Campus de São Carlos

**INFLUÊNCIA DO TIPO DE MATÉRIA
ORGÂNICA NO PROCESSO DE
DESNITRIFICAÇÃO EM REATORES
SEQÜENCIAIS EM BATELADA**

**ALUNO: ENGº ANDRÉ LUIZ DE OLIVEIRA
ORIENTADOR: PROF. DR. CARLOS EDUARDO BLUNDI**

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**ESCOLA DE ENGENHARIA
DE SÃO CARLOS**

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA E SANEAMENTO

**INFLUÊNCIA DO TIPO DE MATÉRIA
ORGÂNICA NO PROCESSO DE
DESNITRIFICAÇÃO EM REATORES
SEQUENCIAIS EM BATELADA**

ANDRÉ LUIZ DE OLIVEIRA

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre em Hidráulica e Saneamento

ORIENTADOR: Prof. Dr. Carlos Eduardo Blundi

SÃO CARLOS

2001

Serviço de Pós-Graduação EESC/USP

EXEMPLAR REVISADO

Data de entrada no Serviço: 14 / 03 / 02

Ass.: *Guilherme*

ALUS - Acervo - EESC

31100036927

Class.	TESE-CCSC
Cut.	4099
Tombo	T0064/02

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

048i   Oliveira, André Luiz de
Influência do tipo de matéria orgânica no
processo de desnitrificação em reatores seqüenciais
em batelada / André Luiz de Oliveira. -- São Carlos,
2001.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de
São Carlos-Universidade de São Paulo, 2001.
Área: Tecnologia do Ambiente Construído.
Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Blundi.

1. Tratamento de esgoto sanitário sintético.
2. Nitrificação. 3. Desnitrificação. 4. Reatores
seqüenciais em batelada. 5. Fontes de carbono.
I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **ANDRÉ LUIZ DE OLIVEIRA**

Dissertação defendida e julgada em 26-10-2001 perante a Comissão Julgadora:

_____
Prof.ª Assoc. **MARIA DO CARMO CALIJURI** (Presidente Substituto)
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP) APROVADO

_____
Prof. Dr. **MARCELO ZAIAT**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP) Aprovado

_____
Prof. Dr. **RAFAEL KOPSCHITZ XAVIER BASTOS**
(Universidade Federal de Viçosa/UFV) APROVADO

_____
Prof.ª Associada **MARIA DO CARMO CALIJURI**
Coordenadora do Programa de Pós-Graduação
em Engenharia (Hidráulica e Saneamento)

_____
JOSÉ CARLOS A. CINTRA
Presidente da Comissão de Pós-Graduação da EESC

Aos meus pais, José Francisco e Elza Augusto,
com toda admiração, carinho e respeito

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Carlos Eduardo Blundi pela orientação durante a realização deste trabalho.

À minha família por todo apoio e credibilidade

À Ana Flávia por todo amor e carinho.

À Vovó Zizinha, pelo carinho e hospedagem na fase de conclusão deste trabalho e ao meu sogro, Flávio, pelo apoio e amizade.

Aos grandes amigos Eduardo e Rita, especialmente pela grande ajuda na fase de conclusão deste trabalho.

À Nélia Callado pela grande ajuda na fase inicial deste trabalho e pela amizade.

Aos amigos Douglas, Valmir, Tibas, Iran Neto, Fabão, Vinícius, Everton, Jorge, Zé Edu, Marcelo M., Marcelo, Camila, Mércia e Cacau, Fernandão, Lú e André, Neyson, Rogers, Aurélio, Hélio, Márcio N., Márcio B., Cacá e Jeanete, Gunther, Romeu, Leonídia, Léo, Arnaldo, Flávia, Caíto, Penetra, Marilu, e aos companheiros de república Sérgio B., Sérgio S., André C. e João, por tudo.

À Prof. Beth, Janja, Eloísa, pela colaboração e amizade.

Aos funcionários do Departamento de Hidráulica e Saneamento, Rose, Alex, Pavi e Sá, pelo atendimento e amizade.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq pela bolsa de estudos concedida.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP pelo financiamento do projeto de pesquisa.

A todos, que de uma forma ou de outra, contribuíram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	iv
LISTA DE TABELAS.....	vii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	x
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xi
RESUMO.....	xii
<i>ABSTRACT</i>	xiii
1-INTRODUÇÃO.....	1
2-OBJETIVOS.....	3
3-REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1-Processos biológicos de tratamento.....	4
3.2-Remoção biológica de nitrogênio.....	8
3.2.1-Nitrificação biológica.....	13
3.2.2-Desnitrificação biológica.....	16
3.2.2.1-Fontes de carbono para a desnitrificação.....	18
3.2.2.2-Bactérias desnitrificantes.....	24
3.3-Reator sequencial em batelada aeróbio.....	25
3.4-Reator sequencial em batelada anaeróbio.....	28
3.5-Potencial redox.....	30
4-MATERIAL E MÉTODOS.....	33
4.1-Considerações iniciais.....	33
4.2-Descrição da instalação experimental.....	33
4.3-Esgoto sintético.....	37

4.4-Fontes de carbono introduzidas no reator anaeróbio para o estudo do processo de desnitrificação.....	39
4.4.1-Fonte 1-Próprio substrato.....	40
4.4.2-Fonte 2-Composição do substrato sintético com 70% de proteínas, 15% de carboidratos e 15% de lipídeos.....	40
4.4.3-Fonte 3-Composição do substrato sintético com 15% de proteínas, 70% de carboidratos e 15% de lipídeos.....	42
4.4.4-Fonte 4-Composição do substrato sintético com 15% de proteínas, 15% de carboidratos e 70% de lipídeos.....	43
4.4.5-Fonte 5-Etanol.....	44
4.4.6-Fonte 6-Metanol.....	45
4.5-Procedimento operacional das unidades de tratamento.....	45
4.6-Desenvolvimento do trabalho experimental.....	47
4.6.1-Fases do trabalho experimental.....	47
4.7-Monitoramento do sistema.....	55
4.7.1-Amostragem.....	55
4.7.2-Parâmetros, métodos e frequência das análises.....	56
4.7.3-Eficiência de remoção de nitrogênio.....	57
4.7.4-Eficiência de remoção de matéria carbonácea.....	58
4.8-Considerações a respeito do sistema.....	58
4.9-Análises microbiológicas do processo.....	58
5-RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	60
5.1-Substrato sintético.....	60
5.2-Fase 1: Adaptação do lodo e partida do sistema.....	62
5.3-Fase 2: Estudo da desnitrificação usando a fonte de carbono composta por 50% de proteínas, 40% de carboidratos e 10% de lipídeos (próprio substrato).....	70
5.4-Fase 3: Estudo da desnitrificação usando a fonte de carbono composta por 70% de proteínas, 15% de carboidratos e 15% de lipídeos (próprio substrato).....	88
5.5-Fase 4: Estudo da desnitrificação usando a fonte de carbono composta por 15% de proteínas, 70% de carboidratos e 15% de lipídeos (próprio substrato).....	100
5.6-Fase 5: Estudo da desnitrificação usando a fonte de carbono composta por 15% de proteínas, 15% de carboidratos e 70% de lipídeos (próprio substrato).....	112

5.7-Fase 6: Estudo da desnitrificação usando o etanol como fonte de carbono.....	123
5.8-Fase 7: Estudo da desnitrificação usando o metanol como fonte de carbono....	125
6-CONCLUSÕES.....	127
7-SUGESTÕES.....	130
8-REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	131
ANEXO A - Dados obtidos na fase de adaptação e partida do sistema	
ANEXO B - Dados obtidos na fase 2 do trabalho usando como fonte de carbono substrato composto por 50% de proteínas 40% de carboidratos e 10% de lipídeos	
ANEXO C - Dados obtidos na fase 3 do trabalho usando como fonte de carbono substrato composto por 70% de proteínas 15% de carboidratos e 15% de lipídeos	
ANEXO D - Dados obtidos na fase 4 do trabalho usando como fonte de carbono substrato composto por 15% de proteínas 70% de carboidratos e 15% de lipídeos	
ANEXO E - Dados obtidos na fase 5 do trabalho usando como fonte de carbono substrato composto por 15% de proteínas 15% de carboidratos e 70% de lipídeos	
ANEXO F – Dados obtidos na fase 6 do trabalho usando como fonte de carbono etanol	
ANEXO G – Dados obtidos na fase 7 do trabalho usando como fonte de carbono metanol	

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Visão hipotética da organização espacial no processo simultâneo de nitrificação e desnitrificação.....	12
Figura 3.2 – Sequência de transformações nos processos que ocorrem no tratamento de esgotos.....	32
Figura 4.1 – Esquema dos reatores sequenciais em batelada.....	34
Figura 4.2 – Instalação experimental utilizada em todas as fases do trabalho.....	36
Figura 4.3 – Detalhes da instalação experimental utilizada em todas as fases do trabalho.....	37
Figura 4.4 – Controle operacional do sistema de tratamento.....	46
Figura 4.5 – Períodos do funcionamento dos reatores sequenciais em batelada.....	47
Figura 5.1 – Valores de DQO_B , DQO_F , AV e AT obtidos para o Substrato, RSBAe e RSBA _n durante a partida e adaptação do sistema.....	66
Figura 5.2 – Valores de N-NTK, N-amon, $N-NO_3^-$ e $N-NO_2^-$ obtidos para o Substrato, RSBAe e RSBA _n durante a partida e adaptação do sistema.....	67
Figura 5.3 – Valores de DQO_B , DQO_F , AV e AT obtidos para o Substrato, RSBAe e RSBA _n durante a Fase 2 do trabalho experimental.....	72
Figura 5.4 – Valores de N-NTK, N-amon, $N-NO_3^-$ e $N-NO_2^-$ obtidos para o Substrato, RSBAe e RSBA _n durante a Fase 2 do trabalho experimental.....	73
Figura 5.5 – Perfis temporais do RSBA _n para valores da relação DQO/NO_3^- iguais a 0,0 0,5 e 1 com o uso da Fonte 1 de carbono.....	77

Figura 5.6 – Perfis temporais do RSBA _n para valores da relação DQO/ NO ₃ ⁻ iguais a 2, 5 e 10 com o uso da Fonte 1 de carbono.....	78
Figura 5.7 – Perfil temporal do RSBA _n para valor da relação DQO/ NO ₃ ⁻ igual a 14 com o uso da Fonte 1 de carbono.....	79
Figura 5.8 – Morfologias celulares encontradas nas amostras do lodo proveniente do RSBA _e	83
Figura 5.9 - Morfologias celulares encontradas nas amostras do lodo proveniente do RSBA _n	84
Figura 5.10 - Morfologias celulares encontradas nas amostras do lodo proveniente do RSBA _e responsáveis pela nitrificação.....	86
Figura 5.11 - Morfologias celulares encontradas nas amostras do lodo proveniente do RSBA _n responsáveis pela desnitrificação.....	87
Figura 5.12 – Valores de DQO _B , DQO _F , AV e AT obtidos para o Substrato, RSBA _e e RSBA _n durante a Fase 3 do trabalho experimental.....	90
Figura 5.13 – Valores de N-NTK, N-amon, N-NO ₃ ⁻ e N-NO ₂ ⁻ obtidos para o Substrato, RSBA _e e RSBA _n durante a Fase 3 do trabalho experimental.....	91
Figura 5.14 – Variação da composição do gás produzido no RSBA _n	93
Figura 5.15 – Perfis temporais do RSBA _n para valores da relação DQO/ NO ₃ ⁻ iguais a 2, 5 e 10 com o uso da Fonte 2 de carbono.....	95
Figura 5.16 – Perfil temporal do RSBA _n para valor da relação DQO/ NO ₃ ⁻ igual a 14 com o uso da Fonte 2 de carbono.....	96
Figura 5.17 - Morfologias celulares encontradas nas amostras do lodo proveniente do RSBA _n responsáveis pela desnitrificação, na Fase 3 do trabalho. (a) e (b) bacilos.....	99
Figura 5.18 – Valores de DQO _B , DQO _F , AV e AT obtidos para o Substrato, RSBA _e e RSBA _n durante a Fase 4 do trabalho experimental.....	102
Figura 5.19 – Valores de N-NTK, N-amon, N-NO ₃ ⁻ e N-NO ₂ ⁻ obtidos para o Substrato, RSBA _e e RSBA _n durante a Fase 4 do trabalho experimental.....	103
Figura 5.20 – Variação da composição do gás produzido no RSBA _n	105

Figura 5.21 – Perfis temporais do RSBAn para valores da relação DQO/NO_3^- iguais a 2, 5 e 10 com o uso da Fonte 3 de carbono.....	107
Figura 5.22 – Perfil temporal do RSBAn para valor da relação DQO/NO_3^- igual a 14 com o uso da Fonte 3 de carbono.....	108
Figura 5.23 - Morfologias celulares encontradas nas amostras do lodo proveniente do RSBAn responsáveis pela desnitrificação, na Fase 3 do trabalho.....	111
Figura 5.24 – Valores de DQO_B , DQO_F , AV e AT obtidos para o Substrato, RSBAe e RSBAn durante a Fase 5 do trabalho experimental.....	114
Figura 5.25 – Valores de N-NTK, N-amon, $N-NO_3^-$ e $N-NO_2^-$ obtidos para o Substrato, RSBAe e RSBAn durante a Fase 5 do trabalho experimental.....	115
Figura 5.26 – Variação da composição do gás produzido no RSBAn.....	117
Figura 5.27 – Perfis temporais do RSBAn para valores da relação DQO/NO_3^- iguais a 2, 5 e 10 com o uso da Fonte de carbono 4.....	118
Figura 5.28 – Perfil temporal do RSBAn para valor da relação DQO/NO_3^- igual a 14 com o uso da Fonte 4 de carbono.....	119
Figura 5.29 - Morfologias celulares encontradas nas amostras do lodo proveniente do RSBAn responsáveis pela desnitrificação, na Fase 5 do trabalho.....	122
Figura 5.30 – Perfil temporal do RSBAn para valor da relação DQO/NO_3^- igual a 14, usando o etanol como fonte externa de carbono.....	124
Figura 5.31 – Perfil temporal do RSBAn para valor da relação DQO/NO_3^- igual a 14, usando o metanol como fonte externa de carbono.....	125

