	36
4.4 Delineamento experimental do experimento em escala piloto	39
4.5 Experimento em escala de bancada.....	40
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	42
5.1 Monitoramento dos reatores	42
5.1.1 Lodo de inoculação	44
5.1.2 Temperatura, pH, alcalinidade e AGV.....	45
5.1.3 Sulfato, fósforo.....	51
5.1.4 Coliformes fecais e helmintos.....	52
5.1.5 Sólidos.....	53
5.1.6 DQO e DBO	55
5.1.7 Nitrogênio	58
5.2 Perfis dos reatores.....	63
5.3 Experimento de bancada	68
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	71
7 CONCLUSÕES	78
8 SUGESTÕES	80
9 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	81
10 APÊNDICE	85
10.1 Dados estatísticos.....	85

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

A	Afluente do sistema
AE1	Reator aeróbio 1
AE1.1	Reator aeróbio 1 fase 1
AE1.2	Reator aeróbio 1 fase 2
AE2	Reator aeróbio 2
AE2.1	Reator aeróbio 2 fase 1
AE2.2	Reator aeróbio 2 fase 2
AGV	Ácidos Graxos Voláteis
Alc P	Alcalinidade Parcial
Alc T	Alcalinidade Total
AME	Atividade Metanogênica Específica
ANA1	Reator anaeróbio 1
ANA1.1	Reator anaeróbio 1 fase 1
ANA1.2	Reator anaeróbio 1 fase 2
ANA2	Reator anaeróbio 2
ANA2.1	Reator anaeróbio 2 fase 1
ANA2.2	Reator anaeróbio 2 fase 2
ANAMMOX	Anaerobic Ammonium Oxidation
C/N	Relação carbono nitrogênio
CaCO ₃ ⁻	Carbonato de Cálcio
COMPESA	Companhia Pernambucana de Saneamento
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
Cond.	Condutividade
DBO _b	Demanda Bioquímica de Oxigênio bruta
DBO _f	Demanda Bioquímica de Oxigênio filtrada
DQO _b	Demanda Química de Oxigênio bruta
DQO _f	Demanda Química de Oxigênio filtrada
ETE	Estação de Tratamento de Efluentes
FIA	Flow Injection Analysis
LSA	Laboratório de Saneamento Ambiental
N – NH ₃	Nitrogênio na forma de amônia

N - NO ⁻²	Nitrogênio na forma de nitrito
N -NO ₃ ⁻	Nitrogênio na forma de nitrato
N ₂	Nitrogênio gasoso
N ₂ O	Óxido nitroso
NH ₃	Amônia
NH ₄ ⁺ :	Íon amônio
NO	Óxido nítrico
NO ₂	Íon nitrito ⁻
NO ⁻³	Íon Nitrato
NTK	Nitrogênio Total Kjeldahl
OD	Oxigênio Dissolvido
OLAND	Oxygen Limited autotrophic Nitrification Denitrification
P	Fósforo
pH	Potencial Hidrogeniônico
RDNA	Redução Dissimilativa de Nitrato a Amônia
rpm	Rotações por minuto
S	Sulfato
SHARON	Single reactor system for High Ammonia Removal Over Nitrite
SN	Short Nitrification
SND	Simultaneous Nitrification Denitrification.
SSF	Sólidos Suspensos Fixos
SST	Sólidos Suspensos Totais
SSV	Sólidos Suspensos Volateis
ST	Sólidos Totais
STF	Sólidos Totais Fixos
STV	Sólidos Totais Voláteis
TDH	Tempo de Detenção Hidráulica
TDS:	Sólidos Totais Dissolvidos
Temp.	Temperatura
UASB	Upflow Anaerobic Sludge Blanket

LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1 Esquema geral dos reatores utilizados na pesquisa e reatores <i>in loco</i>	34
Figura 4.2 - Meio suporte - conduítes inteiros e anéis cortados.	34
Figura 4.3 - Inoculação dos reatores anaeróbios.	35
Figura 4.4 - Pontos de coleta.	37
Figura 5.1 – Gráfico do teste de AME do lodo de inóculo.	44
Figura 5.2 – Gráfico do teste de AME do lodo dos reatores anaeróbios final da fase 1.	44
Figura 5.3 - Valores de pH nos reatores do conjunto 1.	46
Figura 5.4 – Valores de pH nos reatores conjunto 2.	47
Figura 5.5 - Variação temporal da alcalinidade.	49
Figura 5.6- Variação temporal de AGV.	50
Figura 5.7 – Variação temporal da DQO bruta.	55
Figura 5.8 - Resumo da concentração de DBO bruta.	57
Figura 5.9 – Resumo da concentração de DBO filtrada.	58
Figura 5.10 - Variação temporal de nitrato - fase 1.	61
Figura 5.11 - Variação temporal do nitrato - fase 2.	61
Figura 5.12 - Balanço de massa de nitrogênio.	62
Figura 5.13 - Variação temporal de nitrito.	63
Figura 5.14 - Perfil de DQO filtrada ao longo da altura dos reatores.	64
Figura 5.15 - Perfil de STV nos reatores anaeróbios ao longo da altura dos reatores.	65
Figura 5.16 - Perfil de STV nos reatores aeróbios ao longo da altura dos reatores.	66
Figura 5.17 - Perfil de nitrogênio ao longo da altura dos reatores.	67
Figura 5.18 - Degradação temporal do nitrato – teste de bancada.	69
Figura 6.1 - Resumo da concentração de SSV.	72
Figura 6.2 – Resumo da concentração de DQO bruta.	73
Figura 6.3 – Resumo da concentração de DQO filtrada.	74
Figura 6.4 – Resumo da concentração de nitrato nos períodos de estabilidades.	76
Figura 6.5 - Percentual de dados que atenderam ao padrão de lançamento de efluentes em relação a nitrogênio amoniacal.	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Concentração limite de nitrogênio estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 357 de 17 de março de 2005, para as águas do território nacional	18
Tabela 3.2 - Estequiometria da nitrificação	20
Tabela 3.3 - Influência dos parâmetros operacionais no processo de nitrificação	21
Tabela 3.4 - Expressão matemática da desnitrificação e da RDNA	23
Tabela 3.5 - Influência dos parâmetros operacionais no processo de desnitrificação .	24
Tabela 3.6 - Estequiometria do processo ANAMMOX.	25
Tabela 3.7 - Comparação da remoção de nitrogênio pelo processo convencional e SHARON, utilizando como fonte de carbono o etanol.....	26
Tabela 4.1 Resumo das características dos reatores	36
Tabela 4.2 - Análises e métodos utilizados no monitoramento dos reatores.....	38
Tabela 4.3 – Resumo dos tratamentos.	39
Tabela 4.4 - Resumo dos reatores utilizado no experimento de bancada para avaliação da desnitrificação.....	41
Tabela 5.1 – Problemas operacionais ocorridos na estação de tratamento durante o período da pesquisa.	42
Tabela 5.2 – Características dos afluentes.	43
Tabela 5.3 - Resumo da temperatura nos reatores.....	45
Tabela 5.4 - Resumo da alcalinidade parcial.	47
Tabela 5.5 - Resumo da alcalinidade total.	48
Tabela 5.6 - Resumo da concentração de AGV.....	50
Tabela 5.7 - Resumo da concentração de sulfato.....	51
Tabela 5.8 - Resumo da concentração de fósforo.	52
Tabela 5.9 – Resumo da remoção de helmintos.....	53
Tabela 5.10 - Resumo da concentração SSV	54
Tabela 5.11 - Resumo da concentração de DQO bruta	56
Tabela 5.12 - Resumo da concentração DQO filtrada.....	56
Tabela 5.13 - Resumo da concentração de NTK.	59
Tabela 5.14 - Resumo da concentração de NH ₄	59
Tabela 5.15 - Resumo da concentração de nitrato.	60
Tabela 5.16 - Resumo da concentração de nitrito.....	63
Tabela 5.17 – Porcentagem de nitrato produzida no reator e no filtro.....	68
Tabela 5.18 - Quantidade de nitrato degradada considerando TDH de 8 horas.....	70
Tabela 6.1 - Eficiência de remoção de matéria orgânica	75

Tabela 6.2 – Resumo da concentração de nitrato nos reatores aeróbios durante períodos de estabilidade.....	76
Tabela 10.1 - Dados estatístico diferença entre os tratamentos (Parte 1).....	85
Tabela 10.2 - Diferença significativa entre os tratamentos (Parte 2).	86
Tabela 10.3 - Dados estatísticos (Parte 3).....	87
Tabela 10.4 - Dados estatísticos (Parte 4).....	88
Tabela 10.5 – Analise a variância entre o afluente da Fase 1 e Fase 2 (Parte 1).	89
Tabela 10.6 - Analise a variância entre o afluente da Fase 1 e Fase 2 (Parte 2).	90

RESUMO

APLICAÇÃO DE REATORES HÍBRIDOS AERÓBIOS PARA O PÓS TRATAMENTO DE REATORES ANAERÓBIOS ENFOCANDO A NITRIFICAÇÃO DO SISTEMA

Jaqueline Cabral Lopes Engenheira Civil; formada pela UFAL aluna do Programa Pós Graduação em Engenharia Civil Área de Concentração em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos UFPE

Este trabalho avaliou a aplicação de reatores híbridos na remoção simultânea de carbono e nitrogênio. Foram utilizados dois conjuntos de reatores formados por reator anaeróbio (UASB + Filtro anaeróbio) e reator aeróbio (Lodos ativados + Biofiltro aerado submerso). O tempo de detenção hidráulica (TDH) dos reatores anaeróbios foi fixado em 8 horas enquanto um reator aeróbio operou com TDH de 8 horas e outros de 4, o experimento foi dividido em duas fases com e sem recirculação. Quando operado sem recirculação os reatores anaeróbios obtiveram eficiência de DQObruta de 83% com a recirculação a eficiência diminuiu para 79%, a adição do reator aeróbio com THD de 4 horas não apresentou melhoria significativa na remoção de matéria orgânica, o reator aeróbio com TDH de 8 horas melhorou em 6 pontos percentuais a eficiência em ambas as fases. Com relação à nitrificação os reatores aeróbios apresentaram comportamento semelhante após a formação da biomassa, a alcalinidade presente no efluente foi suficiente para auxiliar a nitrificação. Na fase 2 todo o nitrato recirculado foi desnitrificado, o carbono presente no meio foi suficiente para a desnitrificação, o efluente apresentou concentração de nitrato inferiores a 8 mg/L, 88% dos dados, do reator aeróbio com TDH de 8 horas, atenderam ao padrão estabelecido pela CONAMA 379/2008 em relação ao nitrogênio amoniacal o percentual foi de 70% para reator com TDH de 4 horas.

Palavras chaves: reator híbrido, nitrificação, desnitrificação, remoção de matéria orgânica.

ABSTRACT

APLICAÇÃO DE REATORES HÍBRIDOS AERÓBIOS PARA O PÓS TRATAMENTO DE REATORES ANAERÓBIOS ENFOCANDO A NITRIFICAÇÃO DO SISTEMA

Jaqueline Cabral Lopes Engenheira Civil; formada pela UFAL aluna do Programa Pós Graduação em Engenharia Civil Área de Concentração em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos UFPE

This study evaluated the application of hybrid reactor in simultaneous removal of carbon and nitrogen. It used two sets of reactors formed by anaerobic reactor (UASB + Filter anaerobic) and aerobic reactor (activated sludge + aerated biofilter). The hydraulic retention time (HRT) of the anaerobic reactors was at 8 hours as an aerobic reactor operated with HRT, 8 hours and 4 others from the experiment was divided into two phases with and without recirculation. When operated without recycling the anaerobic reactors were COD of efficiency of 83% with the recycling efficiency decreased to 79%, the addition of aerobic reactor with HRT of 4 hours showed no significant improvement in the removal of organic matter in the aerobic reactor of HRT 8 hours increased by 6 percentage points in efficiency in both phases. With respect to the nitrification aerobic reactors showed similar behavior after the formation of biomass, the alkalinity in the effluent was enough to help nitrification. In Phase 2 all the nitrate was denitrified recirculation, the carbon present in the medium was sufficient for denitrification, the effluent concentration of nitrate had less than 8 mg / L, 88% of the data, the aerobic reactor with HRT, 8 hours, attended the standards established by CONAMA 379/2008 in relation to ammonia nitrogen, the percentage was 70% for reactor with HRT for 4 hours.

Keywords: hybrid reactor, nitrification, denitrification, the removal of organic matter.

1 INTRODUÇÃO

Os problemas gerados pelo não tratamento ou tratamento inadequado dos efluentes domésticos é um tema bastante discutido na atualidade. Diversos trabalhos foram realizados na busca de soluções práticas e econômicas para o tratamento de efluentes que melhor se adéque aos aspectos climáticos e socioeconômicos do Brasil. Porém muitos destes trabalhos visam apenas à remoção de matéria orgânica e microorganismos patogênicos, não se preocupando com a remoção de nutrientes (nitrogênio e fósforo).

A remoção biológica do nitrogênio é convencionalmente obtida pelos processos de nitrificação e desnitrificação que ocorrem em ambientes aeróbio e anóxico, respectivamente. Geralmente as estações de tratamento que fazem a remoção biológica de nitrogênio utilizam de três unidades de tratamento distintas, reator anaeróbio, reator aeróbio e reator anóxico. Este tipo de configuração requer a ocupação de áreas relativamente grandes para sua implantação.

No ramo da remoção de nitrogênio, pesquisas estão sendo realizadas na busca da minimização da energia introduzida no sistema para a aeração, assim como a fonte de carbono necessária ao processo de desnitrificação. Porém estes processos requerem um controle muito rígido de alguns parâmetros tais como pH, temperatura e oxigênio dissolvido, necessitando então de mão-de-obra mais qualificada. Muitas dessas pesquisas encontram-se em escala de laboratório ou piloto.

Então, apesar dos avanços tecnológicos relacionados à remoção de nitrogênio, ainda é importante a busca por sistemas que associem o processo de nitrificação e desnitrificação à minimização de área e facilidade operacional.

O presente trabalho avalia o processo de nitrificação utilizando reatores pilotos híbridos aeróbios no pós-tratamento de reatores anaeróbios, além de realizar uma avaliação da desnitrificação considerando quatro diferentes taxas de recirculação em um experimento de bancada.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliação da remoção simultânea de carbono e nitrogênio utilizado reatores híbridos anaeróbios e aeróbios no tratamento de efluente doméstico.

2.2 Objetivos específicos

- Avaliar a eficiência do pós-tratamento de reatores híbridos aeróbios;
- Avaliar os fatores e as condições operacionais do sistema;
- Avaliar a contribuição dos componentes dos reatores híbridos (lodos ativados e biofiltro aerado submerso) para o processo de nitrificação;
- Avaliar o processo de desnitrificação relacionando-o com diferentes taxas de recirculação;
- Avaliar o processo de desnitrificação relacionando-o com diferentes concentrações de biomassa.

3 REVISÃO DE LITERATURA

Este capítulo apresenta uma breve revisão sobre a presença de nitrogênio em efluente doméstico, apresentando sua importância e formas de tratamento e ainda as vantagens da utilização de reatores híbridos em estações de tratamento de efluentes (ETE).

3.1 Nitrogênio em efluentes domésticos

A presença de nitrogênio em efluente doméstico tem como principal origem a hidrólise da uréia e a presença de proteínas. Em média o efluente doméstico apresenta concentração de nitrogênio orgânico entre 10 e 25 mg/L. Este valor tende a variar de acordo com as condições climáticas e aspectos socioeconômicos da região.

A presença de nitrogênio é importante para as ETE que possuem etapas biológicas de tratamento, pois, como macronutriente essencial, o desenvolvimento dos microorganismos está diretamente relacionado à sua presença.

De modo geral, as ETE enfrentam problemas relacionados ao excesso de nitrogênio em seus efluentes, sendo necessária uma etapa de tratamento destinada especificamente para sua remoção (tratamento terciário). Isso decorre do consenso geral em relação aos prejuízos ambientais promovidos pelo excesso de nutrientes em corpos d'água, que é a disposição final da maioria dos efluentes tratados.

O principal efeito negativo do excesso de nutriente em corpos d'água é à eutrofização e suas conseqüências, a exemplo de problemas estéticos, criação de condições anaeróbias, eventual mortandade de peixes, elevação nos custos de tratamento de água, problemas no abastecimento industrial e com a toxicidade das algas (CETESB, 2008).

A resolução CONAMA 397/2008, que altera o inciso II do § 4º e a Tabela X do § 5º, ambos do art. 34 da Resolução do CONAMA nº 357 de 2005, que dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, limita como padrão de emissão de nitrogênio amoniacal 20,0 mg N/L, porém esta mesma resolução traz no Artigo 34 § 7º que o parâmetro nitrogênio amoniacal total não será aplicável em sistemas de tratamento de esgotos sanitários.

Para a disposição final de efluente além de atender aos padrões de emissão é necessário observar o enquadramento do corpo d'água receptor (Tabela 3.1)

Tabela 3.1 - Concentração limite de nitrogênio estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 357 de 17 de março de 2005, para as águas do território nacional

Classe	Concentração (mg/L)			
	Nitrato	Nitrito	Nitrogênio amoniacal total	
Água doce	1	10,0	3,7 (pH ≤ 7,5)	
			2,0 (7,5 < pH ≤ 8,0)	
			1,0 (8,0 < pH ≤ 8,5)	
			0,5 (pH > 8,5)	
2	10,0	1,0	3,7 (pH ≤ 7,5)	
			2,0 (7,5 < pH ≤ 8,0)	
			1,0 (8,0 < pH ≤ 8,5)	
			0,5 (pH > 8,5)	
3	10,0	1,0	13,3 (pH ≤ 7,5)	
			5,6 (7,5 < pH ≤ 8,0)	
			2,2 (8,0 < pH ≤ 8,5)	
			1,0 (pH > 8,5)	
4	-	-	-	
Água salina	1	0,4	0,07	0,4
	2	0,7	0,2	0,7
Água salobra	1	0,4	0,07	0,4
	2	0,7	0,2	0,7

- Não faz referência

A concentração de nitrogênio amoniacal está relacionada ao pH porque a amônia molecular é mais tóxica que o íon amônio, que prevalece em faixas de pH mais elevadas.

O nitrogênio é um elemento químico que pode ser encontrado em vários estados de oxidação, relacionado ao seu ciclo biogeoquímico. O ciclo do nitrogênio pode ser dividido em quatro fases: fixação, amonificação, nitrificação e desnitrificação. Na seqüência, encontra-se uma pequena descrição das fases.

- Fixação do nitrogênio atmosférico em nitrato \rightarrow ocorre por meio dos chamados organismos simbióticos fixadores de nitrogênio, entre os quais se destaca o da espécie *Rhizobium*, que vivem associados a vegetais e leguminosas.
- Amonificação \rightarrow o nitrogênio fixado é transformado em moléculas maiores que contém nitrogênio e outras moléculas orgânicas necessárias a vida, essas moléculas são absorvidas e posteriormente eliminadas pelos seres vivos, as bactérias por sua vez, mineralizam o nitrogênio eliminado produzindo gás amônia ou sais de amônio.
- Nitrificação \rightarrow ocorre à conversão da amônia produzida em nitrito e posteriormente em nitrato pela ação de bactérias.
- Desnitrificação \rightarrow o nitrogênio é devolvido à atmosfera a partir da redução do nitrato pela ação bacteriana.

É importante ressaltar que apesar da abundância de nitrogênio na atmosfera, cerca de 78% em peso de gases seco, os vegetais não o retiram da mesma. Isso ocorre porque as moléculas de N_2 apresentam uma tripla ligação muito forte que requer energia de entalpia de ativação da ordem de 945,4 kJ/mol em condições ambientais (EMSLEY, 1998). De maneira geral, todos os nutrientes necessários ao desenvolvimento das plantas são carreados pela água e absorvido por suas raízes, inclusive o nitrogênio. Porém, há algumas leguminosas que fixam o nitrogênio atmosférico por meio de microrganismos presentes nos nódulos de suas raízes (CHAGAS, 2006).

3.2 Remoção biológica do nitrogênio

A nitrificação pode ser definida resumidamente como a oxidação do nitrogênio amoniacal a nitrato, via nitrito, utilizando oxigênio molecular como acceptor final de elétron. A nitrificação é uma etapa muito importante no ciclo do nitrogênio, pois fornece aos vegetais o nitrato que é a forma de nitrogênio mais utilizada no metabolismo vegetal (CHAGAS, 2006).

As bactérias responsáveis pela nitrificação são em sua maioria, autotróficas e podem ser divididas em dois grupos, cada qual responsável por uma etapa da nitrificação. Na primeira etapa, o nitrogênio amoniacal é oxidado a nitrito através da ação das bactérias da espécie *Nitrossomonas*, esta etapa é conhecida como nitritação. Na segunda etapa, denominada de nitratação, ocorre oxidação do nitrito a nitrato pela ação das bactérias da espécie *Nitrobacter* (METCALF e EDDY, 2003). Na Tabela 3.2, encontram-se as equações estequiométricas que regem o processo de nitrificação.

Tabela 3.2 - Estequiometria da nitrificação

Processo	Expressão	ΔG^0
Nitritação	$\text{NH}_4^+ + \frac{3}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{NO}_2^- + \text{H}_2\text{O} + 2 \text{H}^+$	$-275 \text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$
Nitratação	$\text{NO}_2^- + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{NO}_3^-$	$-74 \text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$
Geral	$\text{NH}_4^+ + 2 \text{O}_2 \rightarrow \text{NO}_3^- + \text{H}_2\text{O} + 2 \text{H}^+$	$-349 \text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$

FONTE: JETTEN, *et al.*, 1999 e SCHMIDT, *et al.*, 2003.

A nitrificação é um processo espontâneo, porém fatores como pH, temperatura, oxigênio dissolvido (OD), relação carbono nitrogênio e alcalinidade podem interferir e até inibir o processo. Na Tabela 3.3 encontra-se um resumo sobre a influência destes parâmetros.

Tabela 3.3 - Influência dos parâmetros operacionais no processo de nitrificação

Parâmetro	Faixa ideal	Fonte	OBS.
pH	<ul style="list-style-type: none"> • 8,0 – 9,0 • 7,5 – 8,0 • 6,8 – 7,2 • 7,5 – 9,0 • 8,1 	<ul style="list-style-type: none"> • HENZE <i>et al.</i> (1998) • METCALF e EDDY (2003). • COSTA (1999). • SURAMPALLI <i>et al.</i>,1997 • GRUNDITZ e DALHAMMAR (2001). 	<ul style="list-style-type: none"> • HENZE, <i>et al.</i> (1998) advertem que a média do pH na fase líquida pode ser diferente da encontrada no biofilme • METCALF E EDDY afirmam que a velocidade de nitrificação com pH na faixa de 5,8 e 6,0 pode ser de 10% a 20% da velocidade para taxas de pH iguais a 7,0 • COSTA (1999) estudou efluente sintético de coqueria (rica em nitrogênio amoniacal e fenóis). • GRUNDITZ e DALHAMMAR (2001) estudaram culturas isoladas das bactérias.
Temperatura	<ul style="list-style-type: none"> • 30 – 36°C • 22 – 27°C <p>Nitrificação e 15° C Nitratação</p> <ul style="list-style-type: none"> • 25 – 35°C • 35° 	<ul style="list-style-type: none"> • BARNE e BLISS (1983) apud FRANCHIN 2003. • HYUNGSEOK, <i>et al</i> (1999). • SURAMPALLI <i>et al.</i> (1997). • GRUNDITZ e DALHAMMAR (2001). 	<ul style="list-style-type: none"> • BARNE e BLISS (1983) apud FRANCHIN 2006 observaram a ocorrência de nitrificação na faixa de 4 a 50°C • GRUNDITZ e DALHAMMAR (2001) estudaram culturas isoladas das bactérias.
OD	<ul style="list-style-type: none"> • > 3,5 mg/L • 4,2 – 11,0 mg/L • > 2,0 mg/L • 4,57 mg O/mg N 	<ul style="list-style-type: none"> • ISOLDI e KOETZ (1998). • ISOLDI, <i>et al.</i> (2005). • SURAMPALLI <i>et al.</i> (1997). • Van HAANDEL e MARAIS (1999). 	<ul style="list-style-type: none"> • ISOLDI (2005) observou que apesar da concentração de OD ter sido elevada até 11 mg/L não houve alteração na eficiência média de remoção de nitrogênio amoniacal que permaneceu de 87%. • Van HAANDEL (1999) baseia-se em cálculos estequiométricos.
Relação carbono nitrogênio	<ul style="list-style-type: none"> • >3 	<ul style="list-style-type: none"> • ISOLDI e KOETZ (1998). 	<p>A relação C/N não pode ser elevada, pois as bactérias predominantes na nitrificação são autotróficas e tais microorganismos não se desenvolvem bem em ambientes com alta concentração de matéria orgânica carbonácea.</p>

Com relação à alcalinidade, quando observada à equação estequiométrica que rege o processo de nitrificação, verifica-se que há a produção de dois moles de H^+ por mol de nitrato formado. A produção de H^+ faz com que o pH do meio tenda a diminuir. Para que isso não ocorra e venha a inibir a nitrificação é necessário que seja fornecida alcalinidade suficiente para impedir a diminuição do pH. Como a produção de 1,0 mol de H^+ corresponde ao consumo de 1,0 mol de alcalinidade ou 50g $CaCO_3$, calcula-se que seja necessária na ordem de 7,14 mg $CaCO_3$ / mg N.

Outras substâncias orgânicas e inorgânicas presentes no efluente podem inibir o processo de nitrificação tais como: enxofre, fenóis, cianeto, solventes orgânicos, proteínas, alcoóis, éteres, entre outros. Alguns metais também possuem efeito inibitório. METCALF & EDDY (2003) relatam que concentrações de níquel, cromo e cobre na ordem de 0,25 mg/L, 0,25 mg/L e 0,10 mg/L, respectivamente, podem interromper completamente a oxidação da amônia.