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Diferentes tipos de sistemas tratando água residuária de baixas concentrações de matéria orgânica.....	7
Tabela 3.2 – Parâmetros que afetam a remoção biológica de nitrogênio.....	13
Tabela 3.3 – Seqüência operacional dos sistemas de lodo ativado em batelada.....	27
Tabela 4.1 – Diferentes substratos adicionados ao reator anaeróbio como fonte de carbono, nas diferentes fases de operação.....	36
Tabela 4.2 – Composição do Substrato Sintético expressa em porcentagem de DQO.....	38
Tabela 4.3 – Concentrações das soluções de sais minerais do substrato sintético.....	38
Tabela 4.4 – Concentração dos constituintes do substrato sintético simulando esgoto sanitário para uma DQO teórica de 580 mg/L.....	39
Tabela 4.5 - Concentração dos constituintes do substrato sintético simulando esgoto sanitário para uma DQO teórica de 5800 mg/L.....	40
Tabela 4.6 – Composição da Fonte 2 de carbono em termos de % de DQO.....	41
Tabela 4.7 – Concentração dos constituintes da Fonte 2 de carbono para uma DQO teórica de 5800 mg/L.....	41
Tabela 4.8 – Composição da Fonte 3 de carbono em termos de % de DQO.....	42
Tabela 4.9 – Concentração dos constituintes da Fonte 3 de carbono para uma DQO teórica de 5800 mg/L.....	43
Tabela 4.10 – Composição da Fonte 4 de carbono em termos de % de DQO.....	43

Tabela 4.11 – Concentração dos constituintes da Fonte 4 de carbono para uma DQO teórica de 5800 mg/L.....	44
Tabela 4.12 – Ciclo operacional do sistema, com duração de 12 horas, estudado na partida do sistema.....	50
Tabela 4.13 – Ciclo operacional do sistema, com duração de 24 horas, estudado na partida do sistema.....	51
Tabela 4.14 – Ciclo operacional do sistema, com duração de 24 horas, usado na Fase 2 do trabalho.....	52
Tabela 4.15 – Ciclo operacional do sistema, com duração de 24 horas, usado na Fase 3 do trabalho.....	54
Tabela 4.16 – Parâmetros analisados, métodos e frequência das análises.....	56
Tabela 5.1 – Valores médios dos parâmetros de monitoramento do substrato sintético simulando esgoto sanitário.....	61
Tabela 5.2 – Valores médios dos parâmetros de monitoramento do substrato sintético simulando esgoto sanitário (com adição de uréia).....	61
Tabela 5.3 – Sub-fases da adaptação e partida do sistema.....	62
Tabela 5.4 – Valores médios dos principais parâmetros avaliados durante a partida do sistema com ciclos de 12 e 24 horas para o RSBAe.....	63
Tabela 5.5 – Valores médios dos principais parâmetros avaliados durante a partida do sistema com ciclos de 12 e 24 horas para o RSBA _n	64
Tabela 5.6 – Valores médios dos principais parâmetros avaliados durante a Fase 2 do trabalho experimental.....	71
Tabela 5.7 – Duração da operação do sistema para cada relação DQO/N-NO ₃ ⁻	71
Tabela 5.8 – Valores das constantes e velocidades de decaimento de N-NO ₃ ⁻ no RSBA _n	81
Tabela 5.9 – Estimativa do número de microrganismos nitrificantes.....	85
Tabela 5.10 – Estimativa do número de microrganismos desnitrificantes.....	86
Tabela 5.11 – Valores médios dos principais parâmetros avaliados durante a Fase 3 do trabalho experimental.....	89
Tabela 5.12 – Duração da operação do sistema para cada relação DQO/N-NO ₃ ⁻	89

Tabela 5.13 – Valores das constantes e velocidades de decaimento de N-NO_3^- no RSBA _n	98
Tabela 5.14 – Estimativa do número de microrganismos desnitrificantes.....	99
Tabela 5.15 – Valores médios dos principais parâmetros avaliados durante a Fase 4 do trabalho experimental.....	101
Tabela 5.16 – Duração da operação do sistema para cada relação DQO/N-NO_3^-	101
Tabela 5.17 – Valores das constantes e velocidades de decaimento de N-NO_3^- no RSBA _n	109
Tabela 5.18 – Estimativa do número de microrganismos desnitrificantes.....	110
Tabela 5.19 – Duração da operação do sistema para cada relação DQO/N-NO_3^-	112
Tabela 5.20 – Valores médios dos principais parâmetros avaliados durante a Fase 5 do trabalho experimental para o RSBA _e e RSBA _n	113
Tabela 5.21 – Valores das constantes e velocidades de decaimento de N-NO_3^- no RSBA _n	121
Tabela 5.22 – Estimativa do número de microrganismos desnitrificantes.....	122

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AI	Alcalinidade Intermediária
AP	Alcalinidade Parcial
AT	Alcalinidade Total
AV	Ácidos Voláteis
AB	Alcalinidade a Bicarbonato
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DQO	Demanda Química de Oxigênio
DQO _B	Demanda Química de Oxigênio bruta
DQO _F	Demanda Química de Oxigênio filtrada
N ₂	Nitrogênio molecular
NMP	Número Mais Provável
NTK	Nitrogênio Total Kjeldahl
pH	Potencial Hidrogeniônico
RSBAe	Reator Sequencial em Batelada Aeróbio
RSBAn	Reator Sequencial em Batelada Anaróbio
ST	Sólidos Totais
STF	Sólidos Totais Fixos
STV	Sólidos Totais Voláteis
SS	Sólidos Suspensos
SSV	Sólidos Suspensos Voláteis
SSF	Sólidos Suspensos Fixos
STLM	Sólidos Totais no Liquor Misto
SVLM	Sólidos Voláteis no Liquor Misto
SLH	Sobrenadante de Lodo Hidrolisado
VDE	Velocidade de Desnitrificação Específica

LISTA DE SÍMBOLOS

AI/AT	Relação alcalinidade intermediária.
AT_{produz}/N_{amon}	Relação alcalinidade total produzida/nitrogênio amonificado
$AT_{cons}/N_{oxidado}$	Relação alcalinidade total consumida/nitrogênio oxidado
$AT_{produz}/N_{reduzido}$	Relação alcalinidade total produzida/nitrogênio reduzido
$DQO/N-NO_3^-$	Relação DQO/Nitrato
K_{1N}	Constante de primeira ordem de decaimento de nitrato
r_{1N}	Velocidade média de decaimento de nitrato
$N-NO_2^-$	Nitrogênio na forma de nitrito
$N-NO_3^-$	Nitrogênio na forma de nitrato
N_{amon}	Nitrogênio na forma de amônia
$N-NTK$	Nitrogênio total ($N-NH_4^+ + N-NO_3^-$)

RESUMO

OLIVEIRA, A. L. (2001). *Influência do tipo de matéria orgânica no processo de desnitrificação em reatores seqüenciais em batelada*. São Carlos. 141 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Este trabalho apresenta o desempenho de um sistema de reatores seqüenciais em batelada aeróbio/anaeróbio, na remoção de matéria carbonácea (DQO) e nitrogenada, no tratamento de esgoto sanitário sintético, simulando esgoto doméstico. O sistema era composto por dois reatores dispostos em série, um aeróbio (RSBAe), responsável pela remoção de matéria carbonácea e nitrificação e outro, anaeróbio (RSBAn), responsável pela desnitrificação. Os reatores foram construídos em acrílico transparente, com volume total de 16,5 L e volume útil de 13,5 L. A operação dos reatores foi realizada com ciclos de 12 h e 24 h, na fase de adaptação, e de 24 h, nas fases subseqüentes. O RSBAn foi agitado intermitentemente recirculando-se o biogás produzido e o RSBAe foi aerado/misturado continuamente. Foram testadas, como fontes de carbono para a desnitrificação, seis diferentes substratos, sendo que quatro eram compostos por combinações dos constituintes do substrato sintético (variações percentuais de proteínas, carboidratos e lipídeos em termos de DQO), e as outras duas, metanol e etanol. A eficiência atingida, na remoção de DQO, foi em média 95%, e as eficiências alcançadas na nitrificação e desnitrificação foram em média 99%, para qualquer uma das fontes de carbono utilizadas.

Palavras-chave: tratamento de esgoto sanitário sintético, nitrificação, desnitrificação, reatores seqüenciais em batelada, fontes de carbono.

ABSTRACT

OLIVEIRA, A. L. (2001). *Influence of the organic matter type in the denitrification process in sequencing batch reactors*. São Carlos. 141 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

This work presents the performance of (aerobic/anaerobic) sequencing batch reactors in the removal of carbonaceous (COD) and nitrogen matter treating synthetic substrate, simulating domestic wastewater. The system was composed of two reactors in series, one aerobic (RSBAe), responsible for the carbonaceous and nitrogen removal and another, anaerobic (RSBA_n), responsible for denitrification. The reactors were built in transparent Plexiglas with total volume of 16,5 L and useful volume of 13,5 L. The reactors operation was carried out with cycles of 12 h and 24 h, in the adaptation phase, and 24 h, in the other phases. The RSBA_n were agitated intermittently by recycling the produced biogas and the RSBAe were aerated/agitated continuously. Six different substrates were tested as carbon sources for denitrification four of them were composed by synthetic substrate combinations (percent variations of protein, carbohydrates and lipids as COD) and the other two, methanol and ethanol. The COD removal efficiency, in the COD removal, was about 95%, and the achieved efficiency in the nitrification and denitrification were about 99%, for any of the carbon source assayed.

Keywords: synthetic wastewater treatment, nitrification, denitrification, sequencing batch reactor, carbon sources.

1 - INTRODUÇÃO

O tratamento primário de esgoto municipal foi introduzido no fim do século XIX e tinha como objetivo principal remover os sólidos sedimentáveis através de decantação simples. Nas primeiras décadas do século XX iniciou-se o desenvolvimento do tratamento secundário caracterizado pelo uso dos processos biológicos, com o intuito de promover uma remoção mais completa do material orgânico, visto que, as unidades de tratamento primário podiam depurar apenas parcialmente o esgoto devido à existência de material orgânico não sedimentável.

Na década de sessenta ficou claro que o sistema composto por tratamento primário seguido de tratamento secundário ainda não era capaz de resolver com eficiência a poluição das águas de superfície devido às descargas de grandes quantidades de nutrientes, como o nitrogênio e fósforo, junto com os efluentes desses sistemas, tendendo a causar grande desequilíbrio ecológico nos corpos d'água receptores. Com vistas a reduzir essas descargas e assim proteger os corpos d'água, tornou-se necessário o desenvolvimento de sistemas com tratamento terciário, isto é, sistemas que além dos sólidos sedimentáveis e do material orgânico, também proviam de remoção de nutrientes como nitrogênio e fósforo (Van HAANDEL & MARAIS, 1999).

Portanto, os sistemas hoje desenvolvidos para o tratamento das águas residuárias buscam evitar os problemas causados pela poluição dos corpos receptores, sendo que os sistemas biológicos de tratamento empregam a capacidade de degradação microbiana encontrada naturalmente nos sistemas aquáticos, a fim de remover a matéria orgânica presente. Nos processos de tratamento de resíduos líquidos, o objetivo é a redução da Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) devida às substâncias orgânicas dissolvidas ou suspensas no meio, seguido pela remoção de nutrientes inorgânicos e compostos orgânicos recalcitrantes, antes do lançamento do efluente tratado em um corpo receptor (VAZZOLER, 1993).

No Brasil, a concentração máxima de amônia estabelecida pela resolução CONAMA 20, de junho de 1986, que pode estar presente nos efluentes de qualquer fonte poluidora é de 5 mg/L. Visto que esse valor não é alcançado pelo tratamento primário e secundário, faz-se necessário o tratamento dos efluentes com vistas à remoção de nutrientes, antes que os mesmos sejam descartados nos corpos receptores.

Há um grande número de opções e combinações tecnicamente viáveis para o tratamento de efluentes líquidos, no que se refere à remoção de matéria orgânica, sólidos suspensos e nutrientes.

Os sistemas mistos de tratamento associam as potencialidades de cada processo. A associação de reatores sequenciais em batelada aeróbios (RSBAe) e reatores sequenciais em batelada anaeróbios (RSBAa) pode atingir valores elevados de remoção de matéria carbonácea, sólidos em suspensão e nitrogênio.

As grandes vantagens dos processos de nitrificação e desnitrificação em sistemas de lodos ativados estão na possibilidade de se utilizar o próprio esgoto como fonte de carbono.

Com base nestas considerações, o presente trabalho foi desenvolvido, objetivando-se estudar a remoção de nitrogênio com a utilização de fontes de carbono disponíveis no próprio esgoto sanitário.

2 - OBJETIVOS

- Verificar o potencial de desnitrificação no reator seqüencial em batelada anaeróbio, utilizando-se diferentes fontes externas de carbono;
- Verificar a influência das fontes de carbono nas velocidades de decaimento de nitrato, no reator seqüencial em batelada anaeróbio;
- Avaliar o potencial do sistema combinado aeróbio/anaeróbio, na remoção de matéria carbonácea e nitrogenada;
- Avaliar as variações do potencial redox e da concentração de matéria carbonácea, em função do decaimento de nitrato no reator anaeróbio.

3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 – Processos biológicos de tratamento

Os objetivos do tratamento biológico de águas residuárias são coagular e remover as partículas sólidas coloidais não sedimentáveis e estabilizar a matéria orgânica com a utilização de uma grande variedade de microrganismos, principalmente as bactérias, que podem converter substâncias orgânicas dissolvidas e coloidais em gases e tecidos celulares (METCALF & EDDY, 1991).

O tratamento biológico envolve complexas e variadas populações de microrganismos que se inter-relacionam, possuem curvas de crescimento distintas e que sofrem a influência de vários fatores ambientais, como temperatura, pH, concentração da matéria orgânica, concentração de nutrientes e também do tipo de sistema de tratamento adotado (CALLADO, 2001).

Os sistemas biológicos de tratamento dividem-se em aeróbios e anaeróbios em função do comportamento metabólico dos microrganismos. No processo aeróbio, os microrganismos responsáveis pela degradação da matéria orgânica necessitam da presença de oxigênio, já os microrganismos anaeróbios crescem e metabolizam os compostos de carbono na ausência de oxigênio molecular (VAZOLLER, 1993).

VAN HAANDEL & LETTINGA (1994) explicam que o mecanismo de desenvolvimento dos microrganismos envolve reações de obtenção de energia e de síntese celular através do catabolismo e do anabolismo. No catabolismo ocorre um processo dissimilativo, associado à produção e captação de energia, que envolve reações de oxidação ou fermentação biológica, enquanto no anabolismo, a energia armazenada é consumida para satisfazer funções de manutenção e produção celular.

No catabolismo oxidativo, a matéria orgânica é degradada na presença de um

oxidante em ambas as vias aeróbia e anaeróbia. A via aeróbia ocorre por meio de bactérias que utilizam o oxigênio molecular como aceptor final de elétrons; a via anaeróbia ocorre por intermédio de microrganismos que utilizam nitrato, gás carbônico, sulfato ou outro composto oxidado como aceptor final de elétrons. O processo fermentativo não envolve a participação de nenhum aceptor externo de elétrons (METCALF & EDDY, 1991).

Nos sistemas anaeróbios, verifica-se que a maior parte do material orgânico biodegradável presente no despejo é convertida em biogás (cerca de 70% a 90%). Apenas uma pequena parcela do material orgânico é convertida em biomassa microbiana (cerca de 5% a 15%), que constitui o lodo excedente do sistema. Além da pequena quantidade produzida, o lodo excedente apresenta-se mais concentrado e com melhores características de desidratação. A matéria não convertida em biogás ou em biomassa flui do reator como material não degradado (10% a 30%). Em princípio, todos os compostos orgânicos podem ser degradados pela via anaeróbia, sendo que o processo mostra-se mais eficiente e mais econômico quando os dejetos são facilmente biodegradáveis (CHERNICHARO, 1997).

O biogás típico, produzido durante a degradação anaeróbia, é uma valiosa fonte de energia, contendo cerca de 65%-70% de metano, sendo o restante composto quase que totalmente por dióxido de carbono. Embora o hidrogênio seja um importante precursor da formação de metano na digestão anaeróbia, a sua concentração é normalmente muito baixa, devido ao seu consumo imediato pelas bactérias hidrogenotróficas. Na ausência de nitrato e sulfato, os quais afetam a metanogênese pelo desvio de elétrons, a produção de metano é relacionada com a redução da DQO (SPEECE, 1996).

Para que o tratamento anaeróbio ocorra com sucesso é necessário que haja uma interação entre as bactérias acidogênicas, que têm um rápido crescimento, e as metanogênicas que crescem mais lentamente. Portanto a atividade da biomassa metanogênica controla o sistema e é dependente de um tempo de retenção eficiente para que possa se desenvolver (NDON & DAGUE, 1997). Existe um tempo de retenção mínimo, abaixo do qual o sistema pode entrar em colapso pelo fenômeno conhecido como “arraste do lodo”.

Outro fator importante para o bom funcionamento dos sistemas anaeróbios é a

formação de grânulos. O processo de granulação é regularmente entendido como resultado das interações sintróficas entre o consórcio de microrganismos existentes na biomassa. Nos reatores do tipo UASB a biomassa é crescente e há constante formação de grânulos, o que permite uma grande atividade microbiana (BEUN *et al.*, 1998).

A digestão anaeróbia de compostos orgânicos complexos pode ser de forma simplificada, considerada um processo de dois estágios. No primeiro, um grupo de bactérias facultativas e anaeróbias, denominadas formadoras de ácidos ou fermentativas, converte os materiais complexos em compostos orgânicos mais simples, principalmente ácidos voláteis, através de hidrólise, fermentação e conversão biológica. No segundo estágio ocorre a conversão dos ácidos orgânicos em produtos finais gasosos, ou seja, metano e gás carbônico. Essa conversão é realizada por um grupo especial microrganismos, denominados formadores de metano, estritamente anaeróbios (CHERNICHARO, 1997).

Apesar de todas as vantagens conhecidas do tratamento anaeróbio, existem algumas desvantagens quando comparado com o tratamento aeróbio. A baixa velocidade de crescimento dos microrganismos anaeróbios pode causar a falência do sistema se ocorrer uma grande perda de microrganismos (sólidos biológicos) pelo efluente. Entretanto, a baixa velocidade de crescimento e o baixo rendimento dos microrganismos resultam na produção de menores quantidades de lodo biológico, quando comparado com o dos sistemas aeróbios.

Os processos anaeróbios têm sido considerados inadequados para o tratamento de águas residuárias com baixa concentração de matéria orgânica ($DQO < 1000 \text{ mg/L}$) por causa da pequena taxa de utilização do substrato nessas concentrações. Além disso, a obtenção de um processo eficiente de digestão anaeróbia somente é possível, na maioria dos casos, em temperaturas operacionais relativamente altas (25-30 °C). Para que essa exigência seja satisfeita é preciso uma fonte externa de calor, principalmente em regiões não tropicais onde a temperatura ambiente é baixa (NDON & DAGUE, 1997).

A Tabela 3.1 reporta os resultados de estudos em laboratório realizados por vários pesquisadores no tratamento anaeróbio de águas residuárias com baixas concentrações, utilizando diferentes sistemas.

Tabela 3.1 – Diferentes tipos de sistemas tratando água residuária com baixas concentrações de matéria orgânica

Reator/Resíduo	HRT (h)	Temp. (°C)	Concent. (mgDQO/L)	Carregam. (g/L.dia)	Rem. %
Filtro anaeróbio					
Esgoto	5	25-33	166-515	0,8-2,5	71
Esgoto	24	20-35	288	0,288	78
UASB					
Esgoto	2,6-7,2	9-25	150-590	0,5-4,5	50-90
Reator de leito expandido					
Esgoto sintético	0,33-6	10, 20 e 30	50-600	0,8-4,8	38-90
Esgoto	0,08-3	20	88-186	0,65-3	80 (máx)
Reator de leito fluidizado					
Esgoto sintético	1-1,5	13-31	557-700	11,2-13,4	62-71
Esgoto	2,7-26	10-25	150-590	1,0-4,5	60-90

Fonte: Adaptado de NDON & DAGUE (1997)

Nos sistemas aeróbios de tratamento ocorre somente cerca de 40% a 50% de degradação biológica, com a conseqüente conversão a CO₂. Verifica-se uma enorme incorporação de matéria orgânica como biomassa microbiana (cerca de 50% a 60%), que vem a constituir o lodo excedente do sistema. O material orgânico não convertido em gás carbônico ou em biomassa deixa o reator como material não degradado (5% a 10%) (CHERNICHARO, 1997)

Os organismos aeróbios heterotróficos obtêm a maior parte de sua energia da respiração, definida como a oxidação de combustíveis orgânicos (substratos) pelo oxigênio molecular.

Em condições aeróbias, a respiração celular é o mecanismo envolvido na biodegradação processada por bactérias, que promove a oxidação dos compostos orgânicos por quebra das moléculas complexas, transformando-as em moléculas mais simples e mais estáveis. Portanto, é o oxigênio o principal acceptor dos elétrons gerados na degradação desses compostos (LEHNINGER, 1976).

Num sistema de lodos ativados, a cultura microbiológica atuante no processo é heterogênea, composta principalmente por bactérias, protozoários, fungos,

leveduras e microrganismos multicelulares, como rotíferos e nematóides, cujas atividades são de fundamental importância para o processo. As bactérias são consideradas a base do floco, tanto estrutural como funcional, e desempenham o papel de assimilação da matéria orgânica dissolvida, já os protozoários e rotíferos realizam a remoção da massa bacteriana dispersa no sistema, impedindo sua descarga no efluente final (BITTON¹, 1994 apud CALLADO, 2001).

A presença da microfauna, constituída principalmente pelos protozoários e micrometazoários, é um importante indicio de bom funcionamento do processo aeróbio, uma vez que sua natureza varia com o nível de depuração, com a concentração de oxigênio dissolvido, com a presença de substâncias tóxicas e outros parâmetros relevantes do sistema (CETESB, 1992).

As bactérias filamentosas, fixas ou livres, degradam também a matéria orgânica, mas devem ter suas concentrações controladas para não causarem problemas de sedimentabilidade do lodo.

Os sistemas aeróbios de tratamento são tradicionalmente mais empregados que os anaeróbios. Entretanto, a tecnologia dos sistemas que empregam a digestão anaeróbia, atualmente vem ganhando cada vez mais espaço. O surgimento de novas configurações de reatores anaeróbios e de novas concepções de sistemas de tratamento também tem direcionado o uso de sistemas mistos. Nestes sistemas, a tecnologia aeróbia e a anaeróbia são empregadas sequencialmente possibilitando o uso das potencialidades de cada uma.

Dessa forma, com análise e controle ambiental adequado, quase todas as águas residuárias podem ser tratadas biologicamente, desde que o ambiente necessário para o crescimento dos microrganismos esteja sendo produzido e controlado efetivamente dentro da estação de tratamento (METCALF & EDDY, 1991).

3.2 – Remoção biológica de nitrogênio

Para todos os corpos d'água receptores de efluentes é muito importante que a poluição por nutrientes seja a menor possível. A eutrofização desses ambientes naturais, em decorrência da alta concentração de compostos de nitrogênio, fósforo e

---

¹ BITTON, G. (1994). *Wastewater Microbiology*, John Wiley and Sons, Inc., Publication, New York, 478 p.

outros nutrientes advindos dos efluentes de estações de tratamento de esgotos, tem provocado o estabelecimento de limites máximos para a concentração desses nutrientes, antes da emissão nos corpos receptores (LEMMER, 1997).

O aumento do nível de nitrato em águas subterrâneas devido ao intensivo uso de fertilizantes nitrogenados, descargas de efluentes industrial e percolado de aterros, tem se tornado uma grande preocupação por causa dos efeitos negativos à saúde, podendo provocar a metemoglobinemia e formar compostos nitrogenados como nitrosaminas, os quais têm efeitos carcinogênicos (APS, 1991). Além disso, a contaminação de águas potáveis pelo nitrato pode ser a causa da ocorrência de câncer no sistema digestivo. Por esses motivos, muitos países têm estabelecido limites na concentração de nitrato nos efluentes. Essas limitações têm incentivado a busca de procedimentos analíticos cada vez mais sensíveis, precisos e simples para a verificação da remoção do nitrogênio (KIRSTEIN *et al.*, 1999).

Nos esgotos domésticos, a maior parte do nitrogênio está na forma amoniacal (cerca de 60%) e quando lançados nos corpos receptores, há consumo do oxigênio dissolvido pela oxidação do nitrogênio amoniacal gerando o nitrito que é tóxico e pode causar danos à saúde.

A resolução CONAMA, de 18 de junho de 1986, estabelece que os efluentes de qualquer fonte geradora poderão ter uma concentração máxima de amônia de 5 mg/L. Portanto os esgotos domésticos, onde há uma grande concentração de nutrientes, não podem ser lançados diretamente nos corpos d'água, tendo que primeiramente passar por algum tipo de tratamento. É comum o emprego dos processos biológicos de tratamento, uma vez que são eficientes no tratamento de despejos com grande concentração de nutrientes.

Os processos biológicos para remoção de nitrogênio são realizados, principalmente, em dois passos. O primeiro é normalmente o tratamento aeróbio por lodos ativados e o segundo, é o tratamento aeróbio/anóxico/anaeróbio, combinado em diferentes configurações, de acordo com a finalidade específica. O processo mais efetivo, no entanto, é o sistema de lodos ativados anóxico, sendo de extrema importância que a completa nitrificação seja alcançada no primeiro passo (ROS, 1995).

Nos sistemas de tratamento, os principais processos envolvidos na remoção de nitrogênio são a amonificação, a nitrificação e a desnitrificação. A amonificação consiste na transformação do nitrogênio orgânico (N-org), por intermédio de enzimas catalisadoras, em nitrogênio amoniacal (N-amon). As formas do nitrogênio amoniacal mantêm-se em equilíbrio de acordo com o pH do meio, conforme a equação 3.1:

A remoção biológica de nitrogênio é realizada em dois estágios principais, onde a amônia é primeiramente convertida a nitrato, via nitrito (nitrificação) e o nitrato posteriormente transformado em nitrogênio gasoso (desnitrificação). Para que ocorra a desnitrificação é necessário uma fonte de carbono, como substrato para as bactérias desnitrificantes. Os tipos de fontes de carbono, externamente adicionada ou contida dentro da própria água residuária a ser tratada, diferem nas várias tecnologias dos processos existentes (ISAACS & HENZE, 1995).