A desnitrificação trata-se da conversão biológica de nitrogênio na forma de nitrito e nitrato em compostos mais reduzidos como óxido nítrico (NO), óxido nitroso (N_2O) e nitrogênio gasoso (N_2). Esse processo também pode ser dividido em duas etapas, a primeira consiste na redução do nitrato a nitrito. Já a segunda corresponde à redução do nitrito a nitrogênio gasoso. Os microorganismos responsáveis pela desnitrificação são predominantemente anaeróbios heterotróficos e os principais gêneros envolvidos na desnitrificação de águas residuárias domésticas são: *Achromobacter*, *Aerobacter*, *Alcaligenes*, *Bacillus*, *brevibacterium*, *Flavobacterium*, *Lactobacillus*, *Micrococcus*, *Proteus*, *Pseudomonas* e *Spirillum* (METCALF e EDDY, 2003).

Como a matéria orgânica presente no tratamento terciário é escassa e os microorganismos heterotróficos a utilizam como fonte de energia, as estações de tratamento fazem uso da adição de produtos químicos a fim de viabilizarem a desnitrificação. A literatura cita, como principais fontes externas de carbono, o metanol, etanol, ácido acético, glicose, entre outros. Também existem pesquisas que buscam a utilização de fontes de carbono que não onere o tratamento, tais como parte do afluente ou da biomassa.

A desnitrificação não é o único processo que pode ocorrer para remoção do nitrato, em meio anaeróbio. Existe também a Redução Dissimilativa do

Nitrato a Amônio (RDNA). A expressão matemática da desnitrificação e da RDNA está apresentada na Tabela 3.4. Apesar da desnitrificação ocorrer de forma mais espontânea que a RDNA, concentrações elevadas de matéria orgânica podem promover a competição entre os dois processos levando ao acúmulo de amônia no meio.

Tabela 3.4 - Expressão matemática da desnitrificação e da RDNA

Processo	Expressão
Desnitrificação	$\text{NO}_3^- \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO} \rightarrow \text{N}_2\text{O} \rightarrow \text{N}_2$
RDNA	$\text{NO}_3^- \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{NOH} \rightarrow \text{NO}_2\text{OH} \rightarrow \text{NH}_4^+$

Assim como na nitrificação, muitos fatores podem interferir no processo de desnitrificação, tais como OD, pH, temperatura, relação carbono nitrogênio (C/N), entre outros. Encontra-se, na Tabela 3.5, um resumo das faixas ideais para estes parâmetros.

Tabela 3.5 - Influência dos parâmetros operacionais no processo de desnitrificação

Parâmetro	Faixa ideal	Fonte	OBS.
pH	<ul style="list-style-type: none"> • 6,5 – 8,0 • 7,0 – 7,5 	<ul style="list-style-type: none"> • SURAMPALLI <i>et al.</i> (1997). • Van HAANDEL e MARAIS (1999). 	<ul style="list-style-type: none"> • Van HAANDEL e MARAIS (1999) relatam quedas bruscas na taxa de desnitrificação relacionada a pH menores que 6,0 e maiores que 8,5.
Temperatura	<ul style="list-style-type: none"> • Próximo a 40°C • 10 – 30°C • 35 – 50°C 	<ul style="list-style-type: none"> • Van HAANDEL & MARAIS (1999). • SURAMPALLI <i>et al.</i> (1997). • BARNE e BLISS (1983) apud FRACHIN (2003). 	<ul style="list-style-type: none"> • BARNE e BLISS (1983) apud FRACHIN 2003, observaram a ocorrência de desnitrificação na faixa de 0 a 50°C
OD	<ul style="list-style-type: none"> • < 1,0 mg/L • Níveis máximos teóricos 0,2 e 0,3 mg/L 	<ul style="list-style-type: none"> • METCALF e EDDY (2003). • FERREIRA (2000). 	<ul style="list-style-type: none"> • METCALF e EDDY (2003) apresentam uma correlação entre a taxa de desnitrificação e o aumento da concentração de oxigênio dissolvido, que varia linearmente até a interrupção do processo quando OD iguala-se a 1,0 mg/L. • FERREIRA (2000) cita que na prática é aceitável concentrações do OD de 0,5 mg/L. • O oxigênio possui preferência na torre de elétrons em relação ao nitrato, por isso pequenas concentrações de OD são capazes de inibir a desnitrificação.
Fonte externa de carbono.	<ul style="list-style-type: none"> • 4 - 5 kgDQO/kgN (matéria orgânica) e 3,1 – 3,7 kgDQO/kgN (ácido acético) • 3,2 – 5,4 (DQO/N) 	<ul style="list-style-type: none"> • HENZE <i>et al.</i> (1999). • KUMMER (2008). 	<ul style="list-style-type: none"> • KUMMER (2008) avaliou a desnitrificação para efluentes de abatedouro de peixes. • A relação C/N está diretamente ligada ao tipo da fonte de carbono e ao efluente a ser tratado. Sistemas biológicos similares podem apresentar diferentes condições ótimas de C/N dependendo destes fatores.

Ao contrário da nitrificação, a desnitrificação produz alcalinidade, recuperando desta forma aproximadamente metade da alcalinidade consumida durante a nitrificação, ou seja, há uma produção de 3,57 mg CaCO₃/mg N.

Concentrações de substâncias tóxicas podem inibir o processo de desnitrificação, porém, as bactérias nitrificantes são mais sensíveis a toxidade e, normalmente, se a nitrificação ocorre de forma satisfatória, a desnitrificação não enfrentará problemas (METCALF e EDDY, 2003).

Existem novas pesquisas que buscam a remoção de nitrogênio de formas diferentes da convencional (nitrificação + desnitrificação), tais pesquisas encontram-se, em sua maioria, em escala de bancada ou piloto. Os novos processos buscam minimizar a energia introduzida no sistema e a fonte externa de carbono. Dentre os principais estudos pode se destacar a *Anaerobic Ammonium Oxidation (ANAMMOX)*, *Single reactor system for High Ammonia Removal Over Nitrite (SHARON)*, *Shot Nitrification (SN)*, *Oxygen Limited Autotrophic Nitrification Denitrification (OLAND)* e *Simultaneous Nitrification Denitrification (SND)*.

O processo ANAMMOX consiste na oxidação do amônio sob condições anaeróbias, utilizando nitrato ou nitrito como aceptor de elétrons. Na Tabela 3.6 encontra-se a equação estequiométrica desse processo, assim como a energia livre de Gibbs (ΔG^0) requerida em cada reação.

Tabela 3.6 - Estequiometria do processo ANAMMOX.

Equações	ΔG^0
$5\text{NH}_4^+ + 3\text{NO}_3^- \rightarrow 4\text{N}_2 + 9\text{H}_2\text{O} + 2\text{H}^+$	$-297 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$
$\text{NH}_4^+ + \text{NO}_2^- \rightarrow \text{N}_2 + \text{H}_2\text{O}$	$-358 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$

FONTE: MULDER *et al.*, 1995 e JETTEN, *et al.*, 1999.

Os dois processos ocorrem de forma espontânea, uma vez que apresentam ΔG^0 menor que zero. A via metabólica que traz o nitrito como aceptor de elétrons é mais favorável que a do nitrato, apesar de ambas as energias livres serem na mesma ordem de grandeza.

Segundo JETTEN, *et al.* (1998), a temperatura ótima para o estabelecimento do sistema ANAMMOX está entre 20 e 43°C, tendo o seu ponto ótimo em 40°C e o pH deve estar entre 6,7 e 8,3, sendo o pH ótimo em 8,0. Apesar do processo ANAMMOX possuir equilíbrio de um mol de amônio para um mol de nitrito, pesquisas mostram que é necessário o nitrito estar em excesso para que ocorra a oxidação. Esse excesso deve ser na ordem de 0,3 mols. Concentrações maiores que 10mM já são desfavoráveis e concentrações maiores que 20mM podem inibir totalmente a reação.

O processo SHARON baseia-se na interrupção da nitrificação em sua etapa inicial de nitrificação, ou seja, o nitrogênio amoniacal é convertido apenas a nitrito, que por sua vez converte-se em nitrogênio gasoso (desnitrificação). A criação deste curto-circuito entre a nitrificação e desnitrificação é estabelecida através de altas temperaturas (superiores a 26 °C), pois as bactérias responsáveis pela nitrificação possuem um desenvolvimento mais lento quando submetidas a temperaturas elevadas. O tempo de retenção celular deve ser menor que o tempo de duplicação das oxidadoras de nitrito para impedir sua atuação no reator (VERSTRAETE e PHILIPS, 1998; KHIN e ANNACHHATRE, 2004).

Comparando às expressões estequiométricas do processo convencional de remoção de nitrogênio e o processo SHARON, verifica-se economia na aeração e na fonte externa de carbono de aproximadamente 25% e 40%, respectivamente (Tabela 3.7).

Tabela 3.7 - Comparação da remoção de nitrogênio pelo processo convencional e SHARON, utilizando como fonte de carbono o etanol.

Processo Convencional
$\text{NH}_4^+ + 2 \text{O}_2 \rightarrow \text{NO}_3^- + \text{H}_2\text{O} + 2\text{H}^+$
$5 \text{C}_2\text{H}_5\text{OH} + 12 \text{H}^+ + 12 \text{NO}_3^- \rightarrow 10 \text{CO}_2 + 21 \text{H}_2\text{O} + 6 \text{N}_2$
Processo SHARON
$\text{NH}_4^+ + \frac{3}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{NO}_3^- + \text{H}_2\text{O} + 2\text{H}^+$
$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH} + 4 \text{H}^+ + 4 \text{NO}_3^- \rightarrow 2 \text{CO}_2 + 5 \text{H}_2\text{O} + 2 \text{N}_2$

JETTEN *et al.* (2001) estudaram com sucesso a viabilidade da combinação dos processos SHARON e ANAMMOX. Estes autores continuam aprofundando estudos nesta linha de pesquisa.

No processo SN também ocorre a interrupção da nitrificação em sua etapa inicial, porém a inibição da nitratação ocorre através controle do pH e concentração de amônia livre. Em estudos realizados por GÓRSKA *et al.* (1997) o pH ótimo para inibição é de 8,0 com uma concentração de amônia livre de 5 mg N /L. Esse processo é recomendado para efluentes com alta concentração de nitrogênio amoniacal e baixas relação DQO/N.

Também recomendo para efluentes com alta concentração de nitrogênio amoniacal. O processo OLAND busca o fornecimento do oxigênio necessário apenas para a conversão do nitrogênio a nitrito, criando uma carência de aceptor de elétrons. As bactérias consomem o próprio nitrito para oxidar o restante da amônia. Segundo VERSTRAETE e PHILIPS (1998), o processo OLAND apresenta economia de 62% relacionada ao oxigênio, quando comparado ao método convencional de remoção de nitrogênio (nitrificação/desnitrificação) sem gasto com alcalinidade.

O processo de SND baseia-se na existência de zonas anóxicas nos flocos ou no biofilme. As limitações da difusão de oxigênio para o interior da biomassa e a disponibilidade de doadores de elétron na mesma fazem o surgimento destas zonas, que são afetadas diretamente pelo aumento da concentração de OD e pela DQO solúvel. HAIYAN GOU *et al...* (2005) em estudos realizados com reator *airlift* conseguiram uma remoção de 82% do nitrogênio presente utilizado a remoção simultânea. NAKHLA E FROOQ (2003) avaliaram a utilização de filtros de areias como tratamento terciário de efluentes com baixa concentração de nitrogênio, aproximadamente 5 mg N/L, os resultados foram favoráveis ao SND, estando estes relacionados a velocidade de filtração.

3.3 Reatores híbridos

A utilização de reatores híbridos busca conciliar as vantagens de dois ou mais sistemas de tratamento em uma única configuração, podendo ser combinados os sistemas aeróbio e anaeróbio, biomassa floculada e biomassa fixa, entre outros.

PIMENTA *et al.* (2005) realizaram estudo comparativo de dois reatores pilotos tratando efluente doméstico, um UASB convencional e um Híbrido (composto por reator UASB + filtro anaeróbio) com tempos de detenções hidráulica (TDH) iguais, entre 8 e 10 h. Uma das principais vantagens da utilização do reator híbrido foi a remoção de ovos de helmintos, onde foi observado menos de um ovo viável por litro. Com relação à remoção de DBO e SSV, o reator híbrido mostrou-se até 20% mais eficiente que o UASB convencional.

PEREIRA-RAMIREZ *et al.* (2003) também realizaram um estudo comparativo entre um reator UASB de 12 L e um UASB-híbrido (reator com meio suporte formado de conduíte plástico no terço superior) de igual volume, ambos empregados no tratamento de águas residuárias de uma indústria de extração e refino de óleo de farelo de arroz. O UASB apresentou eficiência de remoção de DQO solúvel de 65,4% enquanto o UASB-híbrido apresentou de 74,6% para uma carga orgânica aplicada de 16 KgDQO/m³d e TDH de 12 h. O UASB convencional removeu 73,5% dos Sólidos Suspensos Totais (SST) enquanto que o UASB-híbrido obteve remoção de 88,1%.

WOLFF *et al.* (2004) avaliaram o desempenho de um reator piloto híbrido com leito móvel na remoção simultânea de poluição orgânica e nitrogenada de um esgoto urbano, operado a uma temperatura de 16°C. Este reator apresentou um bom desempenho na remoção da poluição carbonácea, em média 91% e nitrogenada em média 75%.

Os estudos com reatores híbridos destacam a estabilidade da biomassa como a principal vantagem da sua utilização, outras vantagens como a minimização da área requerida e melhor remoção de matéria orgânica também merecem destaque. O presente trabalho estuda reatores híbridos que associam a tecnologia do reator UASB com filtro anaeróbio ascendente com

leito submerso e reator de lodos ativados com o reator de biofilme aerado submerso. Nos próximos parágrafos encontra-se uma breve revisão que mostra as principais vantagens de cada sistema utilizado nos reatores híbridos.

3.3.1 Reatores UASB – *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*

O reator UASB surgiu nos anos 70 na Holanda e tem se tornado a principal escolha para as estações de tratamento de esgoto brasileiras, devido a sua facilidade de operação, baixo custo de operação associado à eficiência de remoção de DBO de 70% e baixa produção de lodo.

Este reator apresenta um fluxo ascendente, biomassa dispersa e um separador trifásico na parte superior. O separador separa as fases líquida (efluente), sólida (biomassa) e gasosa (principalmente metano e gás carbônico). Como pouca biomassa formada no reator sai com o descarte do efluente, há o desenvolvimento de uma grande quantidade de biomassa ativa, flocos ou grânulos de alta densidade, fornecendo ao sistema um elevado tempo de retenção celular. Quando o lodo é descartado ele já está estabilizado, sendo necessária apenas a desidratação e desinfecção. Além disso, o gás gerado no reator ainda pode ser coletado e reaproveitado para geração de energia, por exemplo. Esse tipo de reator dispensa a decantação primária.

Normalmente o efluente dos reatores UASB não atende aos padrões de lançamento de efluente, sendo então necessário um pós-tratamento.

3.3.2 Filtro anaeróbio ascendente com leito submerso

O filtro anaeróbio é um reator que possui o seu interior preenchido com material inerte. Geralmente utiliza-se pedra britada, mas novos estudos buscam novos materiais mais leves com maior relação entre índice de vazios e volume total, para que seja retida uma maior quantidade de biomassa. Esse

meio de suporte serve para retenção de sólidos e desenvolvimento de microorganismos.

Como os microorganismos desenvolvem-se aderidos ao meio suporte, este tipo de reator apresenta elevado tempo de retenção celular. O efluente tratado geralmente apresenta aspecto clarificado, com baixas concentrações de matéria orgânica e rico em sais minerais, o que é bom para a disposição no solo por infiltração ou até mesmo para irrigação de culturas vegetais. (ANDRADE NETO *et al.* 2002).

O filtro pode ter fluxo ascendente e descendente é importante que os reatores de fluxo descendente sejam afogados para garantir a presença de lodos nos interstícios do meio suporte. A presença de lodo ativo nos interstícios auxilia na degradação de matéria orgânica e ainda servir como meio filtrante, porém aumenta os riscos de entupimento ou colmatação dos interstícios.

3.3.3 Reator de lodos ativados

O reator de lodos ativados é um reservatório/ambiente aerado que possui uma grande quantidade de biomassa dispersa. Normalmente, esse ambiente é obtido com a recirculação da biomassa presente na unidade de decantação, aumentando desta forma o tempo de retenção celular do reator.

Como todo sistema aeróbio, este tipo de reator apresenta eficiência de remoção de matéria orgânica da fase líquida mais elevada que os sistemas anaeróbios. Normalmente neste sistema a nitrificação é obtida e é reduzida a probabilidade de geração de maus odores. Como desvantagens, estão altas produções de lodo, custos operacionais mais elevados e possíveis problemas com ruídos e aerossóis.

3.3.4 Biofiltro aerado submerso

O biofiltro aerado submerso é constituído por um tanque preenchido com matéria suporte inerte pelo qual o efluente e o ar fluem permanentemente. É um sistema trifásico onde a parte sólida é constituída pelo meio suporte e microorganismos aderidos (biofilme), fase líquida é composta pelo efluente e a fase gasosa é formada pela aeração artificial e por subprodutos da atividade biológica.

Estes reatores podem ser classificados de acordo com o fluxo hidráulico: co-corrente, quando os fluxos de ar e líquido apresentam sentido ascendente, e contracorrente, quando o fluxo hidráulico é descendente e o fluxo de ar ascendente.

Para ampliar a capacidade de retenção de sólidos suspensos o meio suporte dos reatores, com fluxo contracorrente, tem que apresentar densidade maior que 01 (um). No caso dos reatores com fluxo co-corrente a densidade do meio suporte deve ser menor que 01 (um), ou seja, materiais flutuantes. Quando o meio suporte é composto por material granular, por exemplo, a brita, à alta capacidade de retenção de sólidos provoca a necessidade da lavagem do meio filtrante periodicamente para evitar a colmatação (GONÇALVES, *et al.* 2001).

O efluente do biofiltro aerado apresenta geralmente baixa concentração de sólidos e matéria orgânica e, normalmente, ocorre a nitrificação do efluente. Contudo, este tipo de configuração tem elevada capacidade de responder a mudanças de temperatura, vazão, redução do pH e outras condições desfavoráveis, tais como, a falta de oxigênio, conseguindo retomar a operação normal em curto espaço de tempo após sanadas as condições desfavoráveis (MOTTA, 1995).

Embora o biofilme aparente ser formado por camadas homogêneas, existe uma estratificação de microorganismo ao longo da profundidade gerado pela difusão do oxigênio no interior do biofilme. E é o processo de difusão do oxigênio que influencia no desempenho sistema (GONÇALVES, *et al.* 2001).

Verifica-se nas configurações de reatores apresentadas a preocupação em concentrar a maior quantidade de biomassa por volume. O tempo de retenção celular elevado contribui favoravelmente a qualidade final do efluente.

A utilização de reatores compactos é uma tendência atual, pois é cada vez mais escassa a disponibilidade de grandes áreas para a instalação de sistema

de tratamento de efluentes nos centros urbanos. A utilização de reatores híbridos minimiza a área requerida para instalação das ETE.

A utilização de reator UASB associado à biofiltro anaeróbio visa melhorar a qualidade do efluente promover a remoção de ovos de helmintos e minimizar os gastos com a lavagem do meio filtrante, uma vez que boa parte do sólido é removida no reator UASB.

O uso de um sistema aeróbio posterior busca proporcionar um polimento na matéria orgânica, promover a nitrificação e eventualmente a desnitrificação que pode ocorrer simultaneamente no biofilme no biofiltro aerado submerso.

4 METODOLOGIA

Este experimento foi dividido em duas partes um em escala piloto e outra em escala de bancada. Os três primeiros objetivos específicos estão relacionados ao experimento em escala piloto enquanto os dois últimos estão associados ao experimento em escala de bancada

4.1 Localização do experimento em escala piloto

O experimento em escala piloto foi realizado na Estação de Tratamento (ETE) da Mangueira, que recebe e trata o esgoto doméstico proveniente dos bairros Mangueira, San Martin e Mustardinha na cidade de Recife-PE e faz parte do sistema de tratamento de Cabanga, operada pela Companhia Pernambucana de Saneamento (COMPESA). Esta estação está localizada a 5 km do campus universitário da UFPE.

Foram construídos, na área experimental operada pelo Laboratório de Saneamento Ambiental da Universidade Federal de Pernambuco (LSA/UFPE) na ETE Mangueira, dois conjuntos de dois reatores híbridos, compostos de um reator anaeróbio seguido por outro aeróbio.

4.2 Reatores em escala piloto

Os reatores híbridos foram confeccionados em fibra de vidro e têm como característica fluxo vertical ascendente e contínuo, altura útil de 5 m e vazão de operação de 0,05375 m³/h. Os reatores híbridos são formados por um reator anaeróbio (UASB) ou um reator aeróbio (lodos ativados) na parte inferior e um biofiltro na parte superior. Na Figura 4.1 está ilustrado o esquema geral dos reatores e uma imagem dos reatores *in loco*.

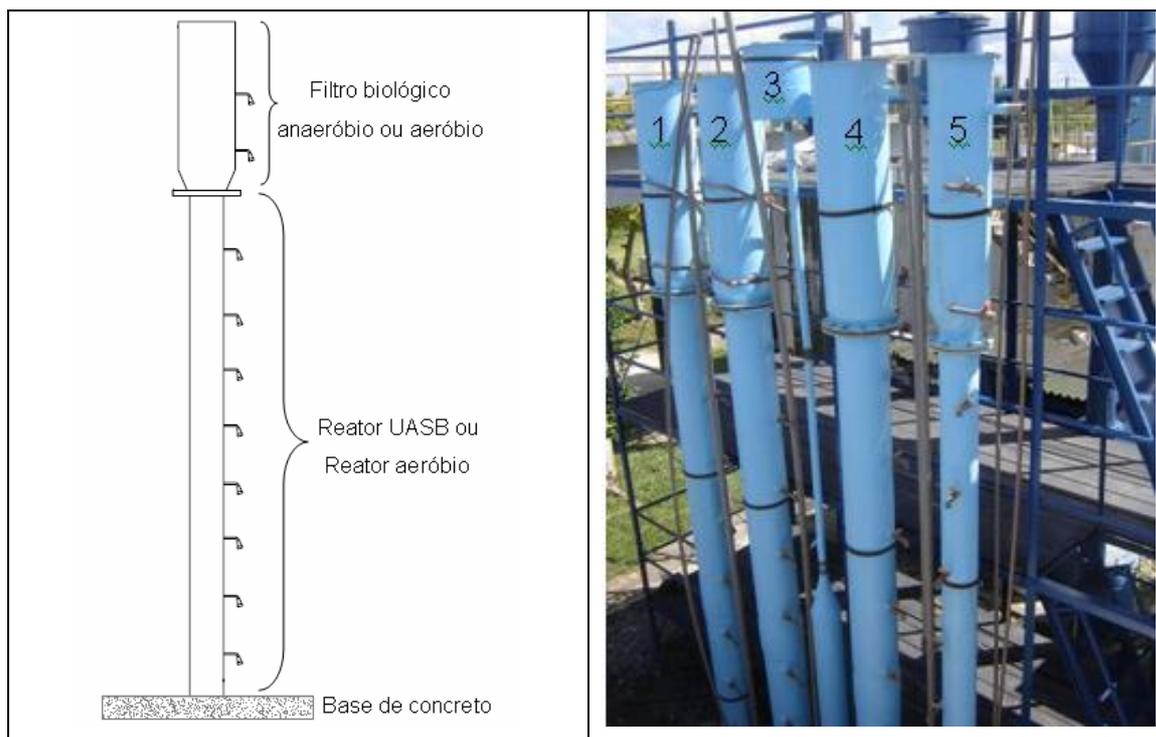


Figura 4.1 Esquema geral dos reatores utilizados na pesquisa e reatores *in loco*.

Fonte: Arquivo pessoal.

Legenda: 1 – ANA1– Reator anaeróbico; 2 – AE1 – Reator aeróbico; 3 – Caixa de distribuição do afluente; 4 – ANA2.1 – Reator anaeróbico 2; 5 – AE2 – Reator aeróbico 2.

Os biofiltros foram preenchidos com anéis de conduítes cortados em cilindros eqüiláteros de 25 mm de diâmetro (Figura 4.2), com índice de vazios de 90% e superfície específica de aproximadamente $91 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$, com densidade de aproximadamente 1 g/cm^3 . Este meio suporte teve a sua viabilidade técnica e econômica avaliada e recomendada por PIMENTA (2005).



Figura 4.2 - Meio suporte - conduítes inteiros e anéis cortados.

Fonte: PIMENTA (2005).

4.2.1 Reatores anaeróbios

Os reatores anaeróbios, denominados de ANA1 e ANA2, apresentaram características semelhantes: volume total de 430 L, sendo dividido em 280 L no reator UASB, que possui altura de 4 m e um diâmetro de 300 mm, e 150 L no biofiltro, que tem altura de 1,2 m e um diâmetro de 400 mm. O tempo de detenção hidráulica (TDH) é de 8 horas e a alimentação foi feita com esgoto doméstico coletado após a caixa de areia da ETE Mangueira.

Os reatores anaeróbios receberam inoculação de 280 L de lodo proveniente da célula 8 do reator UASB presente na própria ETE Mangueira. Esta célula foi escolhida por ser a disponível na ocasião em virtude da ocorrência de outras pesquisas e da reforma e manutenção que enfrentava a estação. A inoculação foi realizada manualmente com o auxílio de baldes de 20 L, como observa-se na Figura 4.3.



Figura 4.3 - Inoculação dos reatores anaeróbios.
Fonte: Arquivo pessoal.

Foi coletada uma amostra do lodo utilizado na inoculação para determinação da densidade, sólidos totais voláteis (STV) e atividade metanogênica específica (AME). O teste de AME foi realizado em sala climatizada a 30 °C utilizando concentração de 1,5 g SSV/L e ácidos graxos voláteis como substrato (4 g de DQO). A quantidade de metano produzida foi

estimada por descolamento de líquido de acordo com FLORÊNCIO (1994). Os testes foram realizados em triplicada.

4.2.2 Reatores aeróbios

Os reatores aeróbios foram denominados AE1 e AE2, que por sua vez recebiam o efluente tratado de ANA1 e ANA2 respectivamente. AE1 apresentou características semelhantes aos reatores anaeróbios, por outro lado o reator AE2 teve o volume total reduzido pela metade, ou seja, 215 L, sendo de 125 L com altura de 4 m e diâmetro de 200 mm na parte inferior e volume de 90 L com altura de 1,2 m e diâmetro de 300 mm no filtro. AE2 possuía TDH de 4 horas. Na Tabela 4.1 encontra-se resumida as características dos reatores.

Tabela 4.1 Resumo das características dos reatores

Reator híbrido	Volume Total (L)	Volume reator (L)	Volume biofiltro (L)	Diâmetro reator (mm)	Diâmetro biofiltro (mm)	Volume de inoculação (L)
ANA1/ANA2	430	280	150	300	400	280
AE1	430	280	150	300	400	0
AE2	215	125	90	200	300	0

AE1 e AE2 não receberam nenhum tipo de inoculação e iniciaram a operação 54 dias após a partida dos reatores anaeróbios, tempo suficiente para que o efluente anaeróbio começasse a estabilizar.

4.3 Monitoramento do experimente em escala piloto

O monitoramento foi realizado com periodicidade de três coletas semanais (às segundas, quartas e sextas) onde foram coletados efluentes dos reatores anaeróbios e aeróbios e afluente do sistema, resultando em cinco pontos de monitoramento contínuo (Figura 4.4).

Os reatores também apresentam pontos de coleta ao longo da sua altura em um total de dez pontos por reator, distanciados a cada 50 cm. Sendo dois pontos na parte do biofiltro e os demais no reator. O primeiro ponto de coleta está a 20 cm da base dos reatores. Estes pontos de coleta foram utilizados no final de cada fase para avaliar a degradação ao longo da altura do reator (Figura 4.4).

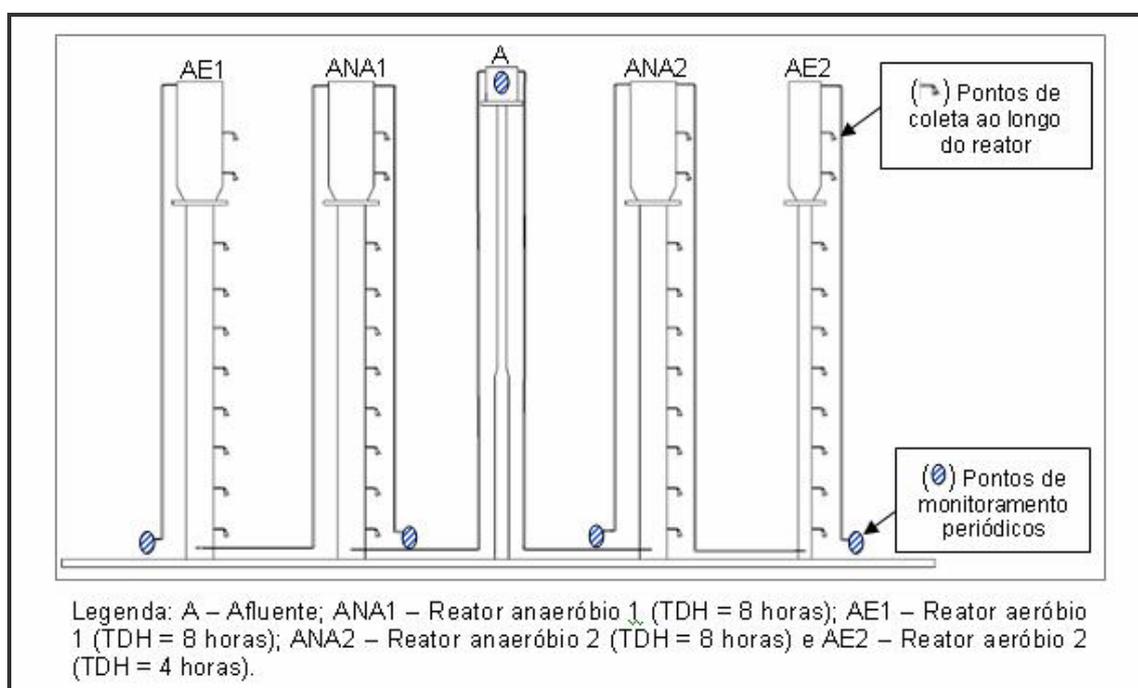


Figura 4.4 - Pontos de coleta.
Fonte: Arquivo pessoal.

As coletas foram realizadas por volta das 8 horas e 30 minutos da manhã. Para se ter uma amostra mais representativa coletava-se e homogeneizava-se 20 L. Posteriormente, deste volume era retirado 2 L para realização das análises no LSA/UFPE, situado a 5 km da ETE. Em campo foram realizadas análises de pH, oxigênio dissolvido (OD), condutividade, temperatura, sais e sólidos totais dissolvidos (TDS).

As análises seguiram basicamente as recomendações do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (1999). Alcalinidade e ácidos voláteis utilizaram o método titulométrico proposto por DILALLO e ALBERTON (1961) e modificado por RIPLEY *et al.* (1986). O resumo das análises realizadas no monitoramento e os respectivos métodos empregados estão na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Análises e métodos utilizados no monitoramento dos reatores

Parâmetro	Método
pH	Potenciômetro
OD	Potenciômetro
Condutividade	Potenciômetro
Temperatura	Potenciômetro
Sais	Potenciômetro
TDS	Potenciômetro
DQO	Titulométrico
DBO	Manométrico
Alcalinidade	Potenciométrico
AGV	Titulométrico
Nitrato	FIA
Nitrito	Espectrofotométrico
Nitrogênio amoniacal	Titulométrico
NTK	Titulométrico
Fósforo	Espectrofotométrico
Orto-fosfato	Espectrofotométrico
Sulfato	Turbidímetro
Série de sólidos totais	Gravimétrico
Série de sólidos suspensos totais	Gravimétrico

A DQO filtrada e os sólidos suspensos utilizaram membranas com poros de 1,2 µm de diâmetro. Para as análises de nitrato, nitrito e sulfato, as amostras foram filtradas em membranas com poros de 0,45 µm de diâmetro de

modo que se reduzisse a interferência da cor e da turbidez, além da utilização adequada do equipamento da análise de FIA.

Os reatores foram submetidos a duas fases, a primeira sem recirculação (fase 1) e a segunda com uma taxa de recirculação de 0,5 (fase 2). No final de cada fase foi realizado um perfil ao longo dos reatores, quantificando a série de sólidos, série de nitrogênio e a DQO filtrada. Também se verificou a remoção de coliformes fecais por tubos múltiplos e ovos de helmintos empregando o método de BAILENGER modificado AYRES (ZERBINI, 2001).

4.4 Delineamento experimental do experimento em escala piloto

Para avaliação dos dados foi considerada a existência de oito tratamentos que estão resumidos na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Resumo dos tratamentos.

Tratamento	Nomenclatura
T1 Reator ANA1 na fase 1	ANA1.1
T2 Reator ANA1 seguido do reator AE1 na fase 1	ANA1.1 + AE1.1
T3 Reator ANA2 na fase 1	ANA2.1
T4 Reator ANA2 seguido do reator AE2 na fase 1	ANA2.1 + AE2.1
T5 Reator ANA1 na fase 2	ANA1.2
T6 Reator ANA1 seguido do reator AE1 na fase 2	ANA1.2 + AE1.2
T7 Reator ANA2 na fase 2	ANA2.2
T8 Reator ANA2 seguido do reator AE2 na fase 2	ANA2.2 + AE2.2

Os tratamentos foram comparados entre si e confrontados com os parâmetros especificados na legislação ambiental brasileira. Para auxiliar na tomada de decisão foi aplicado o teste de f e de Tukey com índice de confiabilidade de 95% e 99%. Além disso, foram calculados os valores médio, máximo, mínimo, limites de confiança e erro associado, entre outros parâmetros estatísticos. Também foi aplicado o teste de f para comparar os parâmetros do afluente do sistema nas duas fases.

No apêndice podem ser encontradas tabelas com o resumo da análise de variância (ANOVA) e o teste de Tukey.

4.5 Experimento em escala de bancada

Antes de iniciar fase 2, analisou-se a degradação temporal do nitrato em experimento de bancada montado no Laboratório de Saneamento Ambiental da UFPE.

Avaliou-se quatro taxas de recirculação (0,5, 1, 2 e 4) com três quantidades de lodo distintas. Foram utilizados reatores em batelada com volume útil de 500 mL. Os reatores foram colocados em uma mesa agitadora, com velocidade de 140 rpm, o experimento teve a duração de 24 horas como coletas a cada três horas, para a determinação do nitrato.

Com o intuito de simular as taxas de recirculação foi misturado, o afluente e o efluente aeróbio em quantidades proporcionais as taxas de recirculação avaliadas.

Para determinar a quantidade de lodo a ser utilizada no experimento, estimou-se a quantidade de biomassa presente nos reatores anaeróbios de escala piloto, utilizando assim, quantidades semelhantes a do reator piloto, 50% superior e outra 50% inferior.

Buscando minimizar, a interferência na degradação de nitrato no experimento, foi monitorado três tipos de reatores controle:

- Reator apenas com lodo e afluente,
- Apenas afluente sem lodo
- Apenas efluente aeróbio sem o lodo.

Com o termino do experimento foi verificada a presença de nitrito nos reatores.

O resumo da montagem dos reatores está apresentado na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Resumo dos reatores utilizado no experimento de bancada para avaliação da desnitrificação.

Reator	Quantidade de lodo anaeróbio	Volume de afluente (mL)	Volume do efluente aeróbio (mL)	Taxa de recirculação
A	g SSV do reator em escala piloto menos 50%	333	167	0,5
		250	250	1,0
		167	333	2,0
		100	400	4,0
B	g SSV do reator em escala piloto	333	167	0,5
		250	250	1,0
		167	333	2,0
		100	400	4,0
C	g SSV do reator em escala piloto mais 50%	333	167	0,5
		250	250	1,0
		167	333	2,0
		100	400	4,0

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Monitoramento dos reatores

Durante o experimento, como já citado anteriormente, a ETE Mangueira passava por reforma e manutenção, em consequência disso a estação teve seu funcionamento interrompido nove (09) vezes na fase 1 e três (03) vezes na fase 2. Na Tabela 5.1 está apresentado um resumo com datas de interrupção e os respectivos motivos, relacionando-os com os dias decorridos do experimento. No entanto o sistema se comportou bem, apenas das interrupções, recuperando rapidamente a estabilidade.

Tabela 5.1 – Problemas operacionais ocorridos na estação de tratamento durante o período da pesquisa.

Data	Motivo	Dias de experimento
28/09/2007 - 01/10/2007	-	94 – 97
12/10/2007	Problemas no quadro de energia	108
30/10/2007 – 01/11/2007	Limpeza no poço chegada da ETE	126 -128
07/11/2007	Manutenção da bomba da ETE	134
10/11/2007 – 11/11/2007	Problemas energéticos	137 – 138
28/11/2007	Falta de energia	155
05/12/2007 – 11/12/2007	Problema na bomba da ETE	162 – 168
13/12/2007	-	170
09/01/2008	Problemas no sistema de aeração	197
28/04/2008	Problema da bomba da ETE	307
08/05/2008	Troca do quadro de energia da ETE	317
30/05/2008	-	339

A caracterização realizada no afluente (Tabela 5.2) mostrou que a maioria dos parâmetros, teve características semelhantes em ambas as fases. Apresentaram diferença somente os parâmetros:

- Condutividade, TDS e Sais à fase 1 com valores mais elevados
- Temperatura e AGV à fase 2 com valores mais elevados;
- Alcalinidade parcial à fase 1 com valores mais elevado
- NTK à fase 2 com valores inferiores.

A maior quantidade de dias chuvosos na fase 2 podem ter interferido nestes parâmetros, mas é importante ressaltar que DQO, DBO, NH₄ e sólidos não apresentaram diferença significativa entre as fases.

Tabela 5.2 – Características dos afluentes.

Parâmetros	Fase 1						Fase 2					
	Nº	Méd	Mín	Max	CV	DP	Nº	Méd	Mín	Máx	CV	DP
pH	73	7,09	6,69	7,63	0,03	0,18	43	7,01	6,27	7,40	0,04	0,27
Cond.	71	1077,13	103,00	1501,00	0,29	316,37	41	945,68	382,00	1219,00	0,22	207,72
TDS	71	534,75	44,00	976,00	0,32	169,36	41	432,20	192,00	722,00	0,24	104,06
Sais	70	0,33	0,00	0,60	0,47	0,16	41	0,25	0,00	0,40	0,46	0,11
Temp.	70	27,06	23,50	30,30	0,06	1,72	43	27,91	21,00	33,30	0,07	1,92
Alc Parcial	74	168,33	79,00	248,00	0,18	30,75	43	153,51	67,30	221,20	0,24	37,52
Alc Total	74	249,31	100,00	331,00	0,18	44,03	43	236,56	91,30	298,00	0,20	47,00
AGV	70	45,73	10,79	90,06	0,31	14,22	32	53,72	27,81	134,05	0,35	19,04
DQO_b	72	502,51	67,01	1601,57	0,64	323,23	42	474,27	142,17	1458,88	0,55	263,11
DQO_f	74	98,84	20,62	207,38	0,38	37,97	42	98,99	44,00	152,22	0,25	24,85
DBO_b	7	344,29	95,00	750,00	0,67	231,45	5	224,00	180,00	290,00	0,22	48,27
DBO_f	6	56,83	22,00	105,00	0,62	35,47	5	89,60	85,00	100,00	0,07	6,19
NTK	73	48,09	10,30	93,04	0,31	15,01	43	39,26	12,00	54,04	0,28	10,92
NH₄	73	27,69	5,00	61,88	0,37	10,19	43	24,60	7,34	37,24	0,32	7,98
Nitrito	72	0,00	0,00	0,00	-	0,00	43	0,08	0,00	1,40	3,73	0,29
Nitrato	73	0,00	0,00	0,00	-	0,00	41	0,00	0,00	0,00	-	0,00
Sulfato	70	39,53	8,42	71,87	0,29	11,55	31	39,27	12,85	61,62	0,26	10,38
Fósforo	67	5,53	1,67	13,24	0,35	1,94	12	4,63	3,77	5,66	0,12	0,55
Orto-fosfato	67	2,83	0,31	5,11	0,33	0,94	12	2,28	1,16	2,88	0,25	0,56
ST	69	1019,9	372,5	5792,0	0,71	726,6	42	1005,6	38,0	4258,0	0,82	828,1
STF	69	610,1	248,0	5225,0	0,97	591,7	42	643,4	31,0	3502,0	0,90	581,5
STV	69	410,8	51,0	1785,0	0,66	272,1	42	362,2	5,0	3320,0	1,35	488,7
SST	69	386,1	74,0	1936,7	0,90	345,7	39	509,5	99,2	4022,5	1,39	710,7
SSF	69	133,8	1,0	1533,3	1,57	209,8	39	286,3	0,0	3690,0	2,37	678,1
SSV	69	251,0	31,0	865,0	0,76	189,7	39	223,2	47,0	740,0	0,64	143,1

Legenda: Nº: Número de dado; Méd: Média aritmética; Mín: valor mínimo; Max: valor máximo; CV: coeficiente de variação; DP: desvio padrão.

5.1.1 Lodo de inoculação

O lodo utilizado no inóculo dos reatores anaeróbios apresentou densidade média de 1050 g/L, concentração de STV de 9,98 g/L e AME de 0,23 g DQO-CH₄/gSSV dia. Na Figura 5.1 encontra-se o gráfico do teste de AME.

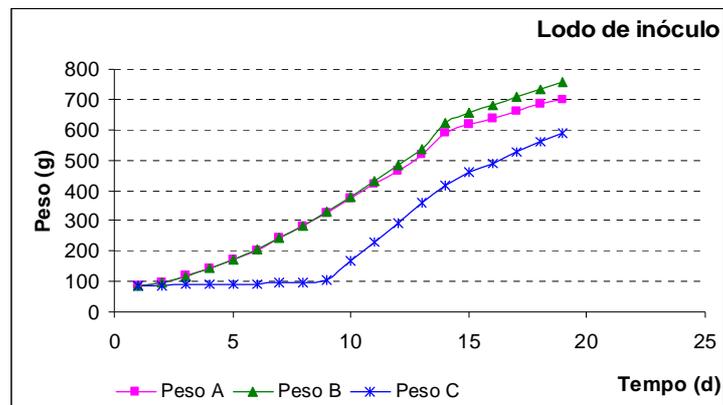
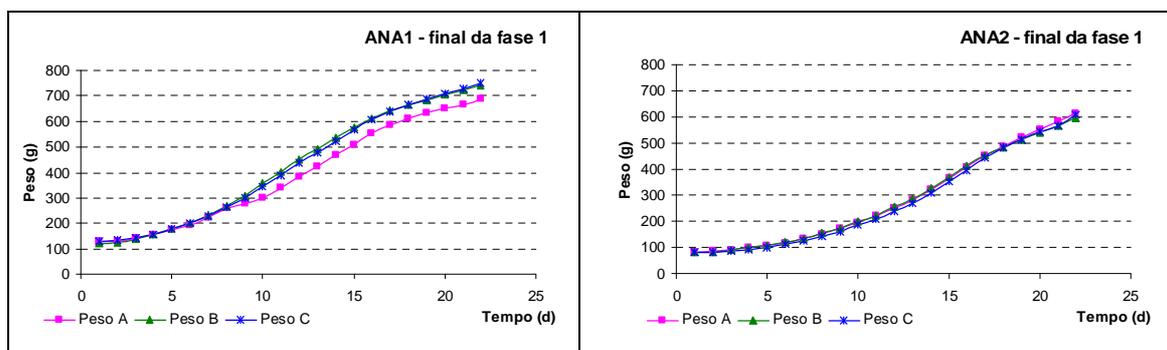


Figura 5.1 – Gráfico do teste de AME do lodo de inóculo.

O teste de AME foi realizado novamente no término da fase 1 para verificar a taxa de produção de metano. ANA1 apresentou taxa de 0,20 g DQO-CH₄/gSSV dia e ANA2 de 0,18 g DQO-CH₄/gSSV dia (Figura 5.2). Os reatores apresentaram reduções na atividade quando comparados ao lodo utilizado de inóculo.



Legenda: ANA1 – Reator anaeróbio 1 (h = 8 horas); ANA2 – Reator anaeróbio 2 (h = 8 horas).

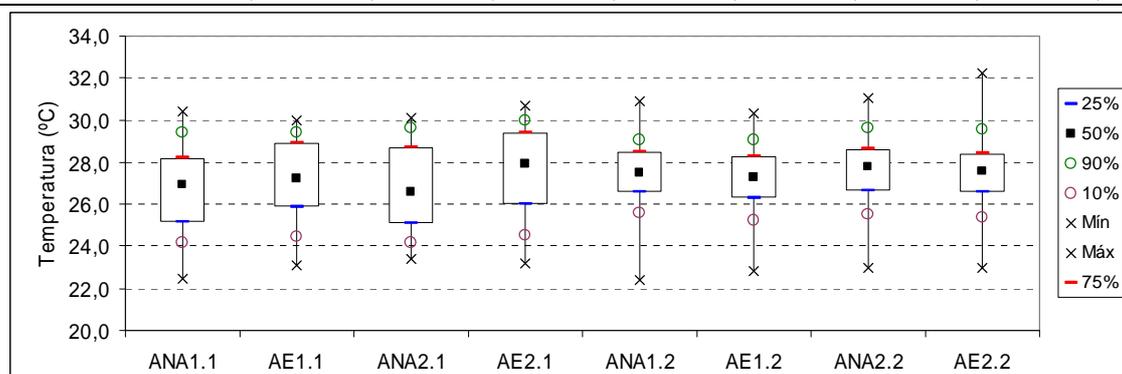
Figura 5.2 – Gráfico do teste de AME do lodo dos reatores anaeróbios final da fase 1.

5.1.2 Temperatura, pH, alcalinidade e AGV.

Apesar de não se ter controle de temperatura no local, a mesma manteve-se próxima aos 27 °C (Tabela 5.3) em todos os reatores e ao longo do experimento, ou seja, a temperatura permaneceu na faixa ideal do desenvolvimento bacteriano e abaixo do limite de lançamento de efluentes que é a 40 °C, segundo a CONAMA 397/2008.

Tabela 5.3 - Resumo da temperatura nos reatores

Temp. (°C)	ANA1.1	AE1.1	ANA2.1	AE2.1	ANA1.2	AE1.2	ANA2.2	AE2.2
Nº de Dados	71	53	70	55	42	43	43	43
Média	26,78	27,15	26,76	27,48	27,36	27,24	27,62	27,55
Mínimo	22,50	23,10	23,40	23,20	22,40	22,80	23,00	23,00
Máximo	30,40	30,00	30,13	30,70	30,90	30,30	31,00	32,20
CV	0,08	0,07	0,07	0,07	0,06	0,06	0,06	0,06
DP	2,01	1,85	1,97	2,05	1,58	1,57	1,64	1,73



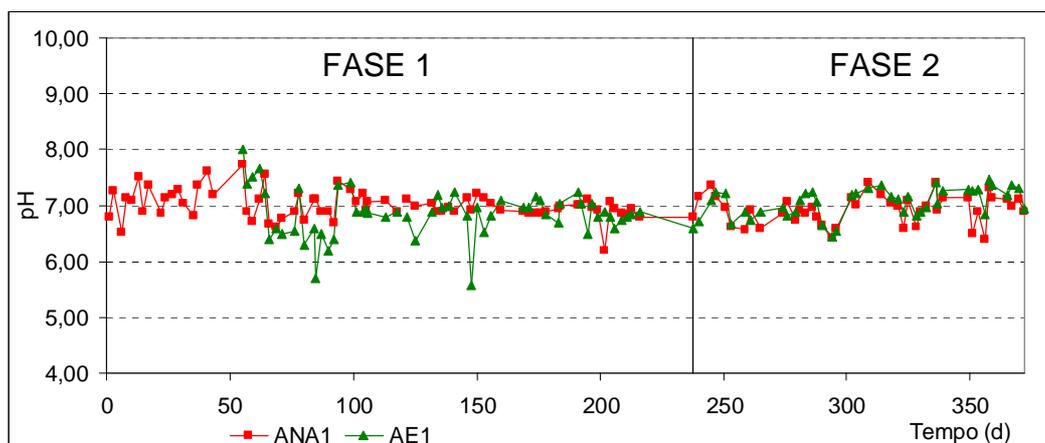
Legenda: ANA1.1 – Reator anaeróbico 1 fase 1 (TDH = 8 horas); AE1.1 – Reator aeróbico 1 fase 1 (TDH = 8 horas); ANA2.1 – Reator anaeróbico 2 fase 1 (TDH = 8 horas); AE2.1 – Reator aeróbico 2 fase 1 (TDH = 4 horas); ANA1.2 – Reator anaeróbico 1 fase 2 (TDH = 8 horas); AE1.2 – Reator aeróbico 1 fase 2 (TDH = 8 horas); ANA2.2 – Reator anaeróbico 2 fase 2 (TDH = 8 horas); AE2.2 – Reator aeróbico 2 fase 2 (TDH = 4 horas); CV – Coeficiente de variação; DP Desvio padrão.

O pH manteve-se próximo da neutralidade em todos os reatores. Apesar disso, na fase 1, os reatores aeróbios apresentaram diferença significativa.

AE1.1 possuiu média 3% inferior a AE2.1, respectivamente 6,86 e 7,05. Esses reatores atingiram valores mínimos de 5,57 e 5,13, respectivamente, como observado nas Figura 5.3 e Figura 5.4.

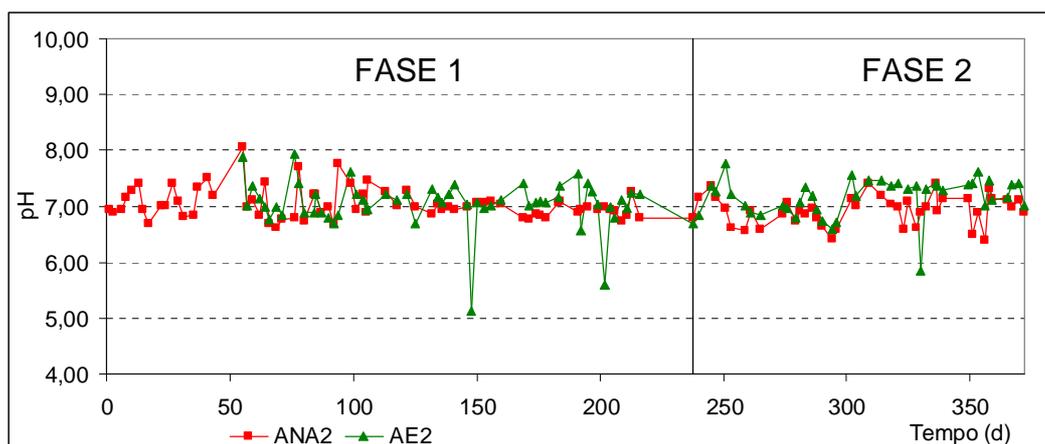
Os baixos valores de pH ocorreram em virtude do processo de nitrificação, como será mostrado mais adiante, esse processo foi estabelecido primeiro em AE1 explicando assim a média mais baixa. Os reatores conseguiram recuperar a redução do pH sem necessidade da adição de tampão.

Ainda com relação aos reatores aeróbios, na fase 2 não foi observada queda brusca no pH de AE1.2, que teve mínimo de 6,44 enquanto AE2.2 apresentou mínimo de 5,85, fato relacionado ao processo de nitrificação, apesar disto esses os reatores não apresentaram diferença significativa entre si. Também não ocorreu diferença significativa entre os reatores anaeróbios.



Legenda: ANA1 – Reator anaeróbio1 (TDH = 8 horas); AE1 - Reator aeróbio 2 (TDH = 8 horas).

Figura 5.3 - Valores de pH nos reatores do conjunto 1.



Legenda: ANA2 – Reator anaeróbio1 (TDH = 8 horas); AE2 - Reator aeróbio 2 (TDH = 4 horas).
Figura 5.4 – Valores de pH nos reatores conjunto 2

Os valores mínimos de pH encontrado nos reatores foram superiores ao padrão de lançamento de efluentes estabelecido pela CONAMA 357/2005, que é entre 5 e 9.

Com relação à alcalinidade parcial, nos reatores anaeróbios, ANA1 apresentou comportamento semelhante entre as fases e, quando comparado a ANA2. Apesar de ANA2 apresentar diferença significativa entre suas fases, cerca de 10% superior na fase 1.

Nos reatores aeróbios observou-se que não há diferença significativa com a mudança de fase, porém, AE1 (TDH = 8 horas) mostrou diferença altamente significativa em relação a AE2 (TDH = 4 horas) na fase 1 apresentando média inferiores de aproximadamente 30% (Tabela 5.4).