Desde os experimentos originais desenvolvidos por WURMAN (1964) & McCARTY (1966) com relação à remoção biológica de nitrogênio em estações de tratamento de águas residuárias, esse tipo de sistema vem se tornando cada vez mais bem estabelecido devido à imposição de limites máximos de lançamento dos compostos nitrogenados (ISAACS & HENZE, 1995).

Nas primeiras unidades construídas para a remoção biológica de nitrogênio, o efluente nitrificado de um sistema de lodos ativados era descarregado num segundo sistema, sem aeração, onde era adicionada uma substância orgânica, geralmente metanol. Dessa maneira existiam dois sistemas sequenciais com lodos diferentes, sendo que no primeiro desenvolvia-se a nitrificação e, no segundo, a desnitrificação (VAN HAANDEL & MARAIS, 1999).

Até recentemente, a nitrificação seguida de desnitrificação foi o processo mais confiável e de menor custo para a remoção de nitrogênio. Normalmente os processos de desnitrificação biológica têm sido realizados em reatores separados, seguidos da oxidação de carbono e nitrificação (BANG *et al.*, 1995). A tendência atual tem apontado para o uso das fontes internas de carbono por razões de maior

economia, baixa produção de lodo e utilização otimizada da matéria orgânica presente na água residuária (ISAACS & HENZE, 1995).

Além dos sistemas que empregam a remoção de nitrogênio em etapas distintas para a nitrificação e desnitrificação, existem vários estudos acerca da tecnologia que emprega esses dois processos simultaneamente. Nos processos que empregam biofilmes têm-se como conceito básico a criação de um gradiente de concentração de oxigênio nos aglomerados de microrganismos, de forma que condições aeróbias e anaeróbias possam ser estabelecidas dentro de um mesmo reator (MENOUD *et al.*, 1999).

Existem freqüentes observações com relação a desnitrificação nos sistemas que empregam a simultaneidade, especialmente quando a relação DQO/N-NO₃⁻ no afluente é baixa. O consumo de nitrogênio através da nitrificação/desnitrificação ocorre por causa do estabelecimento de micro-zonas anóxicas no centro dos flocos ou na parte interna dos biofilmes, permitindo que as bactérias desnitrificantes heterotróficas produzam nitrogênio gasoso (N₂) pelas vias tradicionais, ou seja, através do nitrato (HELMER & KUNST, 1998).

No entanto, esses mesmos autores avaliaram um sistema composto por biofilme aeróbio com concentração de OD em torno de 1,0 mg/L e verificaram que a formação do N₂, foi realizada via nitrito e não pelas vias tradicionais das micro-zonas anóxicas. Essa conclusão teve como base o fato de que a conversão da amônia a N₂ ocorreu sem a adição de qualquer substrato orgânico.

Os processos simultâneos de nitrificação e desnitrificação também foram estudados por BANG *et al.* (1994) num sistema semelhante tratando água residuária contendo álcool de polivinil. Os seus estudos demonstraram que a desnitrificação ocorria até mesmo com concentrações de oxigênio dissolvido acima de 5,0 mg/L, indicando que a simultaneidade dos processos é possível num mesmo reator. Outro ponto importante é que o suprimento externo de fonte de carbono não foi necessário como nos processos de dois estágios.

COLLIVIGNARELLI & BERTANZA (1999), estudaram a simultaneidade desses processos num sistema de lodos ativados convencional. Os autores concluíram que a mesma eficiência na remoção de DQO e de nitrogênio pode ser alcançada com a economia de 20% de espaço, se comparado com um sistema convencional com pré-

desnitrificação. Também foi verificada nesse sistema, uma economia de 50% no consumo de energia.

Portanto, os ambientes necessários para que ocorram a nitrificação e a desnitrificação podem ser estabelecidos dentro de um mesmo reator, não sendo estritamente necessário o uso de uma unidade de tratamento para cada processo. Uma visão hipotética da organização espacial desses processos ocorrendo simultaneamente está representada na Figura 3.1.

Fonte: SØRENSEN & NIELSEN (1996)

Figura 3.1 – Visão hipotética da organização espacial no processo simultâneo de nitrificação e desnitrificação

De acordo com LEEUW *et al.* (1996), muitos fatores interferem nos processos de remoção de nitrogênio e, de uma forma geral, a insuficiência na remoção pode ser causada tanto pelas características desfavoráveis da água residuária quanto pelas deficiências operacionais do sistema. A Tabela 3.2 apresenta alguns parâmetros que afetam a remoção de nitrogênio.

Tabela 3.2 – Parâmetros que afetam a remoção biológica de nitrogênio

	Nitrificação	Desnitrificação
Características da Água residuária	- Alta [N-NH ₄ ⁺] - Alta vazão - Componentes tóxicos	- Alta [N-NH ₄ ⁺] - Alta vazão - Baixa taxa DQO/N - DQO dificilmente biodegradável - componentes tóxicos
Configuração do processo/ Controle	- Oxigenação insuficiente - Baixo controle na oxigenação - Volume aeróbio insuficiente - Baixa idade do lodo	- Baixo controle de oxigênio - Insuficiente volume anóxico - Baixa taxa de recirculação - Pouco controle de recirculação - Configuração incorreta

Fonte : Adaptado de LEEUW et al. (1996)

3.2.1 – Nitrificação biológica

Os processos de nitrificação biológica envolvem a oxidação do íon amônio (NH₄⁺) a nitrito (NO₂⁻) e a nitrato (NO₃⁻) na presença de oxigênio dissolvido, e são realizadas em duas etapas, com grupos específicos de microrganismos para cada uma delas. A nitritação, conversão do íon amônio a nitrito, é realizada pelo grupo de bactérias do gênero *Nitrosomonas*, *Nitrosocystis*, *Nitrosospira*, *Nitrozoglea*, *Nitrosovibrio*, *Nitrosococcus* e *Nitrosolobos*. A nitratação, conversão de nitrito em nitrato, é realizada pelas bactérias do gênero *Nitrobacter*, *Nitrocystis*, *Nitrococcus*, *Bacteroides* e *Microderma*. Os processos de conversão e conseqüentes produções de energia são dados pelas equações 3.2 (Nitritação) e 3.3 (Nitratação).

Essas equações são reações de oxidação para obtenção de energia. As bactérias dos gêneros *Nitrosomonas* e *Nitrobacter* utilizam a energia dessas reações para síntese e manutenção celular.

A velocidade de nitrificação é baseada nas reações estequiométricas e pode ser conseguida através de análises químicas referentes às velocidades de consumo de substrato ou formação de produtos, bem como monitoramento dos consumos de oxigênio e de CO₂ (GERNAEY *et al.*, 1998).

Nos sistemas onde ocorrem processos de nitrificação existem culturas mistas de organismos autotróficos e heterotróficos na biomassa (SÖZEN *et al.*, 1996), sendo mais freqüentes os autotróficos nitrificantes.

A nitrificação é geralmente considerada uma conversão autotrófica, mas vários estudos estão apontando como nitrificantes dos compostos de nitrogênio orgânico e inorgânico, organismos heterotróficos (ZHAO, 1997). As bactérias quimioautotróficas nitrificantes obtêm energia pela oxidação de compostos inorgânicos reduzidos de nitrogênio como NH₄⁺ e NO₂⁻ e utilizam CO₂ como fonte de carbono, as bactérias quimioheterotróficas nitrificantes normalmente obtêm energia pela oxidação de compostos orgânicos e utilizam matéria orgânica carbonácea como fonte de carbono.

A nitrificação heterotrófica pode contribuir significativamente na oxidação da amônia, uma vez que é dominante sobre a autotrófica em muitos ecossistemas (ZHAO, 1997). Comparado aos organismos nitrificantes heterotróficos, os autotróficos geralmente têm um crescimento mais lento, menores rendimentos energéticos, requerem maiores concentrações de oxigênio dissolvido e não toleram ambientes ácidos. Portanto nessas situações e em especial, em baixas concentrações de oxigênio dissolvido, são desfavorecidos.

ABREU (1994) cita que em ambientes predominantemente nitrificantes e com baixas concentrações de oxigênio dissolvido ($\approx 0,5$ mg/L), há o acúmulo de nitrito e o aumento da velocidade de crescimento das bactérias responsáveis pela nitrificação (*Nitrosomonas*) indicando que as bactérias responsáveis pela nitratação (*Nitrobacter*) são mais sensíveis a essas pequenas concentrações de oxigênio dissolvido. No entanto, a taxa de crescimento específico máxima das bactérias do gênero *Nitrobacter* é significativamente maior do que das bactérias *Nitrossomonas*,

em faixa de temperatura variando de 10 °C a 20 °C, em condições de boa aeração (KNOWLES, 1982² apud ZHAO et al., 1997). Dessa forma, para regiões de clima moderado, não há acúmulo de nitrito nos processos de nitrificação em sistemas de tratamento de esgoto.

RITTMANN *et al.* (1994) relatam que, mesmo com a concorrência existente entre as bactérias autótrofas e heterótrofas por oxigênio dissolvido e nitrogênio, existem algumas interações entre as espécies, favoráveis ao processo de nitrificação. Segundo os autores, as bactérias heterótrofas produzem compostos que estimulam o crescimento das autótrofas, utilizam compostos inibitórios às autótrofas, produzem polímeros extracelulares, melhorando a agregação de ambas as espécies nos flocos e biofilmes, contribuem para a manutenção das autótrofas no biofilme visto que crescem mais rápido e são predominantes nas partes externas. Por outro lado, as bactérias autótrofas produzem e liberam compostos microbiológicos solúveis que aumentam o suprimento de substratos das heterotróficas.

As bactérias nitrificantes, de uma forma geral, são organismos sensíveis e extremamente susceptíveis a uma ampla variedade de inibidores que podem afetar o seu crescimento e suas atividades. Devido ao seu baixo crescimento e à sua pequena porcentagem na biomassa total do lodo, frequentemente é muito difícil manter um eficiente processo de nitrificação biológica e, dessa forma, enquadrar o efluente nos padrões de emissão (MASSONE *et al.*, 1996). Altas concentrações de amônia e ácido nitroso, valores de pH e temperatura fora das faixas ótimas, baixa concentração de oxigênio dissolvido, entre outros fatores, podem causar inibição. Se os níveis de oxigênio dissolvido encontram-se abaixo de 1,0 mg/L torna-se um fator limitante e o processo torna-se lento ou cessa (METCALF & EDDY, 1991).

Os distúrbios na nitrificação em estações de tratamento de esgotos podem levar a altas concentrações de amônia ou nitrito no efluente, que, ao serem lançados, reagem consumindo o oxigênio dissolvido, tornando os corpos receptores inadequados para vida aquática (KÖNIG, 1998).

Segundo SURMACZ-GORSKA *et al.* (1996) o monitoramento e o ajuste do processo de nitrificação é muito difícil e requer cuidado especial. O consumo do N-NH_4^+ e a produção de N-NO_3^- são bons indicativos do funcionamento do processo,

² KNOWLES, R. (1982). Denitrification. *Microbiol. Rev.* 46, 43-70

mas não refletem a real atividade das bactérias nitrificantes. Como nos sistemas biológicos de remoção de nitrogênio o processo mais vulnerável é o de nitrificação, é muito importante que seja feito um monitoramento dos parâmetros envolvidos de forma a obter-se melhores condições operacionais.

Os autores acompanharam, nesse sentido, as taxas de oxidação do N-NO_2^- e N-NH_4^+ no licor misto de um sistema de lodos ativados, através da medida da velocidade de consumo de oxigênio em ambiente seletivo de bactérias nitrificantes, e observaram que as variações nas concentrações de oxigênio e de DQO eram semelhantes às variações das velocidades de oxidação de N-NO_2^- e N-NH_4^+ . Essa semelhança indicou o potencial da oxidação dos compostos nitrogenados como o método para o controle e otimização da nitrificação nos processos de remoção biológica de nutrientes.

3.2.2 – Desnitrificação biológica

A desnitrificação é a conversão do nitrato a nitrogênio gasoso e é realizada por microrganismos desnitrificantes, sob condições anóxicas/anaeróbias (SØRENSEN & NIELSEN *et al.* 1996).

O processo é realizado por uma série de microrganismos heterotróficos facultativos, que podem utilizar nitrato ao invés de oxigênio comoceptor final de elétrons. A oxidação da matéria orgânica em dióxido de carbono e água, no processo de desnitrificação, é o mesmo que acontece com os processos aeróbios de conversão, diferindo apenas, o estágio final de transferência de elétrons (ROS, 1995).

Segundo METCALF & EDDY (1991), a conversão do nitrato pode ser realizada por vários gêneros de bactérias heterotróficas como *Achromobacter*, *Aerobacter*, *Alcaligenes*, *Bacillus*, *Brevibacterium*, *Flavobacterium*, *Lactobacillus*, *Micrococcus*, *Proteus*, *Pseudomonas* e *Spirillum*. A sequência de reações para redução do nitrato está representada pela equação 3.4 :

A reação simplificada para o processo de desnitrificação utilizando o metanol como fonte de carbono é apresentada na equação 3.5:

Na equação 3.5 o termo $\text{C}_2\text{H}_7\text{O}_2\text{N}$ representa a massa celular. Nesse processo, cada mol de nitrato reduzido consome um mol de prótons e forma 0,47 mol de nitrogênio molecular. Para transformar 1,0 g de N-NO_3^- em N_2 são consumidos 2,47 g de metanol, produzidos 0,45g de massa celular e são formados 3,57g CaCO_3 de alcalinidade.