Tabela 5.4 - Resumo da alcalinidade parcial.

Alc. Parcial Mg/CaCO ₃	ANA1.1	AE1.1	ANA2.1	AE2.1	ANA1.2	AE1.2	ANA2.2	AE2.2
Nº de Dados	74	57	74	57	43	43	43	43
Média	220	116	222	164	198	146	190	165
Mínimo	134	0	125	0	70	20	78	0
Máximo	354	243	338	304	298	288	294	280
CV	0,18	0,60	0,18	0,43	0,28	0,42	0,27	0,34
DP	38,8	70,43	39,99	70,19	55,21	60,48	52,18	55,58

Legenda: ANA1.1 – Reator anaeróbio 1 fase 1 (TDH = 8 horas); AE1.1 – Reator aeróbio 1 fase 1 (TDH = 8 horas); ANA2.1 – Reator anaeróbio 2 fase 1 (TDH = 8 horas); AE2.1 – Reator aeróbio 2 fase 1 (TDH = 4 horas); ANA1.2 – Reator anaeróbio 1 fase 2 (TDH = 8 horas); AE1.2

– Reator aeróbio 1 fase 2 (TDH = 8 horas); ANA2.2 – Reator anaeróbio 2 fase 2 (TDH = 8 horas); AE2.2 – Reator aeróbio 2 fase 2 (TDH = 4 horas); CV – Coeficiente de variação; DP Desvio padrão

Com relação à alcalinidade total (Tabela 5.5) os reatores anaeróbios não apresentaram diferença significativa entre si em ambas as fases. Nos reatores aeróbios, AE1 apresentou diferença significativa na mudança de fase e altamente significativa em relação a AE2 na fase 1. Ou seja, AE1.1 teve média aproximadamente 20% inferior a AE1.2 e 30% em relação a AE2.1. Entretanto os reatores tiveram comportamento semelhante na fase 2 (AE1.2 ≈ AE2.2). AE2 não apresentou diferença entre as fases (AE2.1 ≈ AE2.2).

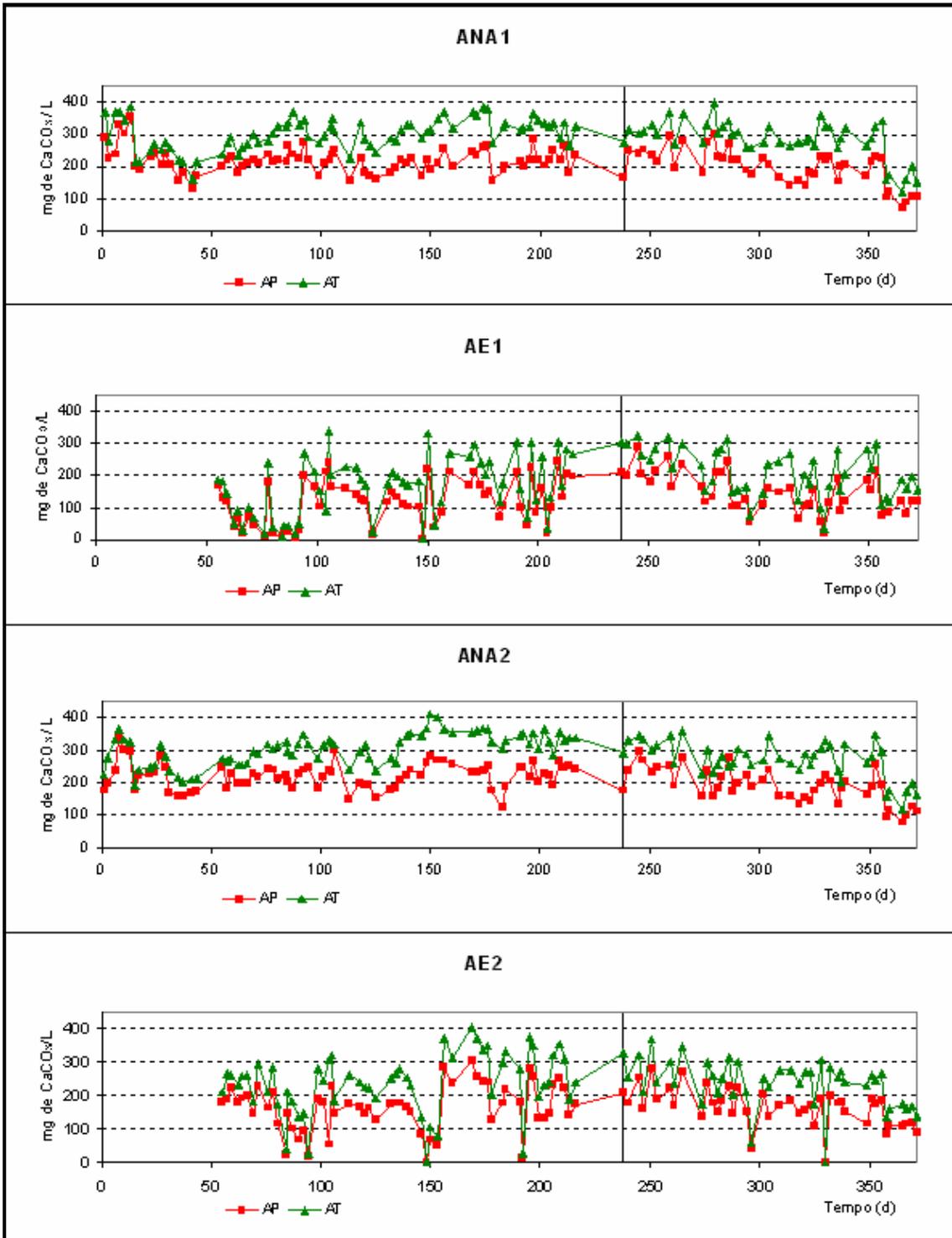
Tabela 5.5 - Resumo da alcalinidade total.

Alc. Total mg/CaCO₃	ANA1.1	AE1.1	ANA2.1	AE2.1	ANA1.2	AE1.2	ANA2.2	AE2.2
Nº de Dados	74	57	74	57	43	43	43	43
Média	302	161	306	237	284	208	271	236
Mínimo	162	3	191	2	120	35	118	0
Máximo	384	335	412	401	396	321	360	356
CV	0,16	0,59	0,16	0,38	0,21	0,35	0,21	0,30
DP	48,7	94,52	48,63	90,61	60,33	73,64	57,2	71,83

Legenda: ANA1.1 – Reator anaeróbio 1 fase 1 (TDH = 8 horas); AE1.1 – Reator aeróbio 1 fase 1 (TDH = 8 horas); ANA2.1 – Reator anaeróbio 2 fase 1 (TDH = 8 horas); AE2.1 – Reator aeróbio 2 fase 1 (TDH = 4 horas); ANA1.2 – Reator anaeróbio 1 fase 2 (TDH = 8 horas); AE1.2 – Reator aeróbio 1 fase 2 (TDH = 8 horas); ANA2.2 – Reator anaeróbio 2 fase 2 (TDH = 8 horas); AE2.2 – Reator aeróbio 2 fase 2 (TDH = 4 horas); CV – Coeficiente de variação; DP Desvio padrão

O elevado desvio padrão é consequência do processo de nitrificação, que provocou um elevado consumo de alcalinidade, principalmente na partida dos reatores, posteriormente sistema apresentou um equilíbrio em relação a este parâmetro.

Está ilustrada na Figura 5.5 a variação temporal da alcalinidade parcial e total nos reatores.



Legenda: ANA1 – Reator anaeróbio 1 (TDH = 8 horas); AE1 – Reator aeróbio 1 (TDH = 8 horas); ANA2 – Reator anaeróbio 2 (TDH = 8 horas); AE2 – Reator aeróbio 2 (TDH = 4 horas).

Figura 5.5 - Variação temporal da alcalinidade.

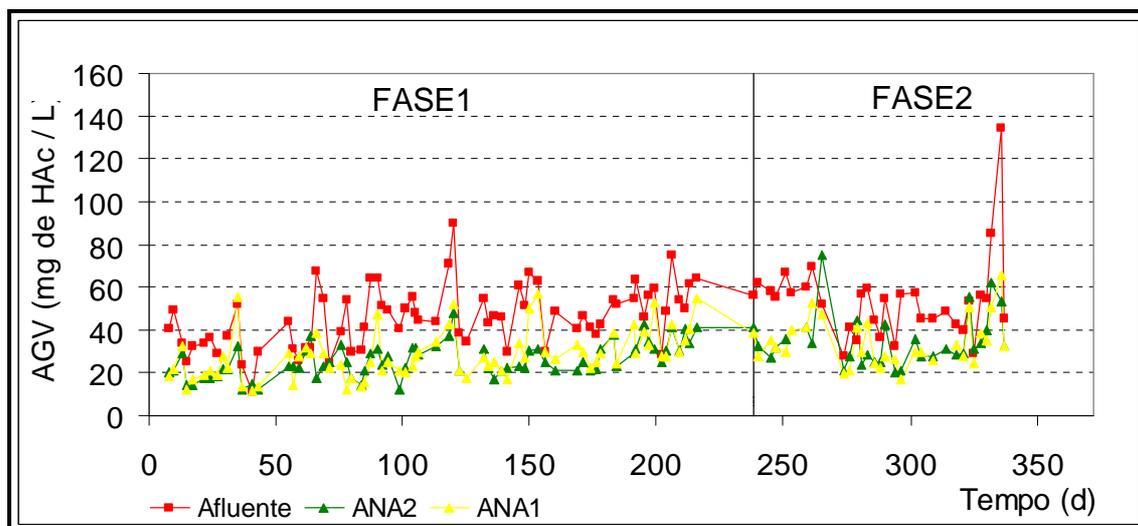
A concentração de ácidos graxos voláteis, nos reatores anaeróbios, apresentou valores médios inferiores a 60 mg/L. Na Tabela 5.6, encontra-se os

limites de confiança de AGV nos reatores anaeróbio e no afluente, na Figura 5.6 está apresentada a variação temporal.

Tabela 5.6 - Resumo da concentração de AGV.

Ponto	Limite de confiança (mg HAc/L)	Erro associando
Afluente fase 1	46 ± 4	8%
ANA1.1	28 ± 3	10%
ANA2.1	26 ± 2	8%
Afluente fase 2	54 ± 7	13%
ANA1.2	35 ± 4	12%
ANA2.2	35 ± 5	13%

Legenda: ANA1.1 – Reator anaeróbio 1 fase 1 (TDH = 8 horas); ANA2.1 – Reator anaeróbio 2 fase 1 (TDH = 8 horas); ANA1.2 – Reator anaeróbio 1 fase 2 (TDH = 8 horas); ANA2.2 – Reator anaeróbio 2 fase 2 (TDH = 8 horas).



Legenda: ANA1 – Reator anaeróbio fase 1; Reator anaeróbio 2 (TDH = 8 horas).

Figura 5.6- Variação temporal de AGV.

É importante que os valores de AGV sejam baixos, pois o acúmulo de ácidos no reator pode levar a sua acidificação, ou seja, a inibição da atividade das metanogênicas, responsáveis pela fase final da digestão anaeróbia.

5.1.3 Sulfato, fósforo.

Foi encontrada diferença altamente significativa na concentração de sulfato no reator anaeróbio ANA1 entre as fases. Na fase 2, a concentração foi aproximadamente 80% inferior. Também ocorreu redução, na mudança de fase no reator anaeróbio ANA2, mas esta não teve significância.

Comparando a concentração de sulfato do efluente anaeróbio com o afluente do sistema (Tabela 5.2), verificam-se reduções médias de aproximadamente 53%, 53%, 90% e 68% em ANA1.1, ANA 2.1, ANA1.2 e ANA2.2, respectivamente. Provavelmente o sulfato foi reduzido para sulfeto nestes reatores visto que a concentração de sulfato nos reatores aeróbios eleva-se superando algumas vezes até a encontrada no afluente. Isto pode ser justificado pela oxidação do sulfeto que retorna a forma de sulfato. Esta observação é importante, pois as bactérias redutoras de sulfato competem pelo mesmo substrato as bactérias metanogênicas e esta competição pode levar ao acúmulo de ácido no reator e por consequência a inibição das metanogênicas.

De maneira geral, a concentração de sulfato no sistema é baixa visto que o Ministério da Saúde através da portaria 518 de 2004 estabelece 250 mg/L como padrão de potabilidade, e os valores máximos encontram-se abaixo deste limite. Por isso não foi observada inibição na atividade as bactérias metanogênicas.

Não foi observada diferença significativa entre os reatores aeróbios. Na Tabela 5.7 está o resumo da concentração de sulfato no sistema.

Tabela 5.7 - Resumo da concentração de sulfato

Sulfato (mg S /L)	ANA1.1	AE1.1	ANA2.1	AE2.1	ANA1.2	AE1.2	ANA2.2	AE2.2
Nº de Dados	65	57	67	57	29	30	29	32
Média	20,57	43,20	21,65	41,58	4,33	48,16	14,53	39,33
Mínimo	0,0	12,03	0,0	0,73	0,05	0,22	0,16	94,37
Máximo	39,21	87,84	66,10	84,12	37,22	124,66	48,01	0,74
CV	0,51	0,34	0,60	0,47	2,19	0,42	0,98	0,56
DP	10,53	14,81	13	19,68	9,47	23,35	14,30	22,16

Legenda: ANA1.1 – Reator anaeróbio 1 fase 1 (TDH = 8 horas); AE1.1 – Reator aeróbio 1 fase 1 (TDH = 8 horas); ANA2.1 – Reator anaeróbio 2 fase 1 (TDH = 8 horas); AE2.1 – Reator aeróbio 2 fase 1 (TDH = 4 horas); ANA1.2 – Reator anaeróbio 1 fase 2 (TDH = 8 horas); AE1.2 – Reator aeróbio 1 fase 2 (TDH = 8 horas); ANA2.2 – Reator anaeróbio 2 fase 2 (TDH = 8 horas); AE2.2 – Reator aeróbio 2 fase 2 (TDH = 4 horas); CV – Coeficiente de variação; DP Desvio padrão

A concentração de fósforo apresentou comportamento semelhante entre todos os reatores e ao longo do experimento. Ocorreram reduções, que variaram de 10 a 30% em relação ao afluente do sistema (Tabela 5.2). Porém esta redução não foi muito expressiva, pois as concentrações de fósforo nos efluentes permaneceram superiores a 1,0 mg/L. (Tabela 5.8)

Tabela 5.8 - Resumo da concentração de fósforo.

Fósforo (mg P/L)	ANA1.1	AE1.1	ANA2.1	AE2.1	ANA1.2	AE1.2	ANA2.2	AE2.2
Nº de Dados	68	56	68	55	12	12	12	12
Média	4,77	4,40	4,76	4,94	4,16	4,12	4,06	4,30
Mínimo	0,00	1,34	0,06	2,17	2,93	2,09	2,60	2,34
Máximo	7,99	7,04	8,44	8,70	5,29	5,61	4,88	5,73
CV	0,26	0,26	0,25	0,25	0,17	0,29	0,19	0,26
DP	1,24	1,13	1,18	1,25	0,7	1,19	0,77	1,12

Legenda: ANA1.1 – Reator anaeróbio 1 fase 1 (TDH = 8 horas); AE1.1 – Reator aeróbio 1 fase 1 (TDH = 8 horas); ANA2.1 – Reator anaeróbio 2 fase 1 (TDH = 8 horas); AE2.1 – Reator aeróbio 2 fase 1 (TDH = 4 horas); ANA1.2 – Reator anaeróbio 1 fase 2 (TDH = 8 horas); AE1.2 – Reator aeróbio 1 fase 2 (TDH = 8 horas); ANA2.2 – Reator anaeróbio 2 fase 2 (TDH = 8 horas); AE2.2 – Reator aeróbio 2 fase 2 (TDH = 4 horas); CV – Coeficiente de variação; DP Desvio padrão

Em média, mais de 80% do fósforo presente nos reatores encontrava-se na forma de *ortofosfato*, ou seja, diretamente disponível para o metabolismo biológico sem necessidade de conversão para formas mais simples.

5.1.4 Coliformes fecais e helmintos

Na fase 1 foram realizadas três coletas para determinação de coliformes fecais. Foi observado conforme esperado, visto que filtros biológicos apresentam baixa capacidade de remoção de coliformes fecais, que não ocorreria remoção. Como na fase 2 a velocidade ascensional foi mais elevada, optou-se pela não realização desta análise, visto que os resultados também seriam negativos.

Quanto à remoção de ovos de helminto, o sistema apresentou-se eficiente em ambas as fases. Foram realizadas duas análises na fase 1, no 92º e 183º dia de experimento e três análises na fase 2, no 288º, 336º e 342º dia. Observa-se na Tabela 5.9 que apesar do aumento da velocidade ascensional na fase 2, obteve-se o efluente contínuo apresentando menos de 1 ovo viável por litro, portanto dentro do limite estabelecido pela Organização Mundial de Saúde para o reuso na irrigação (WHO, 1989)

Tabela 5.9 – Resumo da remoção de helmintos.

Dias	A	ANA1	AE1	ANA2	AE2
FASE 1					
92º	50	0,9	0,7	0,9	0,7
183º	346,6	0,8	0,8	0,8	0,0
FASE 2					
288º	6,7	0,0	0,0	0,0	0,0
336º	15,9	0,6	0,9	0,8	0,2
342º	44,8	0,0	0,0	0,7	0,0

Legenda: ANA1 – Reator anaeróbio 1 fase 1 (TDH = 8 horas); AE1 – Reator aeróbio 1 fase 1 (TDH = 8 horas); ANA2 – Reator anaeróbio 2 fase 1 (TDH = 8 horas); AE2 – Reator aeróbio 2 fase 1 (TDH = 4 horas).

5.1.5 Sólidos

Não foi observada diferença significativa na retenção de ST. Em média, a retenção global e nos reatores anaeróbios manteve-se no intervalo de 35 a 40%. Considerando apenas os reatores aeróbios, esta média é reduzida para 10% (média calculada desconsiderando eficiências negativas que ocorrem devido à produção e saída de lodo nestes reatores).

Com relação aos STF, foi observada diferença significativa no reator aeróbio com TDH de 8 horas durante a mudança de fase. AE1.1 apresentou média de 465 mg/L com um coeficiente de variação de 1,13 enquanto AE1.2 obteve média de 472 mg/L com coeficiente de variação de 0,17.

No tocante ao SSV, verifica-se que os reatores aeróbios apresentaram diferença altamente significativa na mudança de fase. A retenção que era de aproximadamente 90% na fase 1, em ambos os reatores, foi reduzida para cerca 80% na fase 2, ou seja, a concentração média de SSV aumentou de 15 mg/L para 29 mg/L em AE1 e de 18 mg/L para 34 mg/L em AE2. (Tabela 5.10).

Tabela 5.10 - Resumo da concentração SSV

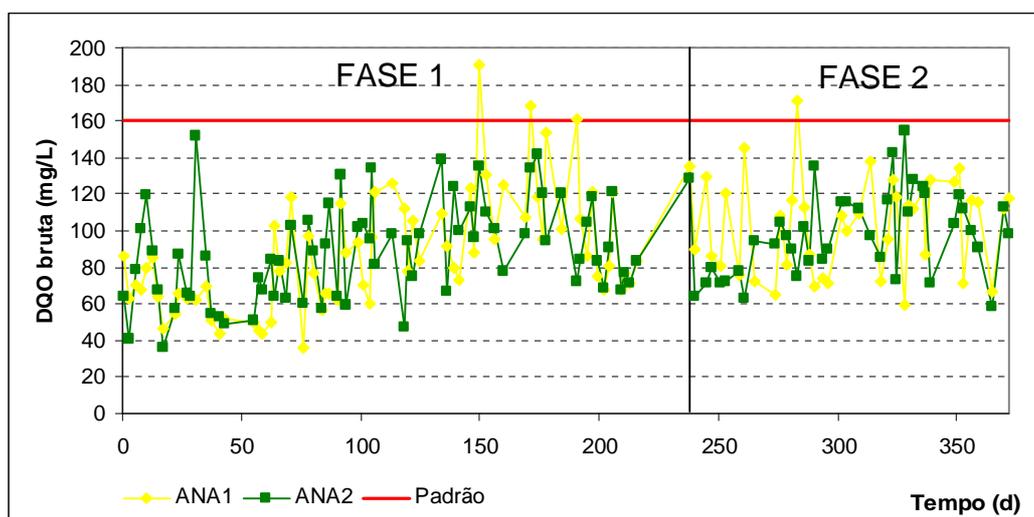
	Concentração (mg SSV/L)					Eficiência de retenção (%)				
	Nº de dados	Méd	Mín	Máx	CV	Nº de dados	Méd	Mín	Max	CV
A 1	69	251,0	31,0	865,0	0,76	-	-	-	-	-
ANA1.1	69	23,5	0,0	108,8	0,89	69	85,1	12,9	100,0	0,21
AE1.1	55	15,5	0,0	127,0	1,38	45	59,5	3,7	100,0	0,48
Global 1.1	-	-	-	-	-	55	92,6	16,4	100,0	0,13
ANA2.1	69	26,1	0,5	86,0	0,73	69	83,6	12,9	99,8	0,21
AE2.1	55	18,4	0,0	110,0	0,97	41	50,8	7,3	100,0	0,46
Global 2.1	-	-	-	-	-	55	89,9	27,6	100,0	0,14
A 2	39	223,2	47,0	740,0	0,64	-	-	-	-	-
ANA1.2	39	24,5	1,5	55,0	0,55	39	84,9	5,3	99,5	0,18
AE1.2	39	29,0	0,0	148,7	0,93	20	43,5	3,3	100,0	0,65
Global 1.2	-	-	-	-	-	39	82,9	19,5	100,0	0,22
ANA2.2	39	23,0	1,0	60,0	0,62	39	85,9	13,8	99,4	0,18
AE2.2	39	34,0	2,5	118,0	0,81	16	27,2	0,6	66,9	0,71
Global 2.2	-	-	-	-	-	38	81,8	22,2	99,2	0,21

Legenda: A1 – Afluente fase 1; ANA1.1 – Reator anaeróbio 1 fase 1 (TDH = 8 horas); AE1.1 – Reator aeróbio 1 fase 1 (TDH = 8 horas); ANA2.1 – Reator anaeróbio 2 fase 1 (TDH = 8 horas); AE2.1 – Reator aeróbio 2 fase 1 (TDH = 4 horas); A2 – Afluente fase 2; ANA1.2 – Reator anaeróbio 1 fase 2 (TDH = 8 horas); AE1.2 – Reator aeróbio 1 fase 2 (TDH = 8 horas); ANA2.2 – Reator anaeróbio 2 fase 2 (TDH = 8 horas); AE2.2 – Reator aeróbio 2 fase 2 (TDH = 4 horas). CV – Coeficiente de variação.

Não foi observada diferença entre os reatores com relação à SSF e STV, os SST apresentaram comportamento semelhante ao SSV.

5.1.6 DQO e DBO

A remoção da DQO bruta média, nos reatores anaeróbios, foi superior a 70%, mostrando que a digestão anaeróbia possuía bom desempenho. As concentrações médias foram inferiores a 160 mg/L, limite estabelecido pelo CPRH (2002) para reatores anaeróbios como está ilustrado Figura 5.7. Observa-se que ANA1 atendeu a legislação em 95% dos pontos amostrados enquanto ANA2 atendeu totalmente.



Legenda: ANA1 – Reator anaeróbio fase 1; Reator anaeróbio 2 (TDH = 8 horas).

Figura 5.7 – Variação temporal da DQO bruta.

Com a adição dos reatores aeróbios houve um incremento na eficiência, porém AE2 (TDH = 4 horas) não apresentou diferença significativa em relação a ANA2, apresentado efluentes com concentração de 12% e 3% superior nas fases 1 e 2 respectivamente. AE1 (TDH = 8 horas) apresentou um polimento de matéria orgânica médio de 35% na fase 1, e 26% na fase 2 (Tabela 5.11).

Tabela 5.11 - Resumo da concentração de DQO bruta

DQO bruta (mg/L)	ANA1.1	AE1.1	ANA2.1	AE2.1	ANA1.2	AE1.2	ANA2.2	AE2.2
Nº de dados	72	55	72	54	40	41	41	41
Média	86,58	56,27	88,52	78,04	102,96	76,46	97,22	94,13
Mínimo	36,34	9,33	36,36	36,84	59,21	24,24	58,00	45,50
Máximo	190,49	161,91	152,28	212,68	171,36	216,11	154,38	234,39
CV	0,36	0,63	0,30	0,44	0,26	0,54	0,23	0,42
DP	31,06	35,22	26,71	34,38	26,37	41,54	22,01	39,84

Legenda: ANA1.1 – Reator anaeróbio 1 fase 1 (TDH = 8 horas); AE1.1 – Reator aeróbio 1 fase 1 (TDH = 8 horas); ANA2.1 – Reator anaeróbio 2 fase 1 (TDH = 8 horas); AE2.1 – Reator aeróbio 2 fase 1 (TDH = 4 horas); ANA1.2 – Reator anaeróbio 1 fase 2 (TDH = 8 horas); AE1.2 – Reator aeróbio 1 fase 2 (TDH = 8 horas); ANA2.2 – Reator anaeróbio 2 fase 2 (TDH = 8 horas); AE2.2 – Reator aeróbio 2 fase 2 (TDH = 4 horas); CV – Coeficiente de variação; DP Desvio padrão

Considerando a DQO filtrada, os reatores anaeróbios tiveram comportamento semelhante, apresentando concentrações médias inferiores a 65 mg/L e valores máximos de 115,79 mg/L, 95,61 mg/L, 103,07 mg/L e 89,36 mg/L em ANA1.1, ANA2.1, ANA1.2 e ANA2.2, respectivamente (Tabela 5.12).

O polimento de matéria orgânica nos reatores aeróbios, diferente do que ocorreu com a DQO bruta, apresentou significância em AE2.2, que reduziu a DQO filtrada em média 28%, ou seja, existe polimento de matéria orgânica em AE2.2, porém, devido a velocidade ascensional elevada e a presença de SSV no efluente, este polimento não foi observado na DQO bruta.

Tabela 5.12 - Resumo da concentração DQO filtrada

DQO filtrada (mg/L)	ANA1.1	AE1.1	ANA2.1	AE2.1	ANA1.2	AE1.2	ANA2.2	AE2.2
Nº de Dados	74	57	72	57	39	39	39	39
Média	56,68	42,29	55,88	53,50	61,71	38,93	61,17	43,77
Mínimo	25,13	10,08	27,39	20,25	30,00	16,01	30,66	23,27
Máximo	115,79	86,37	95,61	105,23	103,07	61,58	89,36	66,54
CV	0,35	0,39	0,30	0,36	0,24	0,33	0,20	0,25
DP	20,11	16,66	16,35	19,34	14,67	12,71	12,38	11,14

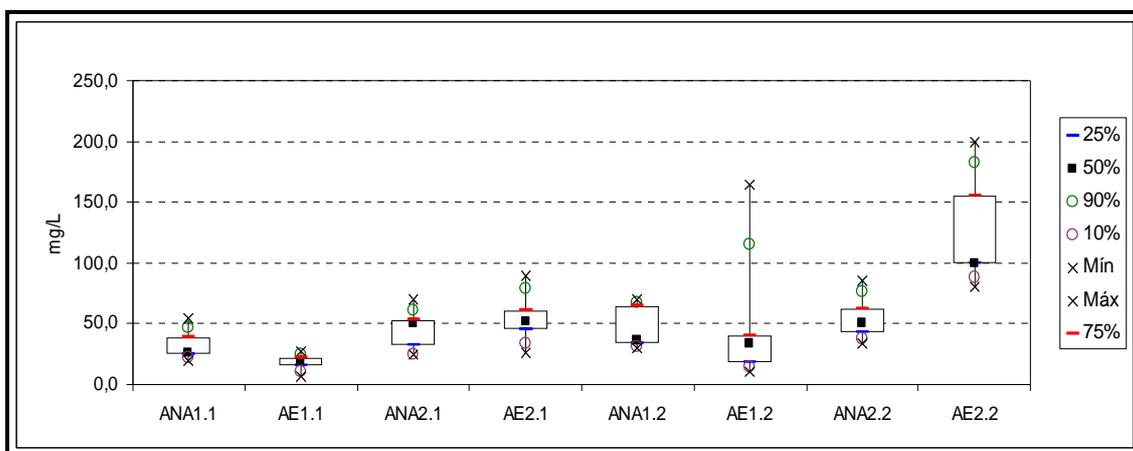
Legenda: ANA1.1 – Reator anaeróbio 1 fase 1 (TDH = 8 horas); AE1.1 – Reator aeróbio 1 fase 1 (TDH = 8 horas); ANA2.1 – Reator anaeróbio 2 fase 1 (TDH = 8 horas); AE2.1 – Reator

aeróbio 2 fase 1 (TDH = 4 horas); ANA1.2 – Reator anaeróbio 1 fase 2 (TDH = 8 horas); AE1.2 – Reator aeróbio 1 fase 2 (TDH = 8 horas); ANA2.2 – Reator anaeróbio 2 fase 2 (TDH = 8 horas); AE2.2 – Reator aeróbio 2 fase 2 (TDH = 4 horas); CV – Coeficiente de variação; DP Desvio padrão

Foram realizadas 5 coletas para análise de DBO bruta e filtrada em cada fase e mais 2 coletas apenas nos reatores anaeróbios, nos períodos de partida anteriores ao início da operação dos reatores aeróbios.

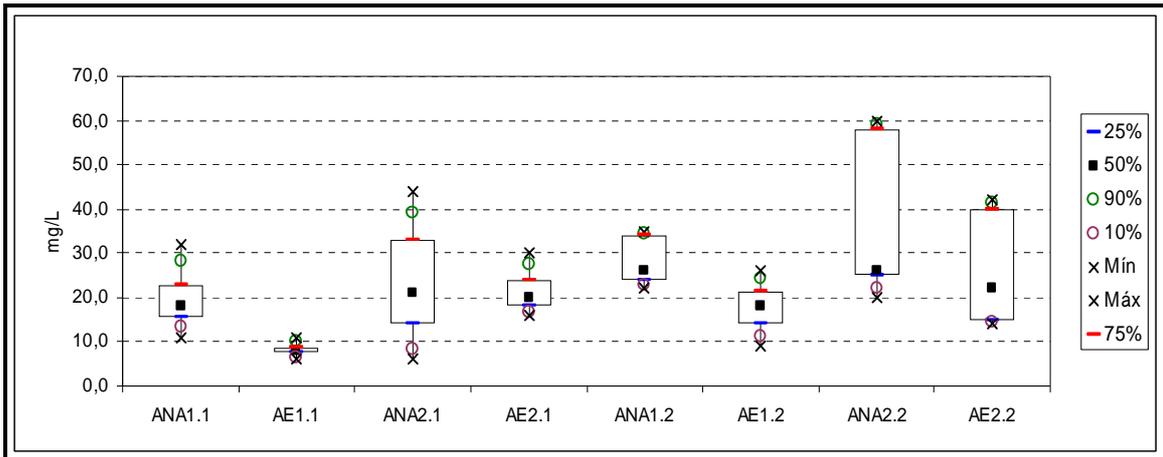
De maneira geral, a remoção média de DBO bruta nos reatores anaeróbios foi de 80% e a eficiência global do sistema variou de 93% em AE1.1 para 62% em AE2.2. É importante ressaltar que a eficiência de DBO filtrada em AE2.2 foi de 73%, reforçando as interferências dos sólidos.

A concentração de DBO bruta (Figura 5.8) nos reatores anaeróbios foi em média inferior a 80 mg/L, padrão do CPRH (2002) e a filtrada teve valor máximo de 60 mg/L, ocorrido em ANA2.2 (Figura 5.9)



Legenda: ANA1.1 – Reator anaeróbio 1 fase 1 (TDH = 8 horas); AE1.1 – Reator aeróbio 1 fase 1 (TDH = 8 horas); ANA2.1 – Reator anaeróbio 2 fase 1 (TDH = 8 horas); AE2.1 – Reator aeróbio 2 fase 1 (TDH = 4 horas); ANA1.2 – Reator anaeróbio 1 fase 2 (TDH = 8 horas); AE1.2 – Reator aeróbio 1 fase 2 (TDH = 8 horas); ANA2.2 – Reator anaeróbio 2 fase 2 (TDH = 8 horas); AE2.2 – Reator aeróbio 2 fase 2 (TDH = 4 horas).

Figura 5.8 - Resumo da concentração de DBO bruta.



Legenda: ANA1.1 – Reator anaeróbio 1 fase 1 (TDH = 8 horas); AE1.1 – Reator aeróbio 1 fase 1 (TDH = 8 horas); ANA2.1 – Reator anaeróbio 2 fase 1 (TDH = 8 horas); AE2.1 – Reator aeróbio 2 fase 1 (TDH = 4 horas); ANA1.2 – Reator anaeróbio 1 fase 2 (TDH = 8 horas); AE1.2 – Reator aeróbio 1 fase 2 (TDH = 8 horas); ANA2.2 – Reator anaeróbio 2 fase 2 (TDH = 8 horas); AE2.2 – Reator aeróbio 2 fase 2 (TDH = 4 horas).

Figura 5.9 – Resumo da concentração de DBO filtrada.

5.1.7 Nitrogênio

As concentrações de nitrogênio amoniacal e NTK apresentaram diferença significativa nos reatores anaeróbios com a mudança de fase, não havendo diferença entre ANA1 e ANA2 durante a mesma fase. Em média a concentração de NTK e NH_4 diminuiu 20%, provavelmente em virtude da diluição ocorrida com recirculação, uma vez que o efluente aeróbio apresenta concentrações menores de NTK e NH_4 que o afluente.

Considerando os reatores aeróbios foi verificada apenas diferença entre os reatores na fase 1. AE1.1 apresentou média inferior, provavelmente relacionado ao processo de nitrificação que foi estabelecido primeiro neste reator. Na Tabela 5.13 e Tabela 5.14 encontra-se um resumo das concentrações de NH_4 e NTK.

Tabela 5.13 - Resumo da concentração de NTK.

N-NTK (mg/L)	ANA1.1	AE1.1	ANA2.1	AE2.1	ANA1.2	AE1.2	ANA2.2	AE2.2
Nº de dados	73	57	73	57	43	43	42	43
Média	40,31	21,63	41,10	34,10	32,58	22,40	32,65	28,75
Mínimo	8,00	2,24	7,00	2,80	9,90	2,80	3,08	2,10
Máximo	64,96	52,08	67,48	68,32	50,96	46,76	49,56	70,84
CV	0,24	0,61	0,30	0,44	0,29	0,51	0,33	0,44
DP	9,66	13,1	12,32	14,86	9,4	11,51	10,91	12,63

Legenda: ANA1.1 – Reator anaeróbio 1 fase 1 (TDH = 8 horas); AE1.1 – Reator aeróbio 1 fase 1 (TDH = 8 horas); ANA2.1 – Reator anaeróbio 2 fase 1 (TDH = 8 horas); AE2.1 – Reator aeróbio 2 fase 1 (TDH = 4 horas); ANA1.2 – Reator anaeróbio 1 fase 2 (TDH = 8 horas); AE1.2 – Reator aeróbio 1 fase 2 (TDH = 8 horas); ANA2.2 – Reator anaeróbio 2 fase 2 (TDH = 8 horas); AE2.2 – Reator aeróbio 2 fase 2 (TDH = 4 horas); CV – Coeficiente de variação; DP Desvio padrão

Tabela 5.14 - Resumo da concentração de NH₄.

N-NH4 (mg/L)	ANA1.1	AE1.1	ANA2.1	AE2.1	ANA1.2	AE1.2	ANA2.2	AE2.2
Nº de Dados	73	57	73	57	43	43	42	43
Média	33,40	16,57	32,69	26,31	25,80	16,24	26,20	20,84
Mínimo	6,80	1,12	5,10	2,52	7,50	0,84	0,84	1,00
Máximo	52,92	42,84	57,12	63,28	43,40	37,80	43,96	62,16
CV	0,30	0,67	0,34	0,48	0,32	0,60	0,38	0,54
DP	10,09	11,03	11,08	12,69	8,32	9,67	9,29	11,15

Legenda: ANA1.1 – Reator anaeróbio 1 fase 1 (TDH = 8 horas); AE1.1 – Reator aeróbio 1 fase 1 (TDH = 8 horas); ANA2.1 – Reator anaeróbio 2 fase 1 (TDH = 8 horas); AE2.1 – Reator aeróbio 2 fase 1 (TDH = 4 horas); ANA1.2 – Reator anaeróbio 1 fase 2 (TDH = 8 horas); AE1.2 – Reator aeróbio 1 fase 2 (TDH = 8 horas); ANA2.2 – Reator anaeróbio 2 fase 2 (TDH = 8 horas); AE2.2 – Reator aeróbio 2 fase 2 (TDH = 4 horas); CV – Coeficiente de variação; DP Desvio padrão

Cerca de 80% do NTK nos reatores anaeróbios é formado por amônio, ou seja, passíveis de nitrificação se dadas às condições ideais do processo.

Como os reatores aeróbios não receberam nenhum tipo de inoculação e o TDH do AE1 é maior que AE2, este conseguiu formar a biomassa nitrificante em um menor intervalo de tempo. A primeira detecção de nitrato no efluente aeróbio ocorreu no 7º (sétimo) dia de operação de AE1.1 e no 21º (vigésimo primeiro) de AE2.1. Na fase 2, a detecção de nitrato ocorreu no mesmo dia em ambos os reatores, uma vez que a biomassa já estava formada.

A produção de nitrato é bastante sensível a presença de oxigênio dissolvido, com os problemas ocorridos na ETE a nitrificação foi interrompida. Observou-se, porém que com o decorrer do experimento a recuperação dos stress sofridos ocorriam em menores intervalos de tempo, conseqüência da maior quantidade de biomassa presente nos reatores.

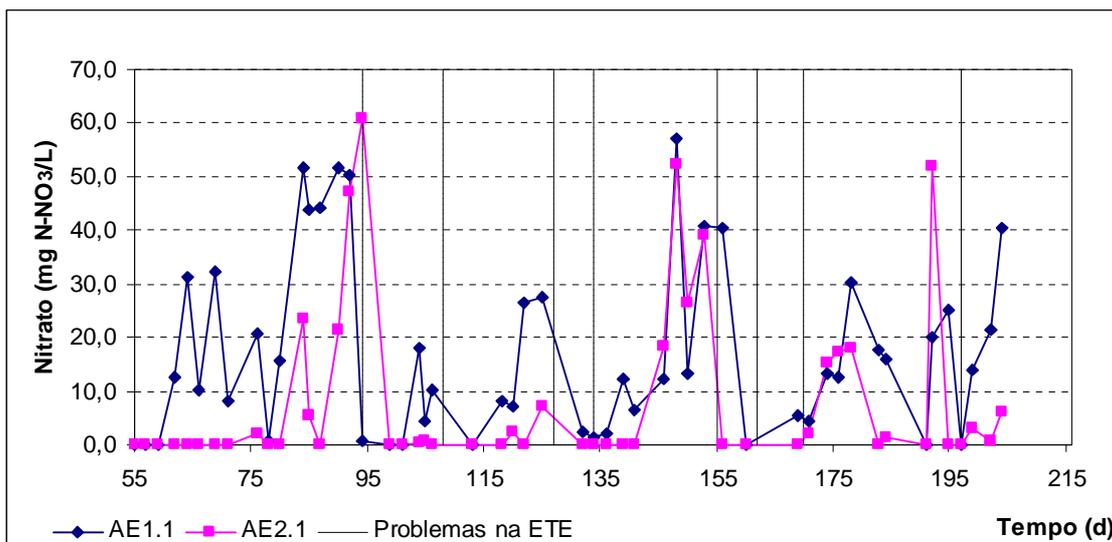
Foi encontrado nitrato em 83% dos dias amostrados em AE1.1. Essa porcentagem diminuiu para 44% em AE2.1. Considerando-se valores de nitrato iguais a zero (fase de adaptação e recuperação do stress), AE1.1 e AE2.1, apresentaram diferença significativa, um vez que os valores iguais a zero são retirados, esse reatores passaram a ter comportamento semelhante. Ou seja, uma vez estabelecido o processo de nitrificação com a manutenção das condições ideais, o reator aeróbio com TDH de 4 horas (AE2) apresenta comportamento semelhante ao que possui TDH de 8 horas (AE1) (Tabela 5.15).

Tabela 5.15 - Resumo da concentração de nitrato.

N-NH₃ (mg/L)	<i>OBS.: Considerando todos os valores</i>				<i>OBS.: Desconsiderando valores iguais a zeros</i>			
	AE1.1	AE1.2	AE2.1	AE2.2	AE1.1	AE2.1	AE1.2	AE2.2
Nº de dados	52	52	43	43	43	23	25	22
Média	17,02	8,13	3,25	2,16	20,58	18,37	5,59	4,23
Mínimo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,58	0,50	0,10	0,20
Máximo	57,20	60,68	26,90	21,30	57,20	60,68	26,90	21,30
CV	0,97	1,93	1,64	2,07	0,78	1,05	1,07	1,32
DP	16,52	15,67	5,32	4,48	16,09	19,29	5,99	5,57

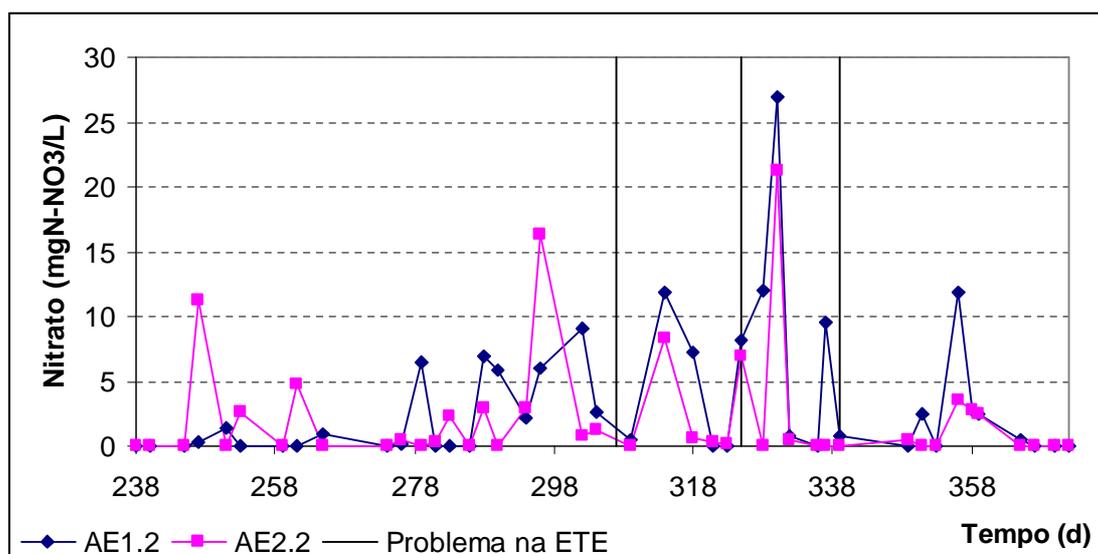
Legenda: AE1.1 – Reator aeróbio 1 fase 1 (TDH = 8 horas); AE2.1 – Reator aeróbio 2 fase 1 (TDH = 4 horas); AE1.2 – Reator aeróbio 1 fase 2 (TDH = 8 horas); AE2.2 – Reator aeróbio 2 fase 2 (TDH = 4 horas); CV – Coeficiente de variação; DP Desvio padrão

Observa-se que não há diferença significativa entre os reatores na fase 2 uma vez que a biomassa já estava formada. Na Figura 5.10 e Figura 5.11 está ilustrada a variação temporal de nitrato nas fases 1 e 2, respectivamente.



Legenda: AE1.1 – Reator aeróbio 1 fase 1 (TDH = 8 horas); AE2.1 – Reator aeróbio 2 fase 1 (TDH = 4 horas).

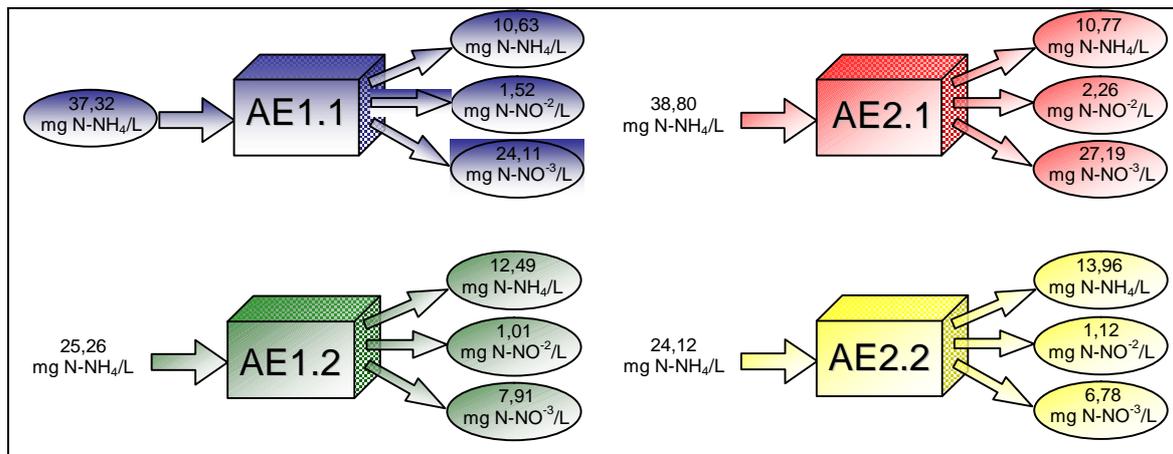
Figura 5.10 - Variação temporal de nitrato - fase 1.



Legenda: AE1.2 – Reator aeróbio 1 fase 2 (TDH = 8 horas); AE2.2 – Reator aeróbio 2 fase 2 (TDH = 4 horas).

Figura 5.11 - Variação temporal do nitrato - fase 2.

Realizando um balanço de massa (Figura 5.12) simplificado nos reatores aeróbios, verifica-se que na fase 1 aproximadamente 70% do nitrogênio que entra no reator é convertido a nitrato. Esta conversão é de aproximadamente 30% na fase 2. Provavelmente o processo de nitrificação sofreu interferência com aumento da velocidade ascensional.

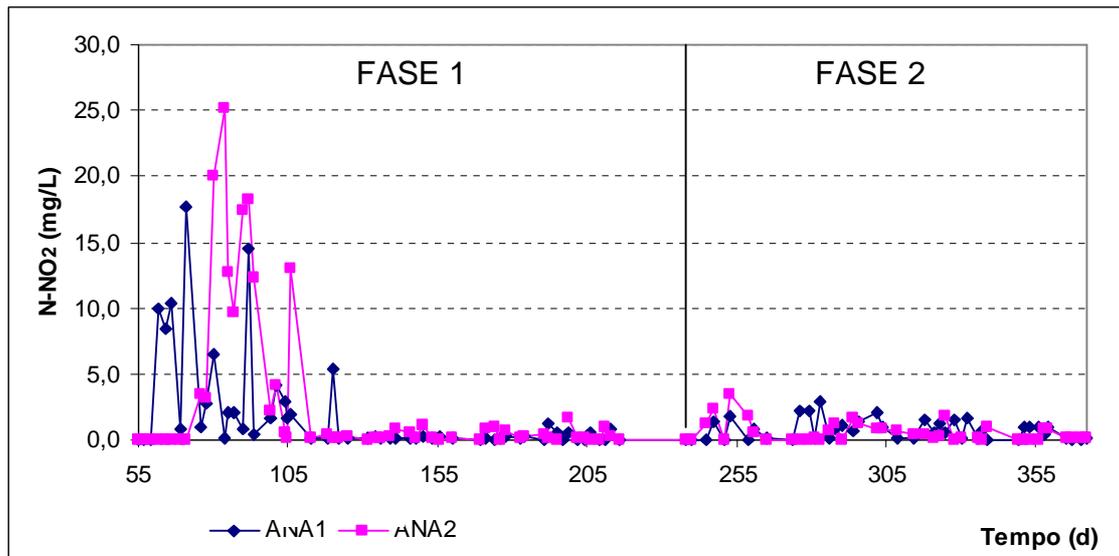


OBS: Os balanços de massa foram calculados com valores médios de períodos que apresentaram processo de nitrificação constante

Legenda: AE1.1 – Reator aeróbio 1 fase 1 (TDH = 8 horas); AE2.1 – Reator aeróbio 2 fase 1 (TDH = 4 horas); AE1.2 – Reator aeróbio 1 fase 2 (TDH = 8 horas); AE2.2 – Reator aeróbio 2 fase 2 (TDH = 4 horas).

Figura 5.12 - Balanço de massa de nitrogênio.

Com relação ao nitrito, todos os reatores apresentaram comportamento semelhante, sendo encontradas concentrações de nitrito em aproximadamente 70% dos pontos amostrados. Na Figura 5.13 está ilustrada a variação temporal de nitrito, nela pode ser observada que as maiores concentrações foram obtidas durante a partida dos reatores. Após a formação da biomassa nitrificante, os valores de nitrito diminuem uma vez que a nitrificação ocorre com uma velocidade menor que a nitratação, ou seja, o nitrito formado é rapidamente consumido pelas *Nitrobacter* não permitindo o seu acúmulo dentro dos reatores. Na Tabela 5.16 está um resumo da concentração de nitrito presente nos reatores aeróbios.



Legenda: AE1 – Reator aeróbio 1; AE2 – Reator aeróbio 2.
Figura 5.13 - Variação temporal de nitrito.

Tabela 5.16 - Resumo da concentração de nitrito.

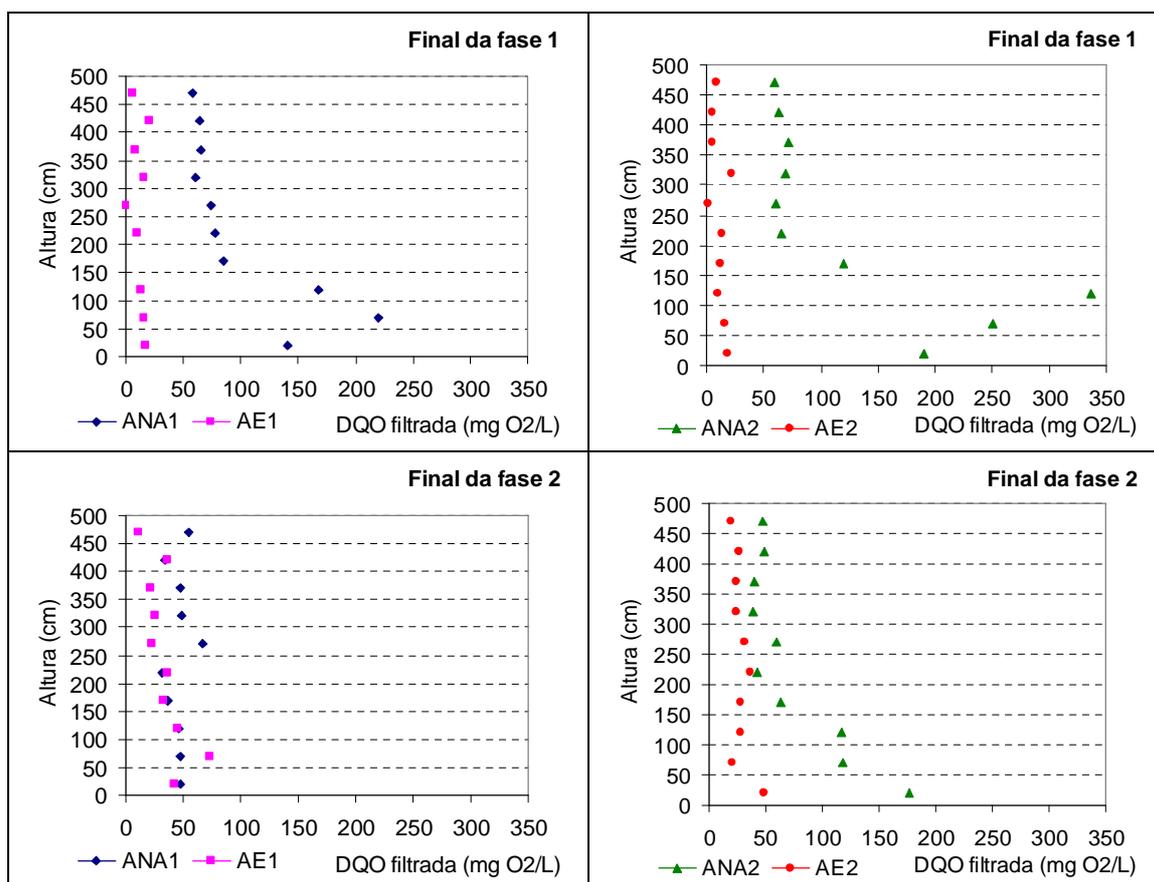
N-NH ₂ (mg/L)	OBS.: Considerando todos os valores				OBS.: Desconsiderando valores iguais a zeros			
	AE1.1	AE1.2	AE2.1	AE2.2	AE1.1	AE2.1	AE1.2	AE2.2
Nº de dados	57	56	43	42	45	40	33	27
Média	1,79	2,74	0,74	0,55	2,27	3,83	0,96	0,86
Mínimo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10	0,10	0,10	0,10
Máximo	17,70	25,10	2,90	3,40	17,70	25,10	2,90	3,40
CV	2,03	2,13	1,04	1,37	1,75	1,73	0,77	0,93

Legenda: AE1.1 – Reator aeróbio 1 fase 1 (TDH = 8 horas); AE2.1 – Reator aeróbio 2 fase 1 (TDH = 4 horas); AE1.2 – Reator aeróbio 1 fase 2 (TDH = 8 horas); AE2.2 – Reator aeróbio 2 fase 2 (TDH = 4 horas).