A velocidade de desnitrificação é afetada principalmente pelo pH, temperatura, oxigênio dissolvido (OD), concentração de nitrato e tipo de fonte de carbono. SURAMPALLI et al. (1997), reportam que o pH ideal situa-se entre 6,5 e 8,0 e a temperatura entre 10 °C e 30 °C.

A desnitrificação foi considerada inicialmente como sendo um processo estritamente anóxico, dado que as bactérias desnitrificantes preferem utilizar o oxigênio dissolvido para a respiração, o que impede o uso de nitrato ou nitrito como aceptor final de elétrons (KNOWLES³ apud ZHAO et al., 1997). No entanto, a desnitrificação pode ocorrer mesmo na presença de oxigênio, em ambientes que apresentem pH ácido. Além disso, em reatores de biofilme fixo, bem como de crescimento suspenso, pode haver a formação de camadas de biomassa aeróbias com sub-camadas anóxicas de forma que o processo aeróbio e a desnitrificação ocorram simultaneamente (ROS, 1995).

Geralmente, a desnitrificação ocorre efetivamente apenas sob condições limites de oxigênio, o grande regulador na atividade do processo em sistemas naturais, embora os mecanismos bioquímicos de regulação sejam mal compreendidos e as relações entre oxigênio dissolvido e desnitrificação não sejam bem quantificadas (TIEDJE, 1988⁴ apud LIE & WELANDER, 1994).

³ KNOWLES, R. (1982). Denitrification. *Microbiol. Rev.* 46, 43-70

⁴ TIEDJE, J. M. (1988). Ecology of Denitrification and Dissimilatory Nitrate Reduction to Ammonium. In: *Biol. Of Anaer. Microorganisms*. J. B. Zehnder (Ed). John Wiley & Sons, New York, pp. 179-244.

Várias investigações têm indicado uma concentração de oxigênio limite, geralmente em torno de 0.2 mg/L, acima da qual a desnitrificação é deficiente. A atividade de desnitrificação é afetada pelo oxigênio também a concentrações abaixo desse valor, mas pouco se sabe a concentrações menores que 0.1 mg/L de oxigênio dissolvido, pois não podem ser facilmente medidas com sondas de oxigênio convencionais (LIE & WELANDER, 1994).

ROS (1995), estudando a cinética da desnitrificação num sistema de lodos ativados, verificou que no momento em que o oxigênio era totalmente consumido, tinha início o processo de desnitrificação. A concentração de nitrato diminuía com velocidade constante e ao mesmo tempo a concentração de nitrito aumentava até o consumo de todo nitrato, para então, também começar a diminuir. Quando o nitrato e o nitrito eram totalmente consumidos, o sistema passava a operar em condições de anaerobiose e sulfeto era produzido.

3.2.2.1 – Fontes de carbono para a desnitrificação

A remoção de nitrogênio total (N-NTK) nos processos convencionais de desnitrificação heterotrófica depende da relação DQO/N e da taxa de reciclo interno. Por esta razão a adição de uma fonte externa de carbono é necessária para águas residuárias que apresentem baixa relação DQO/N (LEE *et al.*, 2001), ou seja, menor que a requerida estequiometricamente

Muitas fontes de carbono podem ser usadas no processo de desnitrificação, porém a eficiência da desnitrificação é maior com a utilização das fontes de carbono mais simples e facilmente biodegradáveis como metanol, etanol, ácido acético e glicose.

Algumas considerações com relação à escolha da fonte de carbono têm sido feitas, avaliando-se vários fatores tais como: economia, desempenho, produção de lodo e prática operacional. Tais considerações têm levado à escolha de álcoois como fonte de carbono (NYBERG *et al.* 1996). Outras fontes de carbono também têm sido usadas, incluindo acetato e glicose.

Os tipos de fontes de carbono e as taxas C/N afetam as taxas de redução de nitrato e de nitrito (HER & HUANG, 1995).

WELANDER *et al.* (1998), utilizando um sistema em escala piloto que empregava biofilme suspenso (biofilme de leito móvel), para o tratamento biológico do percolado de aterro sanitário, alcançaram taxas de nitrificação e desnitrificação volumétrica de 24 gN/m³.h, a 16 °C, e de 55 gN/m³.h, a 17 °C, com metanol como fonte de carbono.

MOHSENI-BANDPI & ELLIOTT (1998), operando um disco biológico rotativo para remoção de nitrato de uma água com fins potáveis, encontraram relações ótimas de carbono/nitrogênio (C/N) na desnitrificação de 1,1, 1,25 e 1,7 para metanol, etanol e ácido acético, respectivamente. As quantidades requeridas para a remoção de 1,0 mg de nitrato foram em média 2,9, 2,4 e 4,3 mg de metanol, etanol e ácido acético, respectivamente.

Segundo os autores, a eficiência na remoção de nitrato com o uso de metanol, etanol e ácido acético como fonte de carbono aumenta quase linearmente com o aumento da relação C/N, até um valor ótimo. Para metanol e ácido acético a eficiência de remoção não é significativamente aumentada com o aumento da relação C/N além da relação ótima. Com etanol, a eficiência de remoção de nitrato continua a aumentar uniformemente. Isto pode ser explicado pela possível formação de ácido acético a partir do etanol, quando uma alta concentração deste está presente no reator.

A desnitrificação com o uso do metano como a única fonte de carbono mostrou-se possível de acordo com os trabalhos de THALASSO *et al.* (1997). Na presença de oxigênio, foi obtida uma taxa de desnitrificação de 50 gN-NO₃⁻/m³.d para um inoculo misto aeróbio e anaeróbio. A pressão parcial de hidrogênio foi o principal parâmetro. O aumento na pressão provocou um aumento na taxa de desnitrificação e no crescimento da biomassa, que são responsáveis pela oxidação do metano. RAJAPAKSE & SCUTT (1999), mantendo condições aeróbias e anaeróbias num sistema com células imobilizadas, concluíram que o gás metano pode ser usado como fonte de carbono no processo de desnitrificação.

ABUFAYED & SCHROEDER (1986) estudaram a desnitrificação usando como fontes de carbono dextrose, acetato e celulose carboxi-metil e demonstraram que, com o uso dos compostos orgânicos refratários (celulose carboxi-metil), a

relação C/N para a completa desnitrificação era várias vezes maior que a teórica, calculada estequiometricamente

HER & HUANG (1995), usando metanol, ácido acético, glicose e ácido benzóico como fontes de carbono, observaram que com o uso do metanol, a mínima relação C/N requerida para a desnitrificação quase completa (97-100%) foi 0,9 gC/g N-NO₃⁻ ou 0,6 gC/g N-NO₂⁻. Com o ácido acético, a mínima relação C/N requerida para a desnitrificação quase completa (97-99%) foi 1,9 gC/g N-NO₃⁻ ou 1,3 gC/g N-NO₂⁻. Os resultados experimentais para a desnitrificação com o uso da glicose como fonte de carbono foram similares aos resultados obtidos com o ácido acético. A menor relação C/N requerida para a desnitrificação quase completa (98-100%) foi 2,0 gC/gN-NO₃⁻ e 1,6 gC/gN-NO₂⁻. O uso do ácido benzóico forneceu dados similares aos obtidos com o metanol como fonte de carbono. A menor relação C/N requerida para a desnitrificação quase completa (92-97%) foi 3,0 gC/gN-NO₃⁻ ou 2,6 gC/gN-NO₂⁻. Os autores também verificaram que a velocidade de desnitrificação aumentou linearmente com o aumento da relação C/N para cada uma das fontes de carbono, mas para uma relação acima de 15, a atividade desnitrificante da biomassa cessou tanto com metanol, quanto com ácido benzóico, enquanto que com o uso das outras fontes a taxa manteve-se crescente.

Esses mesmos autores reportam que a quantidade de nitrogênio produzido variou de 71 a 89% com todas as fontes de carbono, além disso, o metano não foi detectado para até a relação gC/gN-NO₃⁻ de 0,9. No entanto, a produção de metano foi observada com a utilização de maiores relações, aumentando linearmente com o aumento da mesma. Resultados similares foram encontrados na desnitrificação com o ácido acético, glicose e ácido benzóico como fontes de carbono.

ISAACS & HENZE (1995) realizaram testes de desnitrificação com experimentos em batelada e em escala piloto, adicionando acetato e/ou sobrenadante de lodo hidrolisado (SLH) como fontes de carbono. Para os testes em batelada, foram utilizados frascos de vidro com volumes de 5 litros. Com acetato foi observado um grande aumento na taxa de desnitrificação, de acordo com o aumento da concentração de acetato adicionado. Esse aumento foi seguido por um retorno abrupto à taxa normal de desnitrificação, quando a concentração era excessiva. Com o uso do SLH, o sistema em batelada teve o mesmo comportamento, mas o retorno à

taxa de desnitrificação normal foi gradual e dependente da biodegradabilidade dos diferentes compostos existentes no SLH. O mesmo comportamento foi observado para os ensaios envolvendo a instalação em escala piloto. Os autores concluíram também que a adição de fonte externa de carbono pode ser uma importante variável de controle para os sistemas que empregam a remoção biológica de nitrogênio.

HENZE (1989)⁵ apud ISAAC & HENZE (1995) comparou as taxas de desnitrificação usando como fontes orgânicas de carbono o próprio esgoto, ácido acético e metanol. A taxa de desnitrificação com o uso do próprio esgoto foi cerca de três vezes menor que as taxas encontradas com o uso das outras fontes.

TAM *et al.* (1992), comparando acetato, metanol e glicose como fontes de carbono em processo de desnitrificação, observaram que o acetato conduziu a melhores resultados na taxa desnitrificação, seguido por metanol e glicose.

A desnitrificação de efluentes com grandes concentrações de nitrogênio usando acetato, glicose e lactose como fontes de carbono foi estudada por CUERVO-LÓPEZ *et al.* (1999), num sistema composto por um reator UASB. Os autores verificaram que a fonte de carbono e a taxa de carregamento de nitrogênio não influenciaram na sua eficiência de remoção (99% para todas as fontes), mas a velocidade de desnitrificação específica (VDE) foi influenciada por esses parâmetros. A menor VDE foi obtida com o usando-se a lactose a um carregamento de 500 mgN/L.dia, enquanto que para a mesma fonte, a VDE foi máxima a um carregamento de 2000 mgN/L.dia. De acordo com os mesmos autores, a VDE é o melhor parâmetro de representação do processo de desnitrificação em comparação com a taxa de consumo de nitrato, uma vez que a TDE se aproxima da produção de N₂.

KRISTENSEN & JØRGENSEN (1990), utilizando sobrenadante de lodo hidrolisado (SLH), obtido biologicamente, concluíram que as taxas de desnitrificação encontradas eram similares aos valores obtidos com acetato e que tanto o SLH obtido termicamente ou quimicamente produziam taxas de desnitrificação correspondentes à metade dos valores encontrados para o acetato.

---

⁵ HENZE, M. (1989). Carbon Sources for Denitrification Municipal Wastewater. *Tampere University*, 4-6 september, Tampere, Finland.

A acumulação de produtos intermediários na desnitrificação, notadamente nitrito, tem sido freqüentemente observada. HER & HUANG (1995) citam que vários pesquisadores têm focado principalmente os efeitos da temperatura, pH, concentração de nitrato e substâncias tóxicas. No entanto, os estudos sobre a influência dos tipos de fontes de carbono e das relações C/N têm sido escassos.

Portanto, o acúmulo indesejado de nitrito em sistemas de remoção de nitrogênio tem ocorrido devido às dificuldades de estabelecimento de parâmetros operacionais ideais e à falta de compreensão da interação que ocorre entre os fatores reguladores do processo (CALLADO, 2001).

BICKERS & VAN OOSTROM (2000), estudaram a desnitrificação de uma água residuária de matadouro, com alta concentração de nitrogênio, utilizando como fontes de carbono os próprios constituintes da água residuária. Os autores puderam concluir que a presença de matéria orgânica facilmente biodegradável tem grande influência no processo de desnitrificação e portanto deve ser considerada no projeto de sistemas com remoção de nitrogênio, pois o tempo requerido para a desnitrificação com a utilização deste tipo de matéria orgânica é menor, redundando em economia de espaço e/ou energia.

Um sistema Bardenpho modificado de cinco estágios, ou seja, zona anaeróbia, anóxica, aeróbia, anóxica e aeróbia, dispostas sequencialmente em escala piloto tratando água residuária do processo de fabricação de óleo de oliva, foi utilizado por TSONIS (1997) para verificar a aplicabilidade da própria água residuária como fonte de carbono na pós-desnitrificação anóxica. De acordo com o autor, a remoção efetiva de NO_3^- -N era alcançada para a relação DQO/N- NO_3^- variando de 4,6 a 5,4. Segundo o autor, a adição da fonte de carbono superior a 50 mg/L deteriorava a qualidade do efluente tratado, resultando em valores não aceitáveis de cor.