5.2 Perfis dos reatores

Assim como foi observado ao longo do experimento, à degradação de matéria orgânica carbonácea ocorre em sua maioria, nos reatores anaeróbios, existindo apenas um polimento nos reatores aeróbios. Esse comportamento pode ser observado no perfil de DQO filtrada (Figura 5.14) uma vez que a maior parte desta degradação ocorre na base do reator UASB.

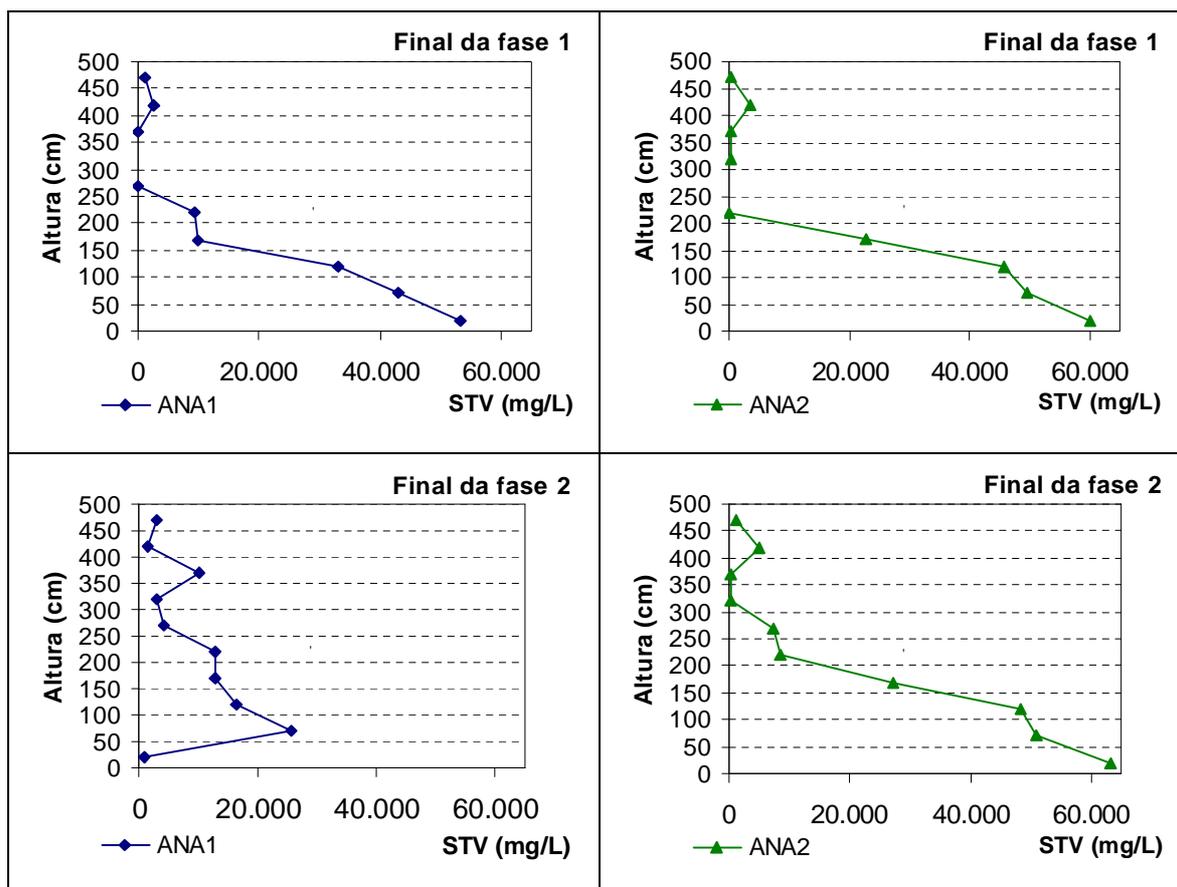
A baixa concentração de DQO determinada no primeiro ponto de ANA1.2 deve ter sofrido interferência da recirculação, uma vez que o mecanismo de recirculação está instalado na base do reator, provavelmente, não ocorreu a completa mistura do afluente e efluente aeróbio, isso explica o baixo valor neste ponto.



Legenda: ANA1 – Reator anaeróbio 1 (TDH = 8 horas); AE1 – Reator aeróbio 1 (TDH = 8 horas); ANA2 – Reator anaeróbio 2 (TDH = 8 horas); AE2 – Reator aeróbio 2 (TDH = 4 hora).

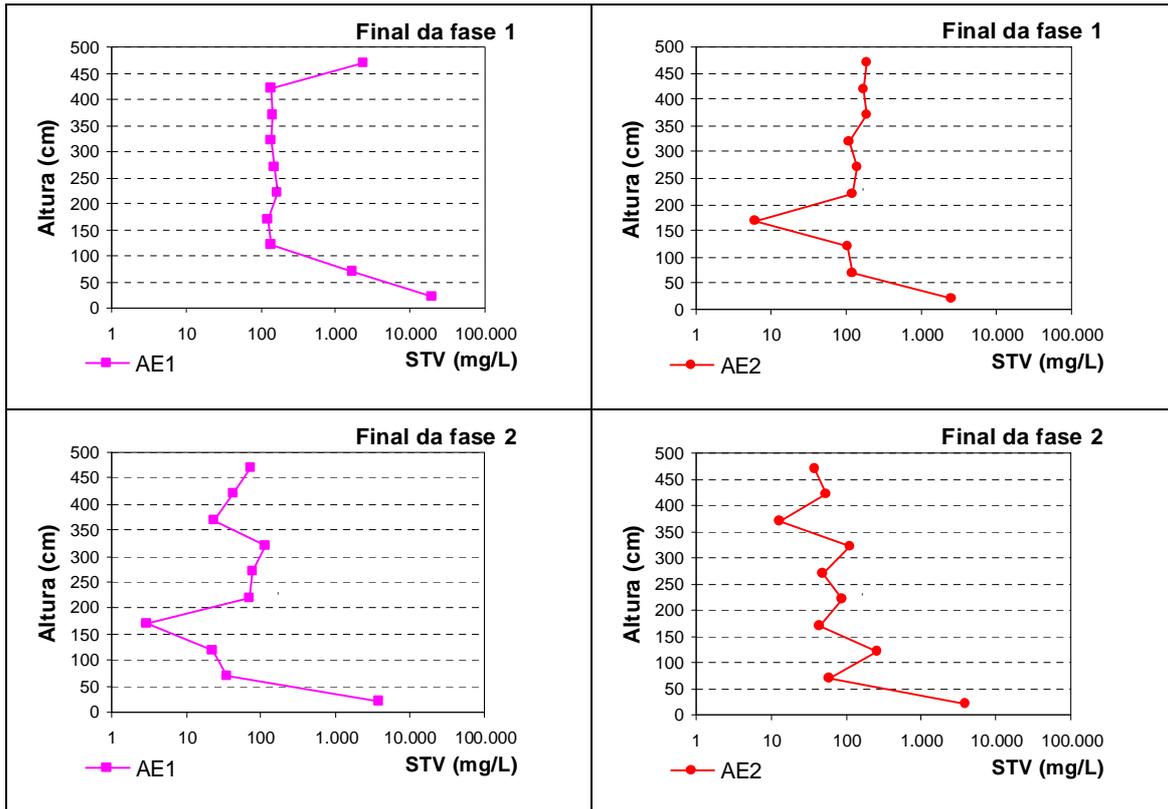
Figura 5.14 - Perfil de DQO filtrada ao longo da altura dos reatores.

Nos perfil de STV (Figura 5.15), verifica-se que na fase 1 cerca de 90% de STV encontra-se na parte inferior do reator UASB, antes da metade do seu volume em ANA1 e 98% em ANA2. Na fase 2, ANA2 continua com percentual elevado, 90% enquanto ANA1 apresenta apenas 62% dos STV na parte inferior do reator UASB, verifica-se também a interferência do mecanismo de recirculação em ANA1.2.

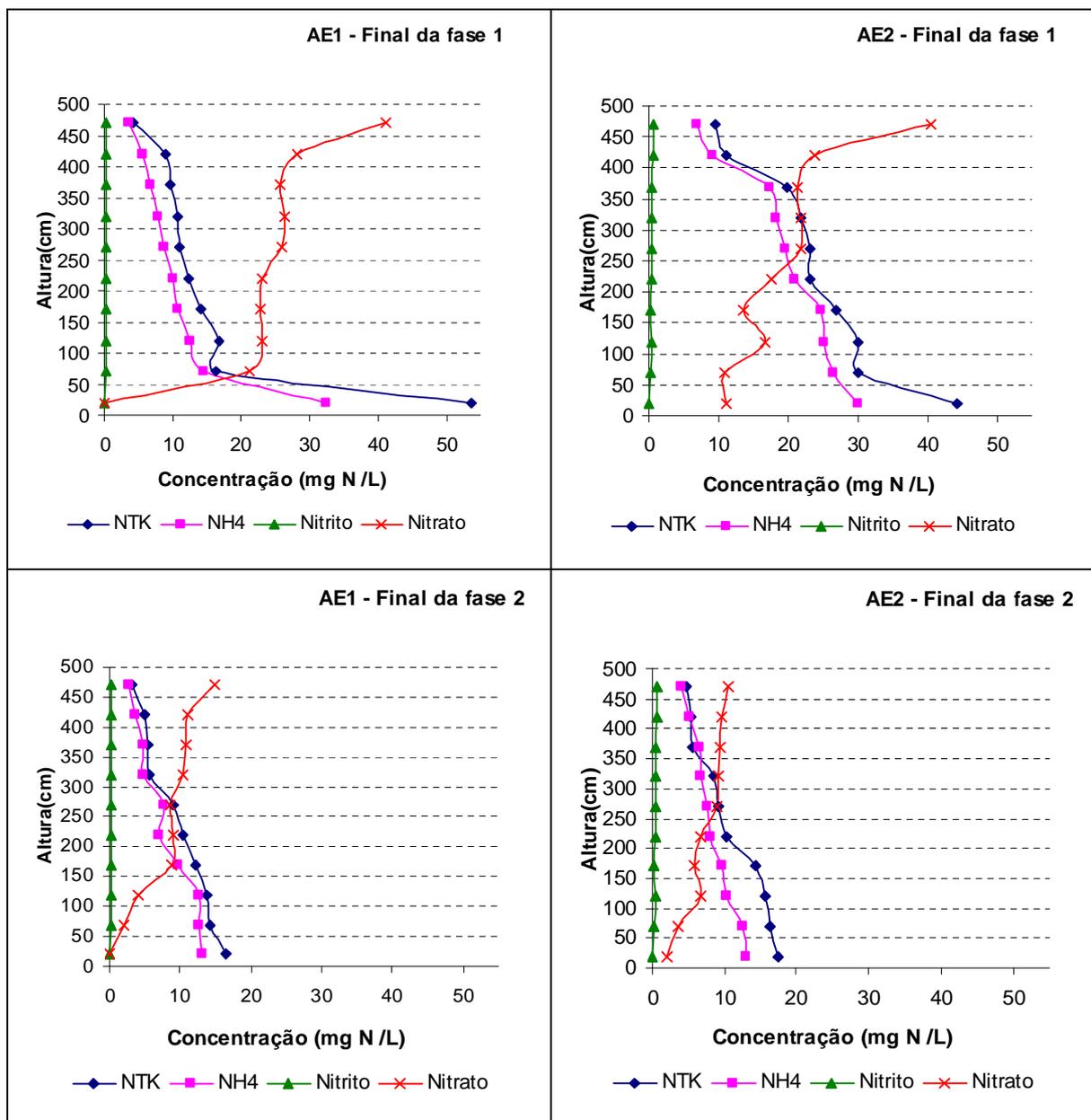


Legenda: ANA1 – Reator anaeróbio 1; ANA2 – Reator anaeróbio 2 (TDH = 8 horas).
Figura 5.15 - Perfil de STV nos reatores anaeróbios ao longo da altura dos reatores.

Os reatores aeróbios apresentam comportamento semelhante em relação STV, apresentando maior concentração na base do reator. Porém AE1.1 possuía maior concentração de STV que os demais reatores (Figura 5.16). Relacionando este fato ao perfil de nitrogênio (Figura 5.17), verifica-se que o processo de nitrificação ocorreu mais próxima a base em AE1.1 e de maneira mais dispersa nos demais reatores. Como citado anteriormente, a fase 2 apresentou menores concentrações de N-NTK e N-NH₄ e, conseqüentemente, de N-NO₃.



Legenda: AE1 – Reator aeróbio 1 (TDH = 8 horas); AE2 – Reator aeróbio 2 (TDH = 4 horas).
Figura 5.16 - Perfil de STV nos reatores aeróbios ao longo da altura dos reatores.

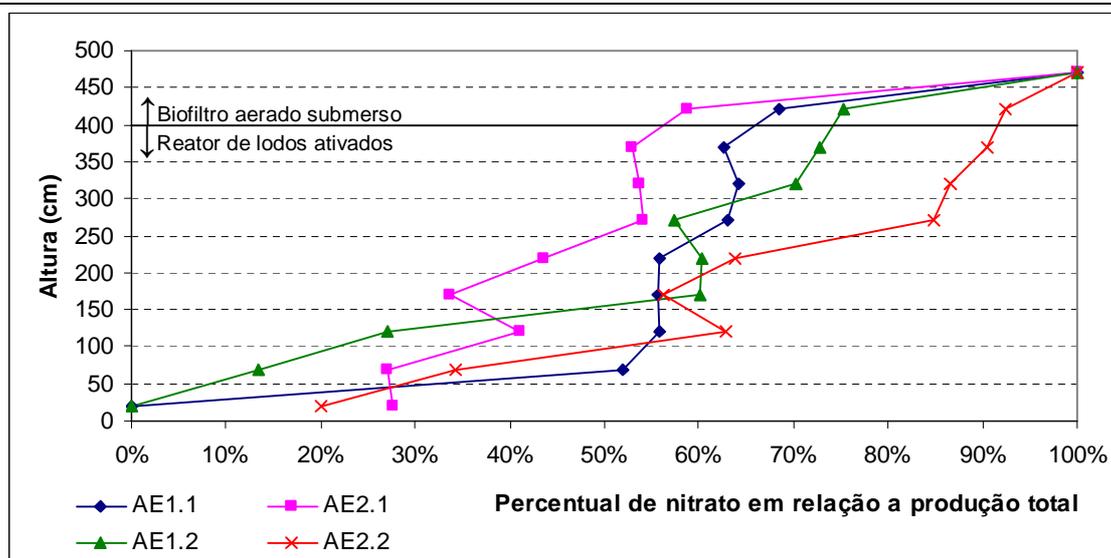


Legenda: AE1 – Reator aeróbio 1 (TDH = 8 horas); AE2 – Reator aeróbio 2 (TDH = 4 horas).
Figura 5.17 - Perfil de nitrogênio ao longo da altura dos reatores.

No perfil verifica-se que 37% do nitrato produzido em AE1.1 é proveniente do biofiltro, esse percentual é de 47% em AE2.1, 27% em AE1.2 e 10% em AE2.2 (Tabela 5.17). Apesar de ter ocorrido uma redução da participação do biofiltro aerado submerso no processo de nitrificação com a mudança de fase, é importante ressaltar que o biofiltro é fundamental para a contenção da biomassa no interior do reator.

Tabela 5.17 – Porcentagem de nitrato produzida no reator e no filtro.

	Reator	Filtro
AE1.1	63%	37%
AE2.1	53%	47%
AE1.2	73%	27%
AE2.2	90%	10%



Legenda: AE1.1 – Reator aeróbio 1 fase 1 (TDH = 8 horas); AE2.1 – Reator aeróbio 2 fase 1 (TDH = 4 horas); AE1.2 – Reator aeróbio 1 fase 2 (TDH = 8 horas); AE2.2 – Reator aeróbio 2 fase 2 (TDH = 4 horas).

5.3 Experimento de bancada

No perfil da fase 1 foi determinado que os reatores anaeróbios possuíam aproximadamente 40 mg SSV/L. Então a quantidade de lodo adotada no experimento de bancada foi de 20 mg SSV/L (Reatores A), 40 mg SSV/L (Reatores B) e 60 mg SSV/L (Reatores C).

Os reatores controle não apresentaram degradação de nitrato e não foi encontrado nitrito nos reatores A, B e C após o experimento. A degradação temporal do nitrato encontra-se ilustradas nas Figura 5.18.

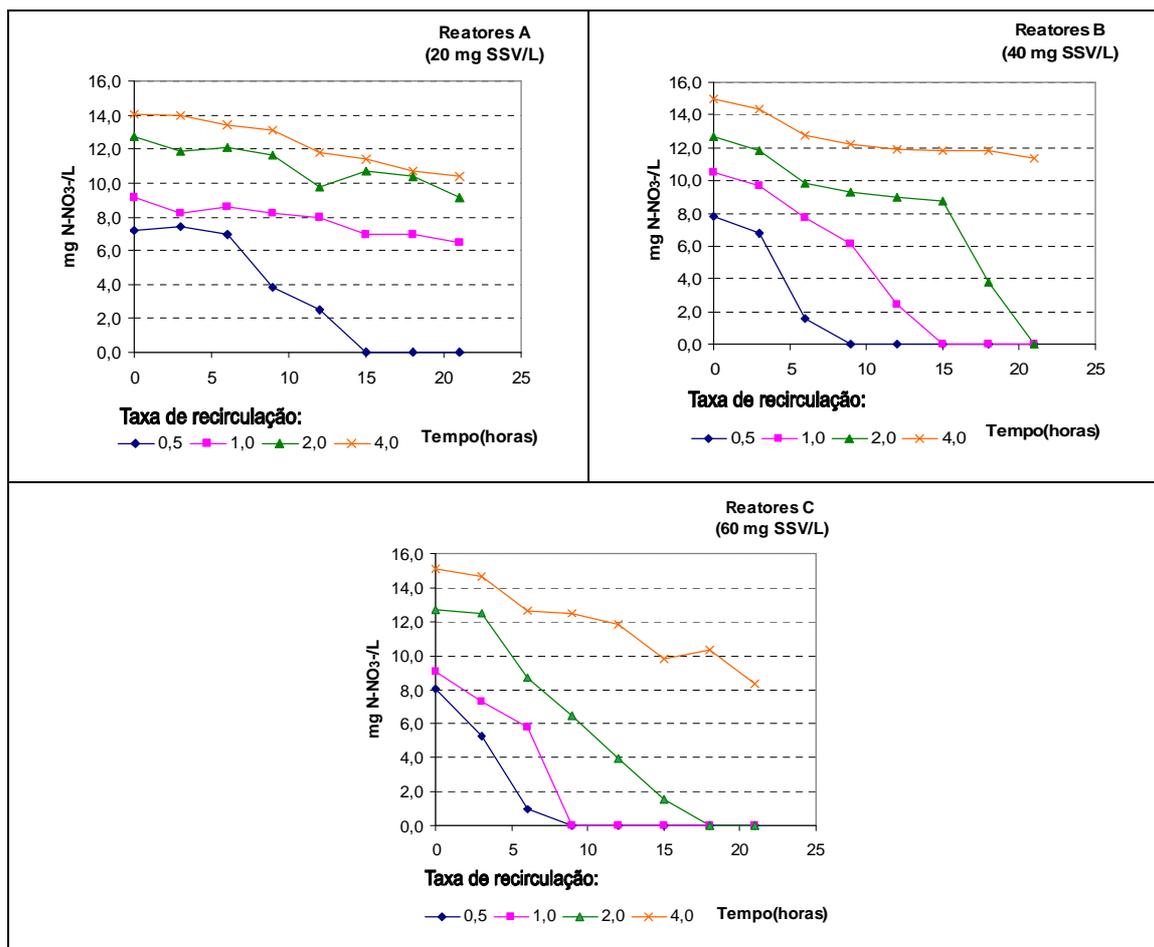


Figura 5.18 - Degradação temporal do nitrato – teste de bancada.

Como pode ser observado, quanto maior foi a quantidade de SSV no reator, mais rapidamente ocorreu à degradação de nitrato. Isso está relacionado com a quantidade de biomassa por substrato presente no reator. Esta mesma relação justifica o fato de que quanto menor a taxa de recirculação, menor é o tempo da degradação total no nitrato.

Analisando a melhor taxa de recirculação a ser adotada no experimento piloto, onde o reator anaeróbico possui TDH de 8 horas, verifica-se que:

Com a taxa de 0,5, aproximadamente 93% do nitrato presente (7,3 mg N-NO⁻³/L) foi convertido para nitrogênio gasoso considerando o tempo de 8 horas e concentração de 40 mg SSV/L. Verifica-se porém, que com redução de 50% de SSV (20 mg SSV/L), apenas 33% do nitrato foi convertido (2,4 mg N-NO⁻³/L).

Para a taxa de 1,0 e concentração de 40 mg SSV/L 37%, do nitrato é convertido (3,8 mg N-NO⁻³/L) com a concentração de SSV de 60 mg SSV/L o percentual eleva-se para 79%, ou seja, 7,2 mg N-NO⁻³/L.

Recirculando 200% e considerando a concentração de 40 mg SSV/L, 25% do nitrato é convertido. Já com a concentração de 60 mg SSV/L foi atingido 43% de conversão. Acredita-se que a desnitrificação com taxa de recirculação igual a 4 foi limitada pela baixa relação C/N.

Na Tabela 5.18 está um resumo da quantidade de nitrato convertido considerando um reator anaeróbio com TDH de 8 horas.

Tabela 5.18 - Quantidade de nitrato degradada considerando TDH de 8 horas

Taxa de recirculação	mg/L de SSV	% de N-NO⁻³ Degradada	mg N-NO⁻³/L Degradada
0,5	20	33%	2,4
	40	93%	7,3
	60	96%	7,7
1	20	8%	0,8
	40	37%	3,8
	60	79%	7,2
2	20	8%	1,0
	40	25%	3,2
	60	43%	5,5
4	20	6%	0,9
	40	17%	2,6
	60	17%	2,6

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Realizando uma avaliação integrada dos parâmetros, verifica-se a influência da nitrificação no pH e alcalinidade do sistema, principalmente na partida dos reatores. Como a nitrificação foi estabelecida primeiro no reator AE1.1 que possui TDH de 8 horas, esse reator operou com pH levemente ácido durante um intervalo de tempo mais longo, isso fez com que AE1.1 apresentasse diferença significativa em relação ao demais. A redução do pH não provocou inibição no sistema, que por sua vez possuía alcalinidade suficiente para auxiliar o processo de nitrificação.

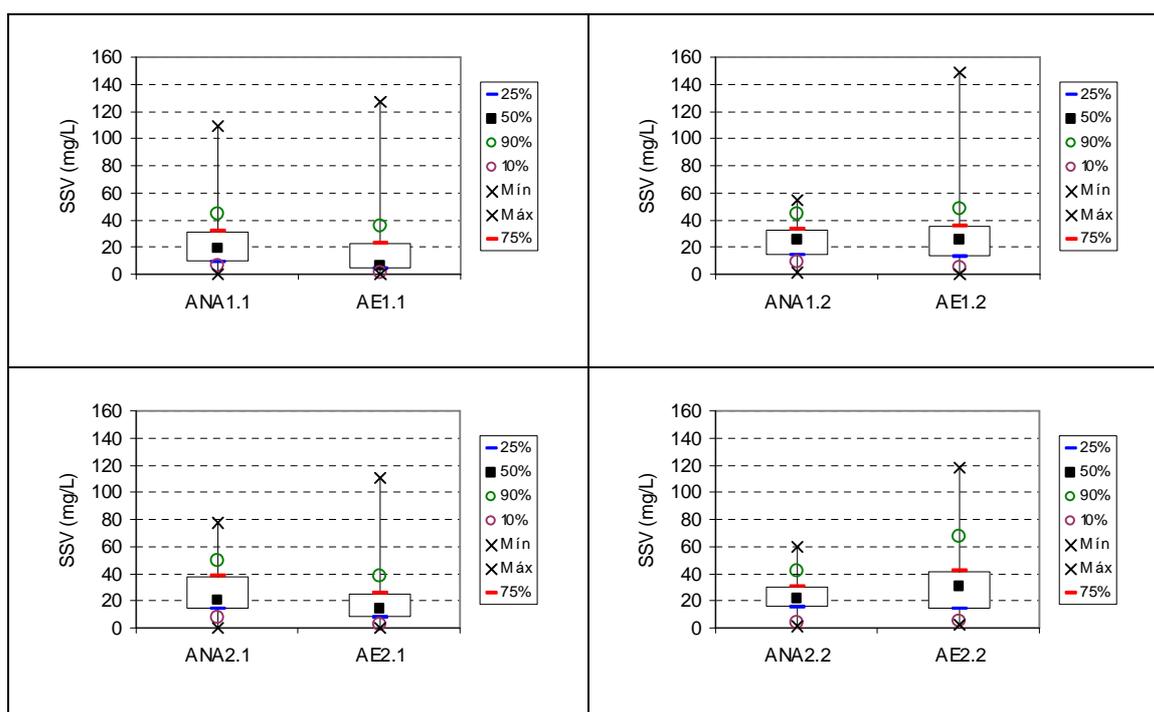
Apesar dos reatores aeróbios com TDH de 4 e 8 horas apresentarem diferença significativa em relação ao consumo de alcalinidade, visto que a conversão de amônio a nitrato foi estabelecida primeiro no reator com TDH de 8 horas, verifica-se que o efluente anaeróbio apresentava alcalinidade suficiente para nitrificação da amônia presente no efluente.

A alcalinidade presente no efluente anaeróbio na fase 1 foi de aproximadamente 221mg CaCO₃/L, em ambos os reatores, suficiente para nitrificar 31 mg N-NH₄/L, ou seja, aproximadamente 94% da amônia. Na fase 2, com a recirculação, os reatores anaeróbios apresentaram diferenças significativas em relação a alcalinidade. O reator anaeróbio ANA1.2 apresentou em média 198 mg CaCO₃/L, ou seja, alcalinidade suficiente para nitrificar cerca de 28 mg N-NH₄/L e pouco superior a média da amônia presente no efluente, que foi de 26mg N-NH₄. Situação semelhante ocorreu em ANA2.2, que apresentou concentração média de 189 mg CaCO₃/L, suficiente para nitrificar cerca de 26,5 mg N-NH₄/L, praticamente a totalidade de amônia presente no efluente que em média foi de 26 mg N-NH₄/L. É importante ressaltar que os dados acima estão baseados em valores médios e que, na fase 1, houve uma redução brusca no pH e na alcalinidade e ainda assim o sistema conseguiu recuperar-se sem a necessidade da adição de tampão.

Com relação ao oxigênio dissolvido, foi verificado que as recuperações após “paradas do sistema”, ocasionadas por motivos externos, ocorreram em menores intervalos de tempo com o decorrer do experimento, conseqüência da formação e adaptação da biomassa.

O aumento da velocidade ascensional nos reatores ocorrido com a mudança de fase provocou diferenças significativas em relação ao SSV e por conseqüência na DQO bruta dos reatores aeróbios. Os reatores anaeróbios comportaram-se de maneira semelhante.

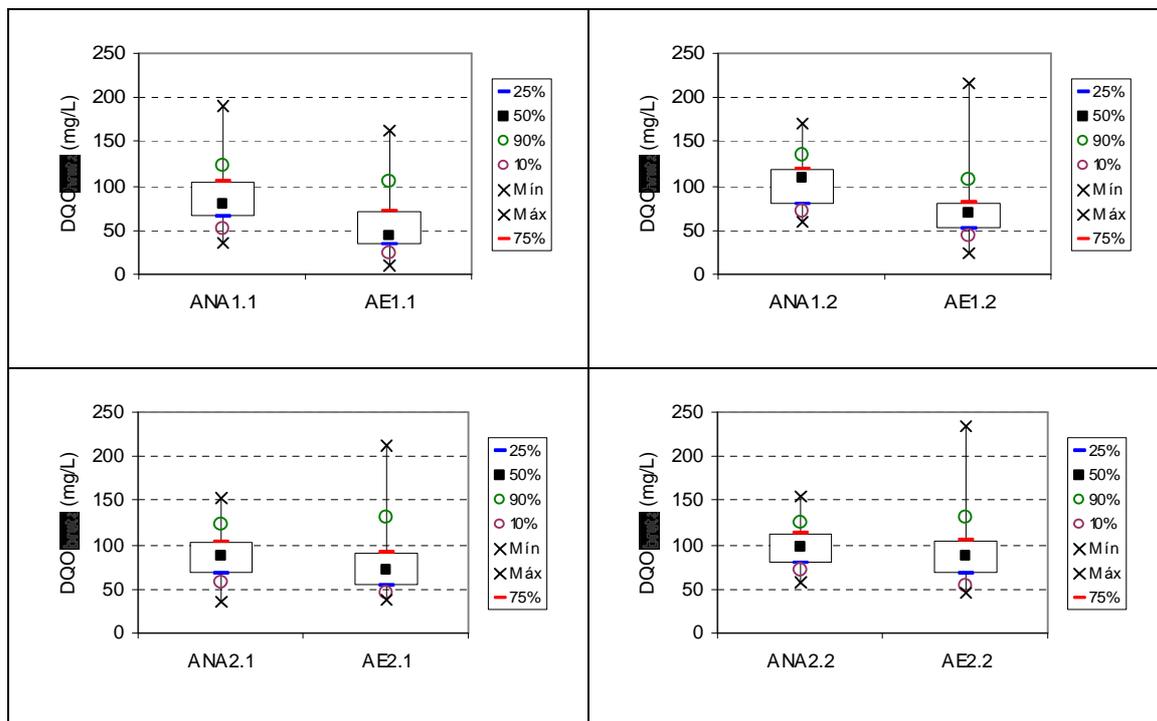
Observa-se na Figura 6.1 que na fase 1, os reatores aeróbios contribuíram para remoção do SSV, fato este que não ocorreu na fase 2, onde os valores médios dos reatores aeróbios foram superiores aos presentes nos reatores anaeróbios. Os reatores anaeróbios tiveram remoções médias de 85% em ambas as fases. Na fase 1, com o incremento da remoção dos reatores aeróbios, a eficiência global do sistema aumentou para aproximadamente 90% enquanto que, na fase 2, houve uma redução da eficiência global para aproximadamente 82%, ou seja, o sistema de decantação dos reatores aeróbios na fase 2 deve ser otimizado.



Legenda: ANA1.1 – Reator anaeróbio 1 fase 1 (TDH = 8 horas); AE1.1 – Reator aeróbio 1 fase 1 (TDH = 8 horas); ANA2.1 – Reator anaeróbio 2 fase 1 (TDH = 8 horas); AE2.1 – Reator aeróbio 2 fase 1 (TDH = 4 horas); ANA1.2 – Reator anaeróbio 1 fase 2 (TDH = 8 horas); AE1.2 – Reator aeróbio 1 fase 2 (TDH = 8 horas); ANA2.2 – Reator anaeróbio 2 fase 2 (TDH = 8 horas); AE2.2 – Reator aeróbio 2 fase 2 (TDH = 4 horas).

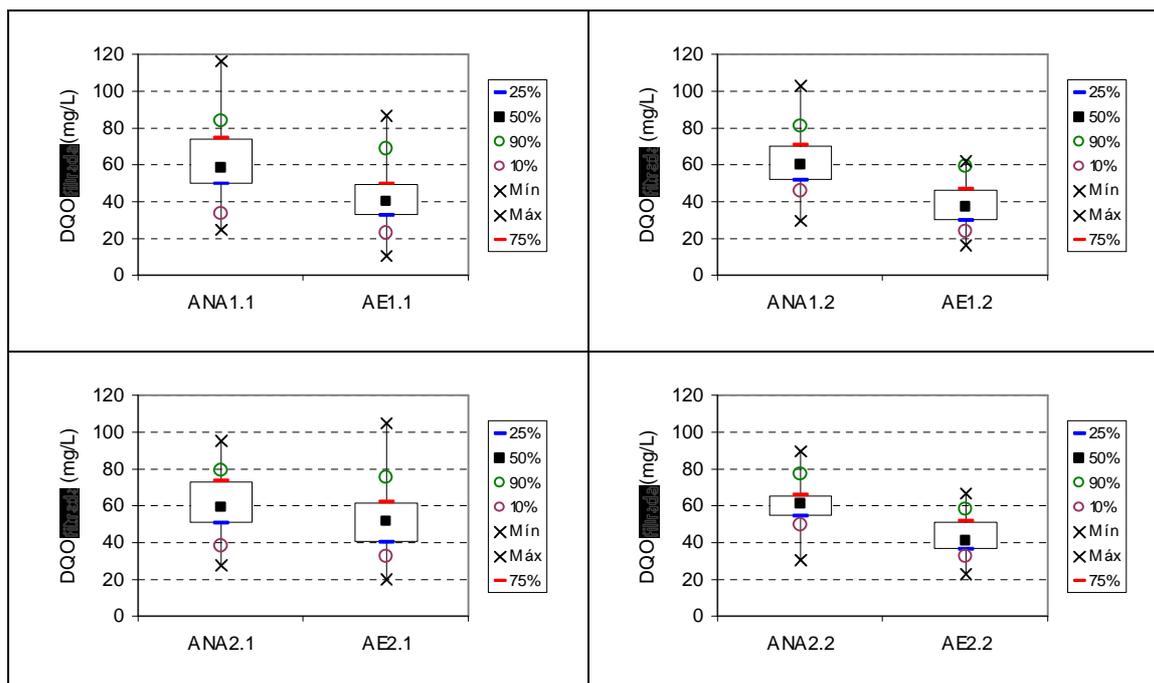
Figura 6.1 - Resumo da concentração de SSV

Observando o comportamento da DQO bruta (Figura 6.2) e filtrada (Figura 6.3), verifica-se a interferência do SSV na mudança de fase. Os reatores anaeróbios apresentaram semelhanças na DQO bruta e diferença na DQO filtrada. O reator aeróbio com maior TDH (AE1) apresentou semelhança tanto na DQO bruta quanto na filtrada, enquanto o reator aeróbio com menor TDH (AE2) apresentou diferença significativa para estes dois parâmetros, este reator possuía velocidade ascensional mais elevada nas duas fases.



Legenda: ANA1.1 – Reator anaeróbio 1 fase 1 (TDH = 8 horas); AE1.1 – Reator aeróbio 1 fase 1 (TDH = 8 horas); ANA2.1 – Reator anaeróbio 2 fase 1 (TDH = 8 horas); AE2.1 – Reator aeróbio 2 fase 1 (TDH = 4 horas); ANA1.2 – Reator anaeróbio 1 fase 2 (TDH = 8 horas); AE1.2 – Reator aeróbio 1 fase 2 (TDH = 8 horas); ANA2.2 – Reator anaeróbio 2 fase 2 (TDH = 8 horas); AE2.2 – Reator aeróbio 2 fase 2 (TDH = 4 horas).

Figura 6.2 – Resumo da concentração de DQO bruta.



Legenda: ANA1.1 – Reator anaeróbio 1 fase 1 (TDH = 8 horas); AE1.1 – Reator aeróbio 1 fase 1 (TDH = 8 horas); ANA2.1 – Reator anaeróbio 2 fase 1 (TDH = 8 horas); AE2.1 – Reator aeróbio 2 fase 1 (TDH = 4 horas); ANA1.2 – Reator anaeróbio 1 fase 2 (TDH = 8 horas); AE1.2 – Reator aeróbio 1 fase 2 (TDH = 8 horas); ANA2.2 – Reator anaeróbio 2 fase 2 (TDH = 8 horas); AE2.2 – Reator aeróbio 2 fase 2 (TDH = 4 horas).

Figura 6.3 – Resumo da concentração de DQO filtrada.

Nos reatores anaeróbios, a remoção de DQO bruta foi de 83% (fase 1) e 78% (fase 2) em ANA1 e de 82% (fase 1) e 79% (fase 2) em ANA2. Com relação à DQO filtrada, ANA1 apresentou eficiência de 43% (fase 1) e 36% (fase 2), já ANA2 obteve remoções de 43% (fase 1) e 36% (fase 2) (Tabela 6.1).

Nos reatores aeróbios a remoção média de DQO bruta foi de 89% (fase 1) e 83% (fase 2) para AE1 e de 84% (fase 1) e 78% (fase 2) para AE2. A DQO filtrada apresentou remoção de 57% (fase 1) e 58% (fase 2) em AE1, e de 45% (fase 1) e 52% (fase 2) em AE2 (Tabela 6.1).

Tabela 6.1 - Eficiência de remoção de matéria orgânica

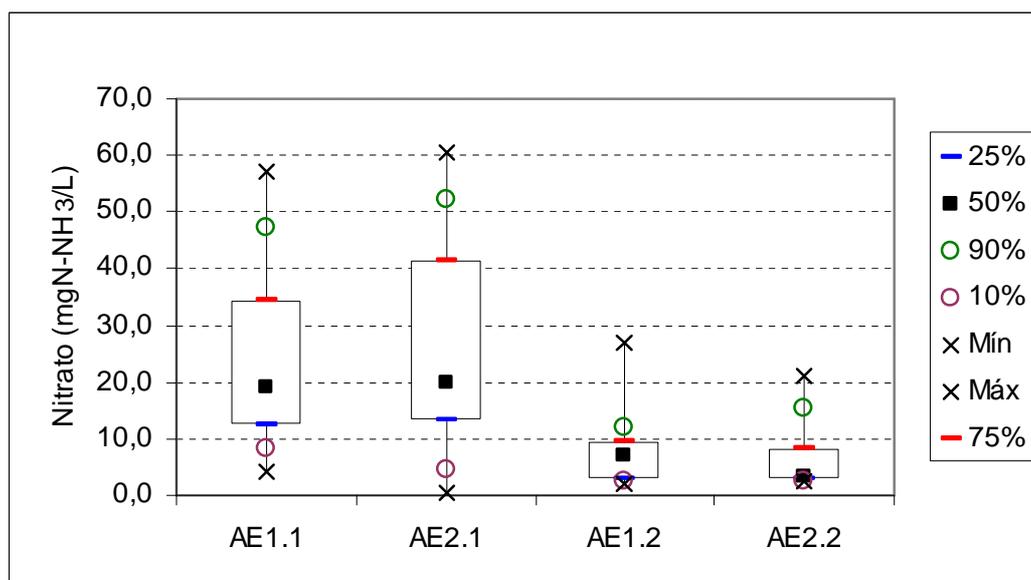
Eficiência média de remoção		ANA1	AE1 (global)	ANA2	AE2 (global)
DQO bruta	Fase 1	83%	89%	82%	84%
	Fase 2	78%	84%	79%	79%
DQO filtrada	Fase 1	43%	57%	43%	46%
	Fase 2	36%	58%	36%	52%

Legenda: ANA1 – Reator anaeróbio 1 (TDH = 8 horas); AE1 – Reator aeróbio 1 (TDH = 8 horas); ANA2 – Reator anaeróbio 2 (TDH = 8 horas); AE2 – Reator aeróbio 2 (TDH = 4 horas).

Ainda relacionado à remoção de matéria orgânica carbonácea, é importante frisar que o reator aeróbio com TDH de 4 horas (AE2) não apresentou diferença significativa quando comparado ao reator anaeróbio, com exceção da DQO filtrada na fase 2.

Ressalta-se também que parte da remoção de matérias orgânica na fase 2 nos reatores anaeróbios não foi proveniente das metanogênicas e sim da utilização das matéria orgânicas como fonte de carbono para o processo de desnitrificação. Estima-se que, aproximadamente, 4,7% do carbono removido em ANA1.2 seja resultante do processo de desnitrificação, esta porcentagem é de 3,6% em ANA2.2. Esses valores foram calculados considerando um consumo de 4 mg de DQO por mg de nitrogênio, valor citados na literatura. Não foi encontrado nitrato no efluente anaeróbio, ou seja, a desnitrificação ocorreu completamente e não foi necessária a adição de fonte externa de carbono.

Apesar das interferências ocorridas durante o experimento, principalmente na fase 1, onde ocorreram algumas paralisações na ETE, verifica-se a viabilidade da utilização do reator aeróbio com TDH de 4 horas, para o processo de nitrificação. Esse reator apresentou partida mais lenta quando comparado ao de TDH de 8 horas, mas com a formação da biomassa, ambos os reatores apresentaram comportamento semelhante (Figura 6.4).



Legenda: AE1.1 – Reator aeróbio 1 fase 1; AE2.1 - Reator aeróbio 2 fase 1; AE1.2 – Reator aeróbio 1 fase 2; AE2.2 – Reator aeróbio fase 2

Figura 6.4 – Resumo da concentração de nitrato nos períodos de estabilidades.

Considerando apenas os dados onde foi observada a nitrificação, removendo os valores iguais a zero, períodos de partida e recuperação de stress, foi observado que efluente aeróbio apresentou concentrações de nitrato de 24,11 mg de N-NO₃ /L (fase 1) e 7,91 mg de N-NO₃ /L (fase 2) para o reator com TDH de 8 horas e concentrações de 27,19 mg de N-NO₃ /L (fase 1) e 6,78 mg de N-NO₃ /L para o reator com TDH de 4 horas. (Tabela 6.2).

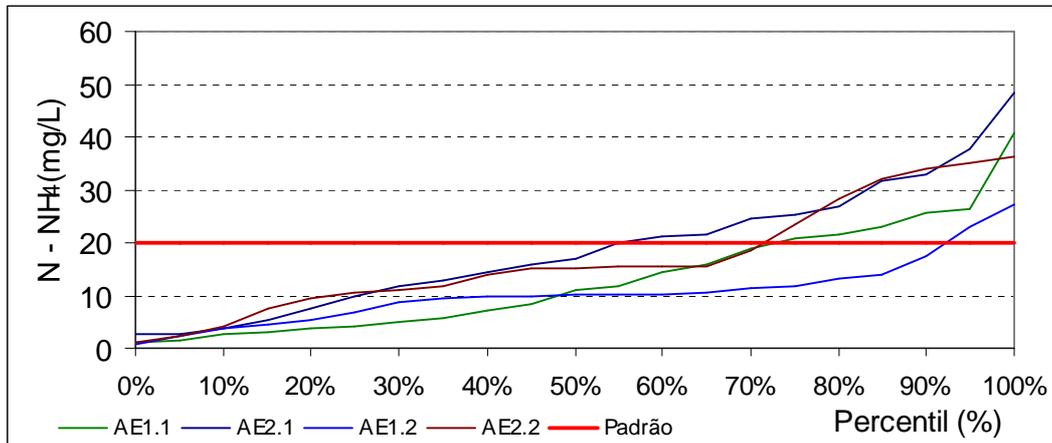
Tabela 6.2 – Resumo da concentração de nitrato nos reatores aeróbios durante períodos de estabilidade.

	AE1.1	AE2.1	AE1.2	AE2.2
Nº de dados	36,00	15,00	17,00	13,00
Média	24,11	27,19	7,91	6,78
Mín	4,32	3,14	2,10	2,30
Max	57,20	60,68	26,90	21,30
CV	0,63	0,68	0,76	0,89
DP	15,20	18,54	5,99	6,07

Legenda: ANA1 – Reator anaeróbio 1 (TDH = 8 horas); AE1 – Reator aeróbio 1 (TDH = 8 horas); ANA2 – Reator anaeróbio 2 (TDH = 8 horas); AE2 – Reator aeróbio 2 (TDH = 4 horas); CV – Coeficiente de variação; DP – Desvio Padrão.

Relacionando a amônia presente no efluente do sistema com o padrão de lançamento estabelecido pela CONAMA 397/2008, observa-se que cerca de

70% dos dados atenderam a legislação em AE1 na fase 1, este valor é ampliado para 88% na fase 2. Em AE2, o percentual de dados que atenderam a legislação foi de 53% na fase 1 e 70% na fase 2. (Figura 6.5).



Legenda: AE1.1 – Reator aeróbio 1 fase 1 (TDH = 8 horas); AE2.1 – Reator aeróbio 2 fase1 (TDH = 4 horas); AE1.2 – Reator aeróbio 1 fase 2 (TDH = 8 horas); AE2.2 – Reator aeróbio 2 fase 2 (TDH = 4 horas).

Figura 6.5 - Percentual de dados que atenderam ao padrão de lançamento de efluentes em relação a nitrogênio amoniacal.

7 CONCLUSÕES

- O principal resultado deste trabalho foi constatar que após a formação da biomassa os reatores híbridos aeróbios compostos por reator de lodos ativados e biofiltro aerado submerso com TDH de 4 e 8 horas apresentaram resultados semelhantes para o processo de nitrificação, quando mantidas as condições ideais.
- Analisando apenas a remoção de matéria orgânica, verifica-se que o efluente do reator aeróbio com TDH de 4 horas não possui diferença significativa quando comparado ao efluente do reator anaeróbio. Para que seja verificada alguma diferença seriam necessárias melhorias no sistema de retenção de sólidos, visto que os SSV presentes no efluente aumentam a DQO.
- Apesar dos reatores aeróbios apresentarem alguns pontos com redução de pH e alcalinidade, não foi necessária a adição de soluções tampão para reequilibrar o sistema durante a nitrificação.
- Na fase 2 foi constatado que não há necessidade da adição de fonte externa de carbono para que ocorra o processo de desnitrificação.
- Pelo balanço de massa verifica-se uma diminuição na porcentagem de nitrogênio nitrificado com a mudança de fase. Também foi observado no perfil que com o aumento da velocidade ascensional (mudança de fase), a porcentagem da nitrificação que ocorria no biofiltro foi reduzida de 37% para 27% em AE1 e de 47% para 10% em AE2. Constata-se que o processo de nitrificação sofreu alterações com o aumento da velocidade ascensional, porém, não é possível mensurar uma relação entre nitrificação e velocidade ascensional.
- O sistema reatores híbridos anaeróbios (UASB + filtro anaeróbio ascendente) e aeróbios (Lodos ativados + biofiltro aerado submerso) mostrou-se eficiente para remoção de ovos de helmintos e ineficiente para remoção de coliformes fecais.
- Com o experimento de bancada, constata-se que a melhor taxa de recirculação a ser aplicada no reator em escala piloto é de 50% e que

caso seja adotada a taxa de 400% será necessária a adição de fonte externa de carbono.

8 SUGESTÕES

- Avaliar a influência da velocidade ascensional no processo de nitrificação;
- Avaliar outros tempos de retenção hidráulica;
- Avaliar outras taxas de recirculação;
- Aprimorar o sistema de retenção de sólido, esta melhoria pode estar vinculada a sistemas que visem a remoção de coliformes fecais.

9 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ANDRADE NETO, C O de; VAN HAANDEL, A; MELO, H N S. (2002). *O Uso do Filtro Anaeróbio para Pós-Tratamento de Efluentes de Reatores Anaeróbios no Brasil*. In: X Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2002, Braga, Portugal. Anais do X Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Braga: APESB/APRH/ABES, 2002. CD-ROM.

AWWA/APHA/WEF. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 20th ed. Washington: 1998.

BRASIL, Ministério da Saúde, Portaria 518/2005.;" Estabelece os procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, e dá outras providências. Data da legislação de 25/03/2005.

CHAGAS, A P, A síntese da amônia: alguns aspectos históricos. *Química Nova*, São Paulo, volume 30, n. 1, 2007. 8p- Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422007000100039&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 31 Mar 2007. doi: 10.1590/S0100-40422007000100039

Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental/Secretaria do Meio Ambiente do governo de São Paulo, *Variáveis de qualidade das águas*, Disponível em <<http://www.cetesb.sp.gov.br/Agua/rios/variaveis.asp>>> Acessado em 28/11/2008.

Companhia Pernambucana de Saneamento, disponível em: <<http://www.compesa.com.br/index.php?option=content&task=view&id=320&Itemid=31>>. Acesso em 01 de junho de 2007.

COSTA A J M P, RIVERA I N G; MORITA D M, ALEM SOBRINHO, P; LIMA C A P; BÔAS D M V. *Acompanhamento microbiológico de sistemas de lodos ativados de único estágio utilizados no tratamento de água residuária sintética simulando despejos líquidos de coqueria*; In 20^o Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Rio de Janeiro - RJ maio de 1999.

CPRH – *Manual técnico de dimensionamento de tanques sépticos e unidades básicas complementares*. Recife: CPRH, 2004.

DILALLO, R.; ALBERTSON, O. E. (1961) *Volatile acids by direct titration*, *Journal Water Pollution Control Federation*, 31(10): 2495-2499p.

EMSLEY, J.; *The Elements*, 3rd. ed., Clarendon Press: Oxford, 1998.

FERREIRA, E. S. *Cinética Química e Fundamentos dos Processos de Nitrificação e Denitrificação Biológica*. In: XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental ABES, 2000, Porto Alegre – RS Anais. ABES, 2000, 25p.

FLORÊNCIO, L. *The Fate of Methanol in Anaerobic Bioreactors*. Ph.D. Dissertation. Wageningen Agricultural University. Wageningen, The Netherlands, 1994 .

FRANCHIN, Aline Constanzo. *Nitrificação de efluente de reatores anaeróbio compartimentado em filtro percolado com a utilização da serragem de couro do tipo wet blue como meio suporte*. São Carlos – Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2003, 67p.

GRUNDITZ, C. e DALHAMMAR, G. *Development of Nitrification Inhibition Assays Using Pure Cultures of Nitrosomonas and Nitrobacter*. *Wat. Res.* Vol. 35, Nº. 2, 2001, 433 - 440p.

HAIYAN GUO, ZHOU Jiti, JIANG SU, ZHANG Zhiyong *Integration of nitrification and denitrification in airlift bioreactor*, *Biochemical Engineering Journal* vol 23, 2005, 57–62p.

HENZE M., HARREMOES P., ARVIN E. e LACOUR J J. (1997) *Wastewater treatment*. Springer Verlag, Berlin, pp. 385.

Henze, M., Gujer, W., Mino, T., Matsuo, T., Wentzel, M. C., Marais, G. v. R., & van Loosdrechi, M. (1998). Activated sludge model no. 2d, ASM2D. *Water Science Technology*, 39(1), 165}182.

HYUNGSEOK Yoo, KYU-HONG Ahn, HYUNG-JIB Lee KWANG-HWAN Lee, YOUN-JUNG Kwak e KYUNG-GUEN Song, *Nitrogen Removal From Synthetic Wastewater By Simultaneous Nitrification And Denitrification (Snd) Via Nitrite In An Intermittently-Aerated Reactor*, *Wat. Res.* Vol. 33, Nº. 1, 1999, 145-154p.

ISOLDI, L. A; KOETZ, P. R. *Remoción de nitrógeno de águas residuais de la industrialización de arroz en reatores performantes*. In: TALLER Y SEMINARIO LATINOAMERICANO DE TRATAMIENTO ANAERÓBICO DE AGUAS RESIDUALES, 5., 1998, Viña del Mar. Anales. Viña del Mar: UCVP/IAWQ/UTFSM, 1998. p. 234.

ISOLDI, Loraine Andre; KOETZ, Paulo Roberto e ISOLDI, Liércio André, *Pós-tratamento de Efluente Nitrificado da Parboilização de arroz utilizando desnitrificação em*

JETTEN, M. S. M.; VAN DONGEN, L. G. J. M.; VAN LOOSDRECHT, M. C. M.. *The Combined Sharon/Anammox Process*. Stowa: Foundation for Applied Water Research. IWA Publishing. London. 2001.