BORZACCONI *et al.* (1999) estudaram a desnitrificação em um sistema composto por um reator anaeróbio (UASB), um reator anóxico e um reator aeróbio (CBRAe) tratando lixiviado de aterro sanitário. As fontes de carbono utilizadas para a desnitrificação foram o próprio lixiviado, e o efluente do reator UASB. Para uma relação DQO/N- NO_3^- igual a 4, e taxas de carregamento variando de 0,4 a 1,0 gN- NO_3^- /L.d, o sistema apresentou remoções de DQO e NO_3^- de 82% e 87%,

respectivamente, com o uso do percolado. Com o uso do efluente do reator UASB como fonte de carbono e mantendo-se a mesma relação DQO/N-NO₃⁻, a taxas de carregamento entre 0,2 e 0,4 gN-NO₃⁻/L.d, houve um decréscimo de cerca de 60% na desnitrificação e de 30% a 70% na remoção de DQO. Segundo os autores, a desnitrificação alcançou maiores valores com o uso do lixiviado bruto devido à alta biodegradabilidade do seu conteúdo orgânico, comparado com o efluente do reator UASB.

NYBERG *et al.* (1996), utilizando o sistema de pré-precipitação e pós-desnitrificação numa instalação de lodos ativados, avaliaram durante três anos a aplicabilidade do metanol e do etanol como fontes de carbono. O sistema alcançou taxas de utilização específicas do nitrato de cerca de 10 mg N/g SSV.h, com o uso do etanol como fonte de carbono e cerca de 3 mg N/g SSV.h, com o uso do metanol. Quando o esgoto bruto foi utilizado as taxas de utilização encontradas foram menores. A partida do sistema obteve uma resposta direta com o uso de etanol, enquanto que com o uso de metanol, o período requerido para a adaptação do sistema foi maior.

Além dos vários estudos sobre as fontes de carbono que podem ser usadas como fontes de energia para as bactérias desnitrificantes, existe uma grande tendência para os sistemas que utilizam fonte interna. Para a aplicação desses sistemas devem ser observadas a concentração de carbono e a relação DQO/N-NO₃⁻. É importante que esses parâmetros sejam observados porque parte da DQO introduzida no sistema é oxidada pelo oxigênio, restando uma menor fração para a desnitrificação. Além disso, a taxa de desnitrificação é fortemente influenciada pela natureza da fonte de carbono, onde as mais altas taxas são obtidas com as formas mais facilmente biodegradáveis.

BATTISTONI & FAVA (1995) alcançaram remoção de N-NO_x e NTK-N da ordem de 65% num sistema para remoção biológica de nitrogênio. A fonte de carbono utilizada apresentava boa biodegradabilidade e era produzida no próprio sistema, através da hidrólise de substâncias complexas em tanque de equalização anóxico.

HER & HUANG (1995), estudando um sistema de lodos ativados em batelada para remoção de nitrogênio, verificaram eficiências de remoções de nitrato e

de nitrito de 9,2% e 17,8% respectivamente para a desnitrificação endógena. Além disso, concluíram que nessas condições, a desnitrificação aumenta com o aumento da relação $N-NO_2^-/N-NO_3^-$.

A adição controlada de matéria orgânica externa, para o processo que emprega fonte interna de carbono, pode servir como meio para melhorar a estabilidade e a flexibilidade do processo. Do ponto de vista de disponibilidade do carbono, uma compensação pode ser feita em períodos de baixas taxas de DQO/N na água residuária. Do ponto de vista da taxa de desnitrificação, uma compensação pode ser feita em períodos de baixa temperatura ou carregamentos mais altos de nitrogênio.

3.2.2.2 – Bactérias desnitrificantes

MOHSENI-BANDPI & ELLIOTT (1998) estudaram a remoção de nitrato em um disco biológico rotacional, em escala piloto, utilizando metanol, etanol e ácido acético como fontes de carbono para as bactérias desnitrificantes e verificaram que a espécie predominante foi a *Pseudomonas*. Nesse estudo, as *Pseudomonas* eram inicialmente identificadas pelas espécies *P. fluorescence*, *P. mendocina*, *P. picketti*, *P. mallie*, *P. cepacia* e *P. stutzeri*. As bactérias desnitrificantes dominantes identificadas eram diferentes para cada fonte de carbono sendo as espécies *P. fluorescence*, *P. mendocina*, *P. stutzeri* referentes a metanol, etanol, e ácido acético respectivamente. Segundo os autores, a análise microbiológica está de acordo com BLASZCZYK *et al.*, (1980) que verificaram a predominância das espécies *P. fluorescence*, *P. mendocina*, *P. stutzeri* usando metanol e etanol como fontes de carbono.

LEMMER *et al.* (1997) isolaram culturas puras de bactérias desnitrificantes e avaliaram a taxa de redução do nitrato com o uso de metanol e de etanol como fontes de carbono. Os autores relatam que diferentes gêneros e espécies apresentaram diferentes taxas, de acordo com o tipo de fonte de carbono. As bactérias do tipo *hydrogenophaga* spp., com o uso do metanol alcançaram uma menor taxa desnitrificação, se comparada à taxa obtida com acetato. Em contraste, as bactérias do gênero *Paracoccus* spp. mostraram-se mais eficientes com o uso de metanol como

fonte de carbono. A produção de NO_2^- foi maior tanto para um gênero quanto para outro, quando a fonte de carbono usada foi acetato.

De acordo com MARTIENSSEN & SCHÖPS (1996), a acumulação e a redução do nitrito estão significativamente correlacionadas com as alterações na comunidade microbiana. A presença de bactérias anaeróbias facultativas, que não utilizam nitrito como aceptor final de elétrons, determinam a eficiência do processo.

3.3 – Reator seqüencial em batelada aeróbio

O reator seqüencial em batelada é um sistema de lodos ativados de crescimento suspenso que difere do sistema convencional apenas pelo fato de que todas as etapas do processo ocorrem em apenas um reator. Utilizando um tanque único, esses processos e operações passam a ser simplesmente seqüências no tempo, e não em unidades separadas como ocorre nos processos convencionais de fluxo contínuo. O processo consiste de um reator de mistura, onde ocorrem todas as etapas do tratamento, através do estabelecimento de ciclos de operação com durações definidas. A massa biológica permanece no reator durante todos os ciclos, eliminando, dessa forma, a necessidade de decantadores separados e das elevatórias de recirculação de lodo (VON SPERLING, 1997).

Esse tipo de sistema de tratamento biológico, se comparado aos sistemas convencionais, apresenta as seguintes vantagens:

- Facilidade operacional;
- O reator funciona como tanque de equalização, durante a fase de enchimento;
- Não há necessidade da existência de um sistema de bombeamento;
- A biomassa permanece no reator quando há ocorrência de choques hidráulicos;
- Economia de energia durante a operação.

No entanto, apesar das inúmeras vantagens, esse sistema apresenta como desvantagens a necessidade de uma maior área de instalação, a ausência de parâmetros bem definidos para o seu projeto e a necessidade de equipamentos como misturadores, válvulas de controle e controladores de tempo e nível.

Segundo CALLADO (2001), as pesquisas acerca das tecnologias de tratamento indicam que, de acordo com o efluente a ser tratado e o padrão de

emissão exigido, a utilização dos sistemas compostos por reatores sequenciais em batelada aeróbios, anaeróbios ou combinados podem apresentar vantagens se comparados aos sistemas convencionais, principalmente no que tange ao controle do tratamento.

A operação do RSBA_e é bem simples e compreendida basicamente pelas fases de enchimento, reação, sedimentação, esvaziamento e repouso (opcional), operadas sequencialmente num mesmo reator, de forma que o sistema é alimentado apenas na fase de enchimento (LIN & CHENG, 2001). A Tabela 3.3 apresenta esses passos descritos por METCALF & EDDY (1991).

Tabela 3.3 – Seqüência operacional dos sistemas de lodo ativado em batelada

Etapas do ciclo de operação de um reator em batelada	
Etapa	Descrição
Enchimento	O propósito da operação de enchimento é adicionar substrato (água residuária bruta ou influente primário) ao reator. O processo de enchimento permite que o nível do líquido no reator se eleve de 25% da capacidade (até o final do esvaziamento) para 100%. Se controlado pelo tempo, o processo de enchimento normalmente dura aproximadamente 25% do tempo total do ciclo
Reação	O propósito da fase de reação é completar as reações que foram iniciadas durante o enchimento. Tipicamente, a fase de reação compreende cerca de 35% do tempo total do ciclo.
Sedimentação	O propósito da sedimentação é permitir que a separação dos sólidos ocorra, provendo um sobrenadante clarificado para ser descarregado como efluente. Em um sistema em batelada, esse processo normalmente é muito mais eficiente que em um sistema de fluxo contínuo porque, nessa fase, o conteúdo do reator está completamente estacionário.
Esvaziamento	O propósito do esvaziamento é remover a água tratada clarificada do reator. Muitos tipos de mecanismos de decantação estão em uso, sendo mais popular o de flutuação ou vertedor ajustável. O tempo para esvaziamento pode atingir de 5% a 30% do tempo do ciclo total (15 minutos a 2 horas), sendo 45 minutos um período típico para o esvaziamento.
Repouso	O propósito do repouso em um sistema sequencial é prover o tempo para um reator completar seu ciclo de esvaziamento antes de mudar para outra unidade. Pelo fato do repouso não ser uma fase necessária é omitido algumas vezes.

Fonte: METCALF & EDDY (1991)

A duração de cada ciclo é alterada em função das necessidades do tratamento e das características do esgoto e biomassa do sistema. O descarte do lodo excedente geralmente ocorre durante o ciclo de repouso, mas pode se dar em outras fases, visto que a fase de repouso apenas permite o ajuste entre os ciclos de operação. Segundo VON SPERLING (1997), a remoção biológica de nitrogênio pode ser alcançada através da incorporação de uma etapa anóxica após a etapa aeróbia. Nesse caso, tem-se a desnitrificação, realizada na ausência de oxigênio.

A aplicação de reatores seqüenciais em batelada tem sido alvo de grande interesse por parte de muitos pesquisadores. A crescente demanda por este tipo de tratamento tem conduzido esforços para o aprimoramento dessa tecnologia.

Um RSBA_e modificado foi proposto por LIN & CHENG (2001). A alimentação do reator era contínua durante todo o ciclo operacional e o que caracterizava o regime intermitente, eram os compartimentos, que funcionavam em batelada. Os autores avaliaram o desempenho desse tipo de reator comparado ao do reator em batelada convencional e concluíram que a eficiência de remoção alcançada com essa modificação foi compatível com as altas eficiências de tratamento dos sistemas de RSBA_e convencionais.

De acordo com MORGENTHAU *et al.* (1997), podem ser formados grânulos aeróbios nos sistemas de RSBA_e. Uma vantagem extra da formação de grânulos nesses reatores é que são requeridos menores tempos de sedimentação devido à alta sedimentabilidade dos grânulos, o que permite um maior aproveitamento do tempo de ciclo para o período de reação (BEUN *et al.*, 1998). Esses autores verificaram que a granulação aeróbia conduz a instalações de reatores RSBA_e mais compactos devido à grande sedimentabilidade do lodo e à alta atividade microbiana na biomassa.

3.4 - Reator seqüencial em batelada anaeróbio

O reator seqüencial em batelada anaeróbio (RSBA_n), assim como o reator seqüencial em batelada aeróbio, é capaz de efetuar a retenção de sólidos e a remoção de material orgânico numa mesma unidade de tratamento, sem a necessidade de um decantador secundário. Em geral, os RSBA_ns têm cinco períodos distintos de operação: enchimento, reação, sedimentação, descarte e repouso (TIMUR & ÖZTURK, 1999). As reações biológicas e a mistura têm início no período de

enchimento do reator. Durante esse período, a relação Alimento/Microrganismo (A/M) vai aumentando e chega ao valor mais alto no final do período, o que fornece um grande estímulo para a atividade metabólica e altas taxas globais de conversão do resíduo em biogás. Ao final da fase de reação, a concentração de substrato é mínima com baixas relações A/M, para floculação da biomassa (DAGUE et al., 1992). O período de repouso é o tempo compreendido entre o descarte do sobrenadante e a próxima alimentação do reator. DAGUE et al. (1992), relatam o princípio dos reatores anaeróbios em batelada, da seguinte forma:

- Etapa de enchimento: Envolve a adição do substrato no reator. O volume de enchimento é determinado baseado em vários fatores, incluindo o tempo de ciclo desejado, a carga orgânica e as características de sedimentabilidade esperada para o lodo.
- Etapa de reação: É a etapa de maior importância na conversão do substrato orgânico a biogás. O tempo requerido para essa etapa depende de alguns parâmetros, incluindo-se a composição e a concentração do substrato, a qualidade requerida para o afluentes, a concentração da biomassa e a temperatura do resíduo.
- Etapa de sedimentação: Nessa etapa a mistura é interrompida para que haja a separação da biomassa e o próprio reator desempenha o papel do decantador. O tempo requerido para a clarificação depende da sedimentabilidade da biomassa, mas tipicamente, varia na faixa de 10 minutos a 1 hora. Do ponto de vista operacional é essencial que ocorra a liberação eficiente de gás para que não haja expansão excessiva da manta de lodo, devido ao acúmulo de biogás dentro da biomassa sedimentada.
- Etapa de descarte: Ocorre quando existe uma condição satisfatória de separação dos sólidos. O tempo requerido para essa etapa depende do volume total tratado. O período de repouso pode ser desconsiderado.

NDON & DAGUE (1997), operando quatro reatores sequenciais anaeróbios em batelada (RSBA_n), em escala de laboratório, avaliaram os efeitos da temperatura e do tempo de detenção hidráulico no tratamento de uma água residuária com baixa concentração de DQO e verificaram que esse tipo de reator pode ser usado para temperaturas de até 15 °C, abaixo da qual o rendimento na remoção de DQO cai para

80%. Os reatores também foram testados a baixos ciclos operacionais e alcançaram boa eficiência de remoção.

3.5 – Potencial redox

A sequência de transformações que ocorrem no tratamento de esgotos é função do acceptor de elétrons e do estado de oxidação do composto, medido pelo seu potencial redox (VON SPERLING, 1996). O estado de oxidação do composto determina a quantidade de energia máxima disponível através dele (quanto mais reduzido, mais energia), calculada pela diferença entre o seu conteúdo energético e o conteúdo energético dos produtos finais da reação (GRADY e LIM, 1990).

O potencial redox (E_h) de uma solução depende dos agentes oxidantes e redutores presentes, medindo a tendência da solução em receber ou doar elétrons. O potencial redox é geralmente calculado de acordo com a equação:

$$E_h = E_h^0 + (RT) * \log(a_{ox} / a_{red}) \dots\dots\dots \text{eq.3.6}$$

Onde:

E_h = potencial redox medido

E_h^0 = potencial redox padrão, a 1 atm, 25⁰, e concentrações de 1 mol/L

R = constante universal dos gases

T = temperatura em graus Kelvin

n = número de elétrons envolvidos na reação redox

F = constante de Faraday

a_{ox} = atividade dos agentes oxidantes ([oxid.].f)

a_{red} = atividade dos agentes redutores ([red.].f)

f = coeficiente de atividade

Na equação 3.6, o valor de (a_{ox} / a_{red}) representa a constante de equilíbrio (K_f) das reações envolvidas, onde as concentrações molares dos reagentes e produtos encontram-se multiplicadas pelos seus respectivos coeficientes de atividade na solução. O valor do coeficiente de equilíbrio K, é um pouco diferente do valor

verdadeiro da constante de equilíbrio K_f , à mesma temperatura, mas para a maioria das finalidades o seu valor é suficientemente correto (QUAGLIANO, 1973).

É possível observar que quanto maior a concentração de agentes oxidantes presentes na água residuária, maior será o potencial redox. Dessa forma, o E_h pode ser usado como medida indireta da presença de oxigênio, mesmo quando as concentrações de oxigênio dissolvido são muito baixas para serem medidas diretamente pelos medidores de OD convencionais (LIE & WELANDER, 1994). De forma análoga, podemos relacionar o E_h com a matéria orgânica presente no meio.

WASIAK-WOUTERS *et al.* (1994), monitorando o processo de nitrificação em escala real através de sondas de E_h e OD, verificou, ao fim do processo de nitrificação, uma diminuição na atividade respiratória. Essa ocorrência é provavelmente devida à diminuição da atividade microbiana em função do consumo de amônia.

Segundo HAAS & POLPRASERT (1993), a presença de altas concentrações de sulfato exerce inibição sobre a metanogênese, devido, provavelmente, a elevação do potencial redox no reator.

YU e BISHOP (2001) estudaram a estratificação e a variação do potencial redox num biofilme aeróbio e redutor de sulfato, usando micro-eletrodos. Os autores puderam verificar que, durante oxidação aeróbia, o potencial redox permaneceu na faixa positiva, em torno de +362 mV, na superfície do biofilme. Na redução de sulfato, o potencial redox atingiu -166 mV na parte interna do biofilme. Esse decréscimo no potencial redox da parte externa para a interna, implica que podem ser claramente definidas estratificações no biofilme entre os diferentes processos microbianos.

A Figura 3.2 apresenta a sequência de transformações nos processos que ocorrem no tratamento dos esgotos, em função do aceptor de elétrons e do potencial redox de acordo com VON SPERLING (1996):

Fonte: VON SPERLING (1996)

Figura 3.2 – Sequência de transformações nos processos que ocorrem no tratamento de esgotos

Da esquerda para a direita temos os processos de oxidação do carbono orgânico, nitrificação, desnitrificação, dissulfatação, acidogênese/acetogênese e metanogênese.

4 – MATERIAL E MÉTODOS

4.1 – Considerações iniciais

Para a realização desta pesquisa, foi utilizada uma instalação experimental que fez parte, anteriormente, do trabalho de doutorado intitulado “*Reatores Sequenciais em Batelada em Sistema Anaeróbio / Aeróbio Tratando Esgoto Sanitário Sintético e com Remoção de Nutrientes*” desenvolvido por CALLADO (2001). A instalação experimental foi devidamente adaptada de acordo com os propósitos desta pesquisa. O desenvolvimento deste trabalho foi dividido em sete fases distintas, a primeira referente à adaptação do lodo ao novo sistema e cada uma das restantes, referente ao tipo de matéria orgânica usada para a remoção biológica de nitrogênio através dos processos de nitrificação e desnitrificação.

4.2 – Descrição da instalação experimental

A instalação experimental era constituída basicamente de dois reatores em batelada, em escala de laboratório (bancada), sendo um aeróbio (RSBAe) seguido por um anaeróbio (RSBAn). Os dois reatores tinham seção circular em acrílico transparente, para permitir a visualização de seu interior e, dessa forma, facilitar a operação, diâmetro de 0,145 m e altura de 1,0 m, resultando em volume total de 16,5 L, com volume útil de 13,5 L, dos quais 9,0 L era ocupado pelo sobrenadante e 4,5 L pelo lodo. Ao longo da altura dos dois reatores existiam 5 pontos, dispostos a 15 cm um do outro, para coleta de amostras, entrada de esgoto bruto e saída de esgoto tratado, como mostrado esquematicamente na Figura 4.1.

Figura 4.1 – Esquema dos reatores seqüenciais em batelada

A entrada do afluente foi realizada pelo ponto 1, localizado a 3 cm do fundo e a saída do efluente, pelo ponto 3. O ponto 2 foi utilizado para retirada de amostras de lodo e o ponto 5 para amostragem do sobrenadante. No reator anaeróbio, o ponto 5 também foi utilizado para a introdução dos substratos usados como fonte externa de carbono para o processo de desnitrificação, e no ponto 3 foram feitas as medições do potencial redox “in loco”, com o auxílio de uma sonda acoplada ao reator. O ponto 4 foi inutilizado nos dois reatores.

Além dos dois reatores seqüenciais em batelada, a instalação experimental ainda era composta por um reservatório de esgoto sintético, um reservatório para esgotamento do efluente do reator anaeróbio, sistema de deslocamento líquido para medição do volume de gás produzido, um balão de borracha para armazenamento de gás para recirculação e esgotamento do reator, soprador de ar (bomba de aquário) para o reator aeróbio, uma bomba (de aquário) para recirculação do gás armazenado no balão com o objetivo de promover a mistura no reator anaeróbio, um medidor de potencial redox, um microcomputador e um sistema de controle de temperatura.

A agitação no interior do RSBA foi feita com o uso de uma bomba que recirculava o gás existente no topo do reator, através de um tubo de PVC com 15 mm

de diâmetro, com a extremidade superior ligada à bomba e a outra extremidade situada junto ao fundo do reator, ligada a um difusor. A saída de gás do RSBA_n era localizada na parte superior do reator e constituía-se de uma mangueira de silicone ligada ao balão de acumulação, com capacidade para 8 L e ao sistema de medição do gás produzido. A saída do balão de borracha era aberta para o esvaziamento e o enchimento do reator, permanecendo fechada durante todo o tempo restante de ciclo. A saída para o sistema de medição de gás, fechada durante o enchimento e o esvaziamento, permanecia aberta durante o restante do ciclo.

Os sistemas de medição de gás por deslocamento líquido são utilizados apenas quando há produção de pequenos volumes de gás e funciona da seguinte forma: o gás produzido nos reatores desloca o líquido contido num recipiente, cujo volume deslocado corresponde à quantidade de gás produzido. Esse volume era medido com o auxílio de uma proveta.

O reator aeróbio de batelada (RSBA_e) era aerado/agitado utilizando-se um soprador de ar (de aquário), localizado no topo do reator, conectado por meio de uma mangueira de silicone a uma pedra porosa localizada no fundo do reator. A saída do gás produzido ocorria através de uma abertura circular situada na parte superior do reator.

A operação dos reatores foi dividida em sete fases, a primeira, relativa à partida do sistema e as demais correspondem aos diferentes tipos de substratos adicionados ao reator anaeróbio, como fontes de carbono para o processo de desnitrificação. Quatro fontes de carbono eram composições do esgoto sintético e as outras, metanol e etanol, como mostrado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Diferentes substratos adicionados ao reator anaeróbio como fonte de carbono, relativos às diferentes fases de operação.

Fração Orgânica	Porcentagem de DQO					
	Fase 2	Fase 3	Fase 4	Fase 5	Fase 6	Fase 7
Proteínas	50	70	15	15	*	*
Carboidratos	40	15	70	15	*	*
Lipídeos	10	15	15	70	*	*
Etanol	*	*	*	*	100	*
Metanol	*	*	*	*	*	100

As Figuras 4.2 e 4.3 apresentam, respectivamente, uma fotografia e um esquema detalhado da instalação experimental utilizada em todas as fases do trabalho.

Figura 4.2 – Instalação experimental utilizada em todas as fases do trabalho

Figura 4.3 – Detalhes da instalação experimental utilizada em todas as fases do trabalho

Legenda: (1) – Reservatórios, (2) – RSBAa, (3) – RSBAe, (4) – Soprador de ar (bomba de aquário), (5) – Saída de gás, (6) – Balão de borracha, (7) – Controle de temperatura, (8) – Sistema para medição de gás, (9) – Pedra porosa, (10) – Sonda de potencial redox, (11) – Difusor de ar, (A) – Afluente, (E) – Efluente, (L) – Descarte de lodo, (Am) – Pontos de amostragem.

4.3 – Substrato sintético

O sistema foi alimentado diariamente por 9,0 litros de substrato sintético com composição similar à de esgoto sanitário, preparado de acordo com a composição e procedimentos descritos por TORRES (1992), para uma DQO de aproximadamente 580 mg/L. A Tabela 4.2 apresenta a composição do substrato sintético simulando esgoto sanitário doméstico em termos das porcentagens de proteínas, carboidratos e lipídeos.

Tabela 4.2 – Composição do Substrato Sintético expressa em porcentagem de DQO

Fração orgânica	Porcentagem de DQO	Compostos Orgânicos
Proteínas	50%	Extrato de carne
Carboidratos	40%	Sacarose 20%
		Amido Comercial 60%
		Celulose 20%
Lípideos	10%	Óleo de Soja

Fonte: TORRES (1992)

A composição do substrato, além dos constituintes orgânicos inclui também soluções de sais minerais, de acordo com a Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Concentrações das soluções de sais minerais do substrato sintético

Sais Minerais	Concentração na solução estoque (g /L)	Volume da solução estoque por litro de esgoto sintético (mL)
NaCl	50,0	5,0
MgCl ₂ . 6H ₂ O	1,4	
CaCl ₂ . 2H ₂ O	0,9	

Fonte: TORRES (1992)

As concentrações em massa, de cada constituinte foram calculadas estequiometricamente, a partir dos valores de DQO encontradas nas soluções preparadas, de acordo com o STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER (1995), com a composição apresentada na Tabela 4.4 para uma DQO em torno de 580 mg/L. Além desses compostos, era também adicionado ao substrato sintético, bicarbonato de sódio na concentração de 200 mg/L, visando a manutenção do pH nos reatores durante a realização da pesquisa e 25 mg/L de uréia para o aumento da concentração de nitrogênio no afluente.

Tabela 4.4 – Concentração dos constituintes do substrato sintético simulando esgoto sanitário para uma DQO teórica de 580 mg/L.

Constituinte		Concentração	Observações
Proteínas	Extrato de carne	208 mg/L	-
	Sacarose	36,0 mg/L	-
Carboidratos	Amido comercial	112,0 mg/L	Dissolvida por fervura durante 5 minutos
	Celulose	41,0 mg/L	-
Lipídeos	Óleo de soja	0,056 mL/L	Emulsionado com 3 gotas de detergente/L
	Sais minerais	5,0 mL/L	Solução estoque

Fonte: TORRES (1992)

O substrato sintético era preparado diariamente em baldes plásticos, à temperatura ambiente, utilizando-se água do sistema de abastecimento, em volume suficiente para alimentar o sistema durante 24 horas. As entradas e saídas do esgoto sintético eram automatizadas, controladas por computador. O reator aeróbio era alimentado com o substrato sintético descrito e o reator anaeróbio era alimentado com o efluente do reator aeróbio. As fontes de carbono testadas foram adicionadas ao reator anaeróbio, para o estudo do processo de desnitrificação.

4.4 – Fontes de carbono introduzidas no reator anaeróbio para o estudo do processo de desnitrificação

Todas as fontes de carbono eram preparadas em um béquer de 1 L. A concentração esperada para as fontes de carbono era de 5800 mg/L, visando-se o estabelecimento das relações DQO/N-NO₃ no reator anaeróbio com a utilização do menor volume de fonte externa, minimizando-se desta forma, a influência deste volume no volume total tratado. As alíquotas necessárias para o estabelecimento das relações DQO/N-NO₃ eram calculadas de acordo com a equação 4.2.

4.4.1 – Fonte 1 – Próprio substrato

O substrato sintético usado como Fonte 1 de carbono na 2ª fase do trabalho foi o mesmo descrito anteriormente no item 4.2 em uma concentração 10 vezes maior, como mostrado na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Concentração dos constituintes do substrato sintético simulando esgoto sanitário para uma DQO teórica de 5800 mg/L.