JETTEN, M.S.M.; STROUS, M.; VAN DE PAS-SCHOONEN, K.T.; SCHALK, J.; VAN DONGEN, U.G.J.M.; VAN DE GRAAF, A. A.; LOGEMANN, S.; MUYZER, G.; VAN LOOSDRECHT, M.C.M.; KUENEN, J.G.. *The anaerobic oxidation of ammonium*. *FEMS Microbiology Reviews* 22, pp. 421-437. 1999.

KHIN, T., ANNACHHATRE A. P. *Novel microbial nitrogen removal processes*, *Biotechnology Advances* Vol 22, 2004, 519–532p.

KUMMER, Ana Carolina Barbosa. *Desnitrificação de efluentes de abatedouro de tilápia utilizado manipueira como fonte de carbono*, Cascavál Paraná – Dissertação (Mestrado) – Programa de pós graduação em Engenharia Agrícola Universidade estadual do Oeste do Paraná, 2008, 56p.

METCALF; EDDY. *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*. 4 ed New York: McGraw Hill, 2003. 1919p.

MOTTA, S L Tratamento de esgoto doméstico em bio-reatores aeróbio de leito fixo submerso, Rio de Janeiro – Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro COPPE, 1995. 117p.

MULDER, A.; VAN DE GRAAF, A. A.; ROBERTSON, L. A.; KUENEN, J. G.. *Anaerobic ammonium oxidation discovered in a denitrifying fluidized bed reactor*. FEMS Microbiology Ecology Vol 16, 1995. 177-184 pp.

NAKHLA, George e FAROOQ, Shaukat. *Simultaneous nitrification–denitrification in slow sand filters*. Journal of Hazardous Materials, 2003. 291–303p.

PEREIRA-RAMIREZ, Orlando; ANTUNES, Rul M.; QUADRO, Maurizio S.; KOETZ, Paulo R. *Comparação de desempenho do tratamento de efluente industrial por reator UASB e UASB-híbrido*, Revista . brasileira de Agrociência, vol. 9, nº. 2 abr-jun, 2003. 171-174 p.

PIMENTA, Mauricio Cavalcante. *Tratamento de esgoto doméstico em reator híbrido de fibra de vidro tipo UASB e filtro anaeróbio para comunidades de pequeno porte*, Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em engenharia civil da Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 98p, 2005.

PIMENTA, Mauricio KATO, Mario Takayuki, GAVAZZA Savia, FLORENCIO, Lourdinha *Desempenho de reatores piloto tipo UASB e híbrido para o tratamento de esgoto doméstico*, In: 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental 2005 - Campo Grande/MS. Abes anais, 2005, 7p.

Reator Uasb, Eng. sanit. ambient. Vol.10 - Nº 4 - out-dez 2005, 271-277 p

Resolução CONAMA Nº 357/2005 - "Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências." - Data da legislação: 17/03/2005 - Publicação DOU: 18/03/2005

Resolução CONAMA Nº 397/2008 - "Altera o inciso II do § 4o e a Tabela X do § 5o, ambos do art. 34 da Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA no 357, de 2005, que dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes." - Data da legislação: 03/04/2008 - Publicação DOU: 07/04/2008; pág 68-69.

RIPLEY, L. E.; BOYLE, W. C.; CONVERSE, J. C. (1986) *Improved alkalimetric monitoring for anaerobic digestion of high-strength waster*, Journal Water Pollution Control Federation, Vol. 58, 1986, 405-411p.

SCHMIDT, I; SLIEKERS, O; SCHMID, M; BOCK, E; FUERST, J; KUENEN, J G, JETTEN M S M; STROUS, M. *New concepts of microbial treatment processes for the nitrogen removal in wastewater*. FEMS Microbiology Reviews Vol. 27. 2003. 481-492p.

SURAPALLI, R. Y., TYAGI, R.G. KARL SHEIBLE, O. e HEIDMAN J.A., *Nitrification, denitrification and phosphorus removal*, Bioresourcer Technology, 1997, 151-157p.

VAN HAANDEL, Adrianos e MARAIS, Gerrit, *O comportamento do sistema de lodos ativados, teoria e Aplicação para projetos e operação* 1ª ed, Campina Grande, Universidade Federal da Paraíba, 1999.

VERSTRAETE, W. PHILIPS, S. *Nitrification-denitrification processes and technologies in new contexts*, Environmental Pollution, 1998, 717-726p.

WOLFF, D. B. ; OCHOA, Juan Carlos ; PAUL, Etienne ; COSTA, Rejane Helena Ribeiro da . *Remoção da Poluição Orgânica e Nitrogenada de Esgoto Urbano em Reator Híbrido com Baixa Temperatura*. In: XXIX Congreso Interamericano de Ingenieria Sanitaria y Ambiental (AIDIS), 2004, Porto Rico. CD ROM, 2004. 7p.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. *The internacional drinking water supply and sanitation decade*, Review of mid-decade progress. Geneva, 1989. 25p.

ZERBINI, A M; e CHERNICHARO, C A L. Metodologias para quantificação, identificação e análise de viabilidade de ovos de helmintos em esgotos brutos e tratados. Em CHERNICHARO, C A L; ADORNO M. A. T.; AISSE M. M.; ANDRADE NETO C. O.; BITTENCOURT R. B.; CAVALCANTI P. F. F.; CHERNICHARO C. A. L.; FORESTI E.; GADÊLHA R. F.; LEITE B. Z.; MELO H. N. S.; MELO J. L. S.; MORAES E. M.; TOLEDO E.; VAN HAANDEL A.; VON SPERLING M.; ZAIAT M.; ZERBINI A. M. *Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios : aspectos metodológicos* . - Belo Horizonte: [s.n.], 2001. 70-107p.

10 APÊNDICE

10.1 Dados estatísticos

Tabela 10.1 - Dados estatístico diferença entre os tratamentos (Parte 1).

Temperatura				
FV	GL	SQ	QM	F ₀
T	7	44,50	6,36	1,87
R	412	1400,00	3,40	
Total	419	1444,50		
$F_{(0,5,7,\infty)} = 2,01$ e $F_{(0,1,7,\infty)} = 2,64$				

pH					T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	
FV	GL	SQ	QM	F ₀								
T	7	2,94	0,42	4,20	T2	ns						
R	419	41,89	0,10		T3	ns	*					
Total	426	44,83			T4	ns	*	ns				
$F_{(0,05,7,\infty)} = 2,01$ e $F_{(0,01,7,\infty)} = 2,64$ $q_{(0,05,8,\infty)} = 4,29$ e $q_{(0,01,8,\infty)} = 4,99$					T5	ns	ns	ns	Ns			
					T6	ns	ns	ns	Ns	ns		
					T7	ns	**	ns	Ns	ns	ns	
					T8	ns	**	ns	Ns	*	ns	ns

Alcalinidade parcial					T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	
FV	GL	SQ	QM	F ₀								
T	7	576582	82369	26,865	T2	**						
R	426,00	1306142	3066		T3	ns	**					
Total	433,00	1882724			T4	**	**	**				
$F_{(0,05,7,\infty)} = 2,01$ e $F_{(0,01,7,\infty)} = 2,64$ $q_{(0,05,8,\infty)} = 4,29$ e $q_{(0,01,8,\infty)} = 4,99$					T5	ns	**	ns	ns			
					T6	**	ns	**	ns	**		
					T7	ns	**	*	ns	ns	**	
					T8	**	**	**	ns	ns	ns	ns

Alcalinidade total					T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	
FV	GL	SQ	QM	F ₀								
T	7	1032631	147519	30,865	T2	**						
R	426	2036066	4779		T3	ns	**					
Total	433	3068697			T4	**	**	**				
$F_{(0,05,7,\infty)} = 2,01$ e $F_{(0,01,7,\infty)} = 2,64$ $q_{(0,05,8,\infty)} = 4,29$ e $q_{(0,01,8,\infty)} = 4,99$					T5	ns	**	ns	*			
					T6	**	*	**	ns	**		
					T7	ns	**	ns	ns	ns	**	
					T8	**	**	**	ns	*	ns	**

Sulfato					T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	
FV	GL	SQ	QM	F ₀								
T	7	67385	9626	37,698	T2	**						
R	359	91674	255		T3	ns	**					
Total	366	159058			T4	**	ns	**				
$F_{(0,05,7,\infty)} = 2,01$ e $F_{(0,01,7,\infty)} = 2,64$ $q_{(0,05,8,\infty)} = 4,29$ e $q_{(0,01,8,\infty)} = 4,99$					T5	**	**	**	**			
					T6	**	ns	**	ns	**		
					T7	ns	**	ns	**	ns	**	
					T8	**	ns	**	ns	**	ns	**

Tabela 10.2 - Diferença significativa entre os tratamentos (Parte 2).

Fósforo				
FV	GL	SQ	QM	F ₀
T	7	21	3,06	2,24
R	287	392	1,37	
Total	294	413		
$F_{(0,05,7,\infty)} = 2,01$ e $F_{(0,01,7,\infty)} = 2,64$ $q_{(0,05,8,\infty)} = 4,29$ e $q_{(0,01,8,\infty)} = 4,99$				
OBS: Apesar do F ₀ calculado ter sido maior que o tabelado para 5% ao se aplicar o teste de Tukey não foi observada diferença significativa.				

ST				
FV	GL	SQ	QM	F ₀
T	7	990305	141472	2,61
R	400	21706638	54267	
Total	407	22696943		
$F_{(0,05,7,\infty)} = 2,01$ e $F_{(0,01,7,\infty)} = 2,64$ $q_{(0,05,8,\infty)} = 4,29$ e $q_{(0,01,8,\infty)} = 4,99$				
OBS: Apesar do F ₀ calculado ter sido maior que o tabelado para 5% ao se aplicar o teste de Tukey não foi observada diferença significativa.				

STF					T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
FV	GL	SQ	QM	F ₀							
T	7	315693	45099	5,01	T2	ns					
R	401	3613282	9011		T3	ns	ns				
Total	408	3928975			T4	ns	ns	ns			
$F_{(0,5,7,\infty)} = 2,01$ e $F_{(0,1,7,\infty)} = 2,64$ $q_{(0,05,8,\infty)} = 4,29$ e $q_{(0,01,8,\infty)} = 4,99$					T5	ns	*	ns	**		
					T6	ns	*	ns	**	Ns	
					T7	ns	**	ns	**	Ns	ns
					T8	ns	ns	ns	ns	Ns	ns

STV				
FV	GL	SQ	QM	F ₀
T	7	337488	48213	0,980
R	401	19719310	49175	
Total	408	20056798		
$F_{(0,5,7,\infty)} = 2,01$ e $F_{(0,1,7,\infty)} = 2,64$ $q_{(0,05,8,\infty)} = 4,29$ e $q_{(0,01,8,\infty)} = 4,99$				
-				

SST					T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
FV	GL	SQ	QM	F ₀							
T	7	36916	5274	3,671	T2	ns					
R	396	568885	1437		T3	ns	ns				
Total	403	605801			T4	ns	ns	ns			
$F_{(0,5,7,\infty)} = 2,01$ e $F_{(0,1,7,\infty)} = 2,64$ $q_{(0,05,8,\infty)} = 4,29$ e $q_{(0,01,8,\infty)} = 4,99$					T5	ns	ns	ns			
					T6	ns	*	ns	ns	ns	
					T7	ns	ns	ns	ns	ns	ns
					T8	**	**	ns	*	ns	ns

SSF				
FV	GL	SQ	QM	F ₀
T	7	12296	1757	1,894
R	396	367160	927	
Total	403	379456		
$F_{(0,5,7,\infty)} = 2,01$ e $F_{(0,1,7,\infty)} = 2,64$ $q_{(0,05,8,\infty)} = 4,29$ e $q_{(0,01,8,\infty)} = 4,99$				
-				

Tabela 10.3 - Dados estatísticos (Parte 3).

SSV																												
FV	GL	SQ	QM	F ₀		T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7																
T	7	9917	1417	3,504	T2	ns																						
R	396	160094	404		T3	ns	ns																					
Total	403	170011			T4	ns	ns	Ns																				
$F_{(0,05,7,\infty)} = 2,01$ e $F_{(0,01,7,\infty)} = 2,64$ $q_{(0,05,8,\infty)} = 4,29$ e $q_{(0,01,8,\infty)} = 4,99$					T5	ns	ns	Ns	ns																			
					T6	ns	*	Ns	ns	ns																		
					T7	ns	ns	Ns	ns	ns	ns																	
					T8	**	**	Ns	**	ns	ns	ns																
													ns															
DQO bruta																												
FV	GL	SQ	QM	F ₀		T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7																
T	7	86844	12406	10,265	T2	**																						
R	414	500376	1209		T3	ns	**																					
Total	421	587221			T4	ns	*	ns																				
$F_{(0,05,7,\infty)} = 2,01$ e $F_{(0,01,7,\infty)} = 2,64$ $q_{(0,05,8,\infty)} = 4,29$ e $q_{(0,01,8,\infty)} = 4,99$					T5	ns	**	ns	**																			
					T6	ns	ns	ns	ns	*																		
					T7	ns	**	ns	ns	ns	ns	ns																
					T8	ns	**	ns	*	ns	*	ns																
													ns															
DQO filtrada																												
FV	GL	SQ	QM	F ₀		T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7																
T	7	24597	3514	11,483	T2	**																						
R	419	128214	306		T3	ns	**																					
Total	426	152812			T4	ns	*	ns																				
$F_{(0,5,7,\infty)} = 2,01$ e $F_{(0,1,7,\infty)} = 2,64$ $q_{(0,05,8,\infty)} = 4,29$ e $q_{(0,01,8,\infty)} = 4,99$					T5	ns	**	ns	ns																			
					T6	**	ns	**	*	**																		
					T7	ns	**	ns	ns	ns	**	**																
					T8	ns	ns	ns	ns	**	ns	**																
													**															
Nitrito																												
FV	GL	SQ	QM	F ₀	<i>Incluindo dos valores iguais a 0</i> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>AE1.1</th> <th>AE2.1</th> <th>AE1.2</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>AE2.1</td> <td>**</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>AE1.2</td> <td>**</td> <td>ns</td> <td></td> </tr> <tr> <td>AE2.2</td> <td>**</td> <td>ns</td> <td>ns</td> </tr> </tbody> </table>									AE1.1	AE2.1	AE1.2	AE2.1	**			AE1.2	**	ns		AE2.2	**	ns	ns
	AE1.1	AE2.1	AE1.2																									
AE2.1	**																											
AE1.2	**	ns																										
AE2.2	**	ns	ns																									
T	3	6664	2221	14,462																								
R	186	28568	154																									
Total	189	35232																										
$F_{(0,5,7,\infty)} = 2,01$ e $F_{(0,1,7,\infty)} = 2,64$ $q_{(0,05,8,\infty)} = 4,29$ e $q_{(0,01,8,\infty)} = 4,99$																												
Nitrito																												
FV	GL	SQ	QM	F ₀	<i>Excluindo os valores iguais a 0</i> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>AE1.1</th> <th>AE2.1</th> <th>AE1.2</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>AE2.1</td> <td>ns</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>AE1.2</td> <td>**</td> <td>*</td> <td></td> </tr> <tr> <td>AE2.2</td> <td>**</td> <td>*</td> <td>ns</td> </tr> </tbody> </table>									AE1.1	AE2.1	AE1.2	AE2.1	ns			AE1.2	**	*		AE2.2	**	*	ns
	AE1.1	AE2.1	AE1.2																									
AE2.1	ns																											
AE1.2	**	*																										
AE2.2	**	*	ns																									
T	3	6157	2052	10,876																								
R	109	20568	189																									
Total	112	26725																										
$F_{(0,5,7,\infty)} = 2,01$ e $F_{(0,1,7,\infty)} = 2,64$ $q_{(0,05,8,\infty)} = 4,29$ e $q_{(0,01,8,\infty)} = 4,99$																												

Tabela 10.4 - Dados estatísticos (Parte 4).

Nitrito																								
FV	GL	SQ	QM	F ₀																				
T	3	152	51	3,689																				
R	194	2673	14																					
Total	197	2825																						
$F_{(0,5,7,\infty)} = 2,01$ e $F_{(0,1,7,\infty)} = 2,64$ $q_{(0,05,8,\infty)} = 4,29$ e $q_{(0,01,8,\infty)} = 4,99$																								
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="4">Incluindo dos valores iguais a 0</th> </tr> <tr> <th></th> <th>AE1.1</th> <th>AE2.1</th> <th>AE1.2</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>AE2.1</td> <td>ns</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>AE1.2</td> <td>ns</td> <td>ns</td> <td></td> </tr> <tr> <td>AE2.2</td> <td>ns</td> <td>ns</td> <td>ns</td> </tr> </tbody> </table>					Incluindo dos valores iguais a 0					AE1.1	AE2.1	AE1.2	AE2.1	ns			AE1.2	ns	ns		AE2.2	ns	ns	ns
Incluindo dos valores iguais a 0																								
	AE1.1	AE2.1	AE1.2																					
AE2.1	ns																							
AE1.2	ns	ns																						
AE2.2	ns	ns	ns																					
Nitrito																								
FV	GL	SQ	QM	F ₀																				
T	3	206	69	3,957																				
R	141	2441	17																					
Total	144	2647																						
$F_{(0,5,7,\infty)} = 2,01$ e $F_{(0,1,7,\infty)} = 2,64$ $q_{(0,05,8,\infty)} = 4,29$ e $q_{(0,01,8,\infty)} = 4,99$																								
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="4">Excluindo os valores iguais a 0</th> </tr> <tr> <th></th> <th>AE1.1</th> <th>AE2.1</th> <th>AE1.2</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>AE2.1</td> <td>ns</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>AE1.2</td> <td>ns</td> <td>ns</td> <td></td> </tr> <tr> <td>AE2.2</td> <td>ns</td> <td>ns</td> <td>ns</td> </tr> </tbody> </table>					Excluindo os valores iguais a 0					AE1.1	AE2.1	AE1.2	AE2.1	ns			AE1.2	ns	ns		AE2.2	ns	ns	ns
Excluindo os valores iguais a 0																								
	AE1.1	AE2.1	AE1.2																					
AE2.1	ns																							
AE1.2	ns	ns																						
AE2.2	ns	ns	ns																					
NTK																								
FV	GL	SQ	QM	F ₀	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7													
T	7	21709	3101	21,696	T2	**																		
R	423	60464	143		T3	ns	**																	
Total	430	82172			T4	ns	**	*																
$F_{(0,5,7,\infty)} = 2,01$ e $F_{(0,1,7,\infty)} = 2,64$ $q_{(0,05,8,\infty)} = 4,29$ e $q_{(0,01,8,\infty)} = 4,99$					T5	*	**	**	ns															
					T6	**	ns	**	**	**														
					T7	*	**	**	ns	ns	**													
					T8	**	ns	**	ns	ns	ns													
NH ₄					T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7													
FV	GL	SQ	QM	F ₀	T2	**																		
T	7	17543	2506	22,011	T3	ns	**																	
R	423	48161	114		T4	**	**	*																
Total	430	65703			T5	**	**	*	ns															
$F_{(0,5,7,\infty)} = 2,01$ e $F_{(0,1,7,\infty)} = 2,64$ $q_{(0,05,8,\infty)} = 4,29$ e $q_{(0,01,8,\infty)} = 4,99$					T6	**	ns	**	**	**														
					T7	*	**	*	ns	ns	**													
					T8	**	ns	**	ns	ns	ns													

Legenda: FV: fonte de variação; T: tratamento; R: resíduo; GL: grau de liberdade; SM: soma dos quadrados; QM: quadrado médio; ns: não significativo; * diferença significativa; ** diferença altamente significativa; T1: tratamento 1 (ANA1.1); T2: tratamento 2 (ANA1.1+AE1.1), T3: tratamento 3 (ANA2.1); T4: tratamento 4 (ANA2.1+AE2.1); T5: tratamento 5 (ANA1.2); T6: tratamento 6 (ANA1.2+AE1.2), T7: tratamento 7 (ANA2.2); T8: tratamento 8 (ANA2.2+AE2.2)

Tabela 10.5 – Análise a variância entre o afluente da Fase 1 e Fase 2 (Parte 1).

pH					Condutividade				
FV	GL	SQ	QM	F ₀	FV	GL	SQ	QM	F ₀
T	1	0,17	0,17	3,71	T	1	449060	449060,25	5,66
R	114	5,36	0,05		R	110	8732166	79383,33	
Total	115	5,53			Total	111	9181226,99		
$F_{(0,05,1,\infty)} = 3,84$ e $F_{(0,01,1,\infty)}=6,63$					$F_{(0,05,1,\infty)} = 3,84$ e $F_{(0,01,1,\infty)}=6,63$				
TDS					Sais				
FV	GL	SQ	QM	F ₀	FV	GL	SQ	QM	F ₀
T	1	273385	273385	12,32	T	1	0,19	0,19	9,52
R	110	2440893	22189		R	109	2,22	0,02	
Total	111	2714278			Total	110	2,41		
$F_{(0,05,1,\infty)} = 3,84$ e $F_{(0,01,1,\infty)}=6,63$					$F_{(0,05,1,\infty)} = 3,84$ e $F_{(0,01,1,\infty)}=6,63$				
Temperatura					Alcalinidade parcial				
FV	GL	SQ	QM	F ₀	FV	GL	SQ	QM	F ₀
T	1	19,49	19,49	6,02	T	1	5972	5972	5,36
R	111	359,24	3,24		R	115	128155	1114	
Total	112	378,73			Total	116	134128,01		
$F_{(0,05,1,\infty)} = 3,84$ e $F_{(0,01,1,\infty)}=6,63$					$F_{(0,05,1,\infty)} = 3,84$ e $F_{(0,01,1,\infty)}=6,63$				
Alcalinidade total					AGV				
FV	GL	SQ	QM	F ₀	FV	GL	SQ	QM	F ₀
T	1	4418	4418	2,17	T	1	1402	1402	5,57
R	115	234268	2037		R	100	25192	251	
Total	116	238686			Total	101	26594		
$F_{(0,05,1,\infty)} = 3,84$ e $F_{(0,01,1,\infty)}=6,63$					$F_{(0,05,1,\infty)} = 3,84$ e $F_{(0,01,1,\infty)}=6,63$				
DQO bruta					DQO filtrada				
FV	GL	SQ	QM	F ₀	FV	GL	SQ	QM	F ₀
T	1	21160	21160	0,23	T	1	0,62	0,62	0,001
R	112	10256270	91573		R	114	130571	1145	
Total	113	10277431			Total	115	130572		
$F_{(0,05,1,\infty)} = 3,84$ e $F_{(0,01,1,\infty)}=6,63$					$F_{(0,05,1,\infty)} = 3,84$ e $F_{(0,01,1,\infty)}=6,63$				
DBO bruta					DBO filtrada				
FV	GL	SQ	QM	F ₀	FV	GL	SQ	QM	F ₀
T	1	42200	42200	1,28	T	1	2928	2928	4,09
R	10	330741	33074		R	9	6444	716	
Total	11	372942			Total	10	9372		
$F_{(0,05,1,10)} = 4,96$ e $F_{(0,01,1,10)}=10,04$					$F_{(0,05,1,9)} = 5,12$ e $F_{(0,01,1,9)}=10,56$				
NTK					NH ₄				
FV	GL	SQ	QM	F ₀	FV	GL	SQ	QM	F ₀
T	1	2108	2108	11,32	T	1	259	259,63	2,91
R	114	21236	186		R	114	10154	89,08	
Total	115	23344			Total	115	10414		
$F_{(0,05,1,\infty)} = 3,84$ e $F_{(0,01,1,\infty)}=6,63$					$F_{(0,05,1,\infty)} = 3,84$ e $F_{(0,01,1,\infty)}=6,63$				
Sulfato					Fósforo				
FV	GL	SQ	QM	F ₀	FV	GL	SQ	QM	F ₀
T	1	1,43	1,43	0,01	T	1	8,34	8,34	2,54
R	99	12430,82	125,56		R	77	252,45	3,28	
Total	100	12432,25			Total	78	260,79		
$F_{(0,05,1,\infty)} = 3,84$ e $F_{(0,01,1,\infty)}=6,63$					$F_{(0,05,1,\infty)} = 3,84$ e $F_{(0,01,1,\infty)}=6,63$				

Tabela 10.6 - Análise a variância entre o afluente da Fase 1 e Fase 2 (Parte 2).

Orto-fosfato					Sólidos Totais				
FV	GL	SQ	QM	F ₀	FV	GL	SQ	QM	F ₀
T	1	3,07	3,07	3,81	T	1	27826	27826	0,05
R	77	62,07	0,81		R	106	63460995	598688	
Total	78	65,15			Total	107	63488822		
$F_{(0,05,1,\infty)} = 3,84$ e $F_{(0,01,1,\infty)} = 6,63$					$F_{(0,05,1,\infty)} = 3,84$ e $F_{(0,01,1,\infty)} = 6,63$				
Sólidos Totais Fixos					Sólidos Totais Voláteis				
FV	GL	SQ	QM	F ₀	FV	GL	SQ	QM	F ₀
T	1	28823	28823	0,08	T	1	61525	61525	0,45
R	109	37672958	345623		R	109	14823755	135997	
Total	110	37701782			Total	110	14885280		
$F_{(0,05,1,\infty)} = 3,84$ e $F_{(0,01,1,\infty)} = 6,63$					$F_{(0,05,1,\infty)} = 3,84$ e $F_{(0,01,1,\infty)} = 6,63$				
Sólidos Suspensos Totais					Sólidos Suspensos Fixos				
FV	GL	SQ	QM	F ₀	FV	GL	SQ	QM	F ₀
T	1	379006	379006	1,47	T	1	579101	579101	3,00
R	106	27318658	257723		R	106	20468813	193102	
Total	107	27697664			Total	107	21047915		
$F_{(0,05,1,\infty)} = 3,84$ e $F_{(0,01,1,\infty)} = 6,63$					$F_{(0,05,1,\infty)} = 3,84$ e $F_{(0,01,1,\infty)} = 6,63$				
Sólidos Suspensos Voláteis									
FV	GL	SQ	QM	F ₀					
T	1	19236	19236	0,63					
R	106	3224984	30424						
Total	107	3244221							
$F_{(0,05,1,\infty)} = 3,84$ e $F_{(0,01,1,\infty)} = 6,63$									

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)