Constituinte		Concentração	Observações
Proteínas	Extrato de carne	2,08 g/L	-
	Sacarose	0,36 g/L	-
Carboidratos	Amido comercial	1,12 g/L	Dissolvida por fervura durante 5 minutos
	Celulose	0,41 g/L	-
Lipídeos	Óleo de soja	0,56 mL/L	Emulsionado com 30 gotas de detergente/L
Sais minerais		50,0 mL/L	Solução estoque

4.4.2 – Fonte 2 - Composição do substrato sintético com 70% de proteínas, 15% de carboidratos e 15% de lipídeos

A Fonte 2 de carbono usada na 3ª fase do trabalho experimental foi composta dos mesmos constituintes do substrato sintético afluente ao sistema, mas com concentrações de proteínas, carboidratos e lipídeos diferentes, em termos de porcentagens de DQO, como mostrado na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Composição da Fonte 2 de carbono em termos de % de DQO

Fração orgânica	Porcentagem de DQO	Compostos Orgânicos	
Proteínas	70%	Extrato de carne	
Carboidratos	15%	Sacarose	20%
		Amido Comercial	60%
		Celulose	20%
Lipídeos	15%	Óleo de Soja	

A composição da Fonte 2 de carbono, além dos constituintes orgânicos inclui também soluções de sais minerais de acordo com a Tabela 4.3 do item 4.3 e 2,0 g/L de bicarbonato de sódio. As concentrações em massa, de cada constituinte foram calculadas estequiometricamente a partir dos valores de DQO encontradas nas soluções preparadas, de acordo com o STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER (1995). A Tabela 4.7 apresenta a composição da Fonte 2 de carbono para uma DQO teórica em torno de 5800 mg/L.

Tabela 4.7 – Concentração dos constituintes da Fonte 2 de carbono para uma DQO teórica de 5800 mg/L.

Constituinte		Concentração	Observações
Proteínas	Extrato de carne	2,912 g/L	-
	Sacarose	0,135 g/L	-
Carboidratos	Amido comercial	0,42 g/L	Dissolvida por fervura durante 5 minutos
	Celulose	0,154 g/L	-
Lipídeos	Óleo de soja	0,84 mL/L	Emulsionado com 45 gotas de detergente/L
Sais minerais		50,0 mL/L	Solução estoque

4.4.3 – Fonte 3 – Composição do substrato sintético com 15% de proteínas, 70% de carboidratos e 15% de lipídeos

A Fonte 3 de carbono usada na 4ª fase do trabalho experimental, com os mesmos constituintes do substrato sintético afluyente ao sistema mas com diferentes concentrações de proteínas, carboidratos e lipídeos, em termos de porcentagens de DQO, como mostrado na Tabela 4.8.

Tabela 4.8– Composição da Fonte 3 de carbono em termos de % de DQO

Fração orgânica	Porcentagem de DQO	Compostos Orgânicos	
Proteínas	15%	Extrato de carne	
Carboidratos	70%	Sacarose	20%
		Amido Comercial	60%
		Celulose	20%
Lipídeos	15%	Óleo de Soja	

A composição da Fonte 3 de carbono, além dos constituintes orgânicos inclui também soluções de sais minerais de acordo com a Tabela 4.3 do item 4.3 e 2,0 g/L de bicarbonato de sódio. As concentrações em massa, de cada constituinte foram calculadas estequiometricamente a partir dos valores de DQO encontradas nas soluções preparadas, de acordo com o STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER (1995). A Tabela 4.9 apresenta a composição da Fonte 3 de carbono para uma DQO teórica em torno de 5800 mg/L.

Tabela 4.9 – Concentração dos constituintes da Fonte 3 de carbono para uma DQO teórica de 5800 mg/L.

Constituinte		Concentração	Observações
Proteínas	Extrato de carne	0,624 g/L	-
	Sacarose	0,63 g/L	-
Carboidratos	Amido comercial	1,96 g/L	Dissolvida por fervura durante 5 minutos
	Celulose	0,7175 g/L	-
Lipídeos	Óleo de soja	0,84 mL/L	Emulsionado com 45 gotas de detergente/L
Sais minerais		50,0 mL/L	Solução estoque

4.4.4 – Fonte 4 – Composição do substrato sintético com 15% de proteínas, de 15% carboidratos e 70% de lipídeos

A Fonte 4 de carbono usada na 5ª fase do trabalho experimental, com os mesmos constituintes do substrato sintético afluente ao sistema mas com diferentes concentrações de proteínas carboidratos e lipídeos em termos de porcentagens de DQO, como mostrado na Tabela 4.10.

Tabela 4.10– Composição da Fonte 4 de carbono em termos de % de DQO

Fração orgânica	Porcentagem de DQO	Compostos Orgânicos	
Proteínas	15%	Extrato de carne	
		Sacarose	20%
Carboidratos	15%	Amido Comercial	60%
		Celulose	20%
Lipídeos	70%	Óleo de Soja	

A composição da Fonte 4 de carbono, além dos constituintes orgânicos incluiu também soluções de sais minerais de acordo com a Tabela 4.3 do item 4.3 e 2,0 g/L de bicarbonato de sódio. As concentrações em massa, de cada constituinte

foram calculadas estequiometricamente a partir dos valores de DQO encontradas nas soluções preparadas, de acordo com o STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER (1995). A Tabela 4.11 apresenta a composição da Fonte 4 de carbono para uma DQO teórica em torno de 5800 mg/L.

Tabela 4.11 – Concentração dos constituintes da Fonte 4 de carbono para uma DQO teórica de 5800 mg/L.

Constituinte		Concentração	Observações
Proteínas	Extrato de carne	0,624 g/L	-
	Sacarose	0,135 g/L	-
Carboidratos	Amido comercial	0,42 g/L	Dissolvida por fervura durante 5 minutos
	Celulose	0,154 g/L	-
Lipídeos	Óleo de soja	3,92 mL/L	Emulsionado com 100 gotas de detergente/L
Sais minerais		50,0 mL/L	Solução estoque

O volume de detergente adotado (100 gotas) usado para emulsionar o óleo de soja foi menor que o volume calculado (210 gotas), pois o detergente, também fonte de carbono, estava aumentando muito a DQO. O volume de detergente foi diminuído gradativamente até o valor mínimo, que abaixo do qual parcela do óleo não seria totalmente emulsionado.

4.4.5 – Fonte 5 – Metanol

A Fonte 5 de carbono usada na 6ª fase do trabalho experimental foi metanol. Como feito com todas as fontes de carbono, foi preparado 1 L de solução de metanol, com concentração em termos de DQO em torno de 5800 mg/L.

4.4.6 – Fonte 6 – Etanol

A Fonte 6 de carbono usada na 7ª fase do trabalho experimental foi etanol. O procedimento para preparo da solução de etanol, foi o mesmo descrito para a Fonte 5 de carbono.

4.5 - Procedimento operacional das unidades de tratamento

O ciclo operacional dos reatores seqüenciais, tempo de enchimento (volume afluente de cada unidade), tempo de reação (agitação intermitente/contínua), sedimentação e descarga do sobrenadante foram controlados por um equipamento eletrônico programado por microcomputador. A duração mínima do ciclo (T_{min}) dos reatores seqüenciais de batelada foi o somatório do tempo de enchimento (t_e), tempo de reação (t_r), tempo de sedimentação (t_s) e tempo de descarte (t_d), como mostrado na equação 4.1:

$$T_{min.} = t_e + t_r + t_s + t_d \quad \text{.....eq. 4.1}$$

Passados alguns minutos após o enchimento do RSBAe o soprador de ar era acionado, e, através de um difusor (pedra porosa) localizado no fundo do reator, o ar era uniformemente distribuído, aerando e proporcionando o contato da biomassa com a massa líquida durante todo o período de reação. Após esse período, o sistema de aeração era desligado e dado início ao período de sedimentação do lodo, resultando então, em efluente clarificado. Após o período de sedimentação era feito o descarte do sobrenadante tratado. Como os RSBAe e RSBA_n eram dispostos seqüencialmente, o período de descarte do RSBAe era idêntico ao de enchimento do RSBA_n, cujo afluente era o efluente do RSBAe. Após o descarte do sobrenadante do RSBAe era iniciado um novo período de enchimento com o substrato sintético e portanto, um novo ciclo operacional.

Terminado seu período de esvaziamento, o RSBA_n começava a receber o efluente do RSBAe. Ao fim do período de enchimento, caracterizando o início do período de reação, era adicionada, manualmente, ao reator, a fonte de carbono a ser estudada para o processo de desnitrificação. Imediatamente era acionado o sistema

de recirculação de gás que promovia a mistura no interior do reator durante dois minutos, a cada vinte minutos, durante todo o período de reação. Ao final desse período iniciava-se a sedimentação do lodo e posterior descarte do sobrenadante. Com isso, era iniciado o período de enchimento com o efluente do RSBAe, dando início a um novo ciclo operacional. Todas as operações de enchimento, esvaziamento, mistura e aeração realizadas no sistema eram controladas por um microcomputador que acionava e interrompia o funcionamento das bombas e válvulas solenóides instaladas junto aos reatores, como mostrado na Figura 4.4.

Figura 4.4 – Controle operacional do sistema de tratamento

Legenda : (1)-válvula solenóide, (2)-válvula solenóide, (3)-bomba de aquário para mistura/ aeração, (4)-bomba de aquário para mistura/recirculação de gás, (5)-válvula solenóide.

Foi utilizado, para o controle operacional do sistema de tratamento, um microcomputador 386, com placa de aquisição de dados para controle de uma placa de interface entre os dados programados e as válvulas e bombas. O programa foi desenvolvido em linguagem “visual basic” versão 5.1 2000, em ambiente windows, através do qual eram feitas as combinações de tempos de enchimento, reação,

mistura e esvaziamento do reator, com grande facilidade. A placa de aquisição de dados instalada no microcomputador era do modelo AQB10/12, com 12 bits para barramento ISA, responsável pelo funcionamento do sistema. CALLADO (2001), em seu trabalho de doutorado, fez uma descrição mais detalhada desse sistema operacional.

4.6 – Desenvolvimento do trabalho experimental

O trabalho experimental foi realizado utilizando-se dois reatores sequenciais em batelada, um aeróbio e o outro anaeróbio. O substrato sintético era encaminhado ao reator aeróbio, que após um ciclo completo era encaminhado ao reator anaeróbio, sendo posteriormente descartado em um reservatório de coleta do efluente. O funcionamento dos reatores sequenciais em batelada compreendia quatro períodos, como mostrado na Figura 4.5, e era controlado por equipamentos eletrônicos programados de acordo com a situação desejada.

Figura 4.5 – Períodos do funcionamento dos reatores sequenciais em batelada

4.6.1 – Fases do trabalho experimental

Em todas as fases do trabalho experimental foram usados dois reatores, um aeróbio e um anaeróbio, dispostos sequencialmente. O reator aeróbio (RSBAe), que tinha como afluente o substrato sintético, era responsável pela remoção da matéria carbonácea, amonificação, nitrificação e nitratação. O reator anaeróbio (RSBAn), alimentado pelo efluente do reator aeróbio, era responsável apenas pela

desnitrificação, recebendo para isso, uma fonte externa de carbono. Portanto, o sistema funcionava na seguinte sequência dos processos: remoção de matéria carbonácea/nitrificação/desnitrificação.

A desnitrificação foi estudada com o emprego de seis fontes de carbono distintas. Quatro delas corresponderam a diferentes composições do substrato sintético em termos de proteínas, carboidratos e lipídeos. As outras duas foram metanol e etanol como descrito no item 4.3. Para as fontes de carbono compostas de proteínas, carboidratos e lipídeos, o processo de desnitrificação foi avaliado sob as relações de DQO/N-NO₃⁻ iguais a 0, 2, 5, 10 e 14. Para o etanol e o metanol, o processo de desnitrificação foi analisado apenas sob a relação DQO/N-NO₃⁻ igual a 14. Cada fonte de carbono era preparada diariamente, com uma DQO_B média de 5800 mg/L, à temperatura ambiente, de forma a garantir todas as condições de DQO/N-NO₃⁻ pré-estabelecidas. A introdução das fontes de carbono no reator anaeróbio era realizada manualmente, através de uma mangueira de silicone ligada ao ponto 5 do reator, mostrado na Figura 4.1. A mangueira de silicone era dotada de um funil na sua extremidade livre para facilitar a introdução da fonte de carbono.

A relação DQO/N-NO₃⁻ desejada no reator anaeróbio era conseguida da seguinte forma:

- As concentrações de nitrato afluente ao reator e a DQO da fonte de carbono, determinadas em laboratório no dia anterior, eram usadas no dia seguinte. O volume tratado diariamente era fixo em 9,0 L.
- Dessa forma o volume da fonte de carbono, necessário para satisfazer a relação DQO/N-NO₃⁻ desejada no reator anaeróbio, era calculado de acordo com a seguinte equação:

$$V_{\text{fonte}} = \frac{N - NO_3^- \times \left(\frac{DQO}{N - NO_3^-} \right)}{DQO} \times 9 \dots\dots\dots \text{eq.4.2}$$

Onde: N-NO₃⁻ = Concentração de nitrato afluente ao reator anaeróbio em mg/L.

DQO/N-NO₃⁻ = Valor adimensional pré-estabelecido

DQO = DQO da fonte de carbono em mg/L

V_{fonte} = Volume da fonte preparada preliminarmente necessário para satisfazer a condição pré-estabelecida, em L.

- Fase 1 – Adaptação do lodo e partida do sistema

O lodo do reator aeróbio e o lodo do reator anaeróbio utilizados nesta pesquisa foram os mesmos utilizados no trabalho de doutorado intitulado “*Reatores Sequenciais em Batelada em Sistema Anaeróbio / Aeróbio Tratando Esgoto Sanitário Sintético e com Remoção de Nutrientes*” desenvolvido por CALLADO (2001), visto que se tratava de um sistema que promovia a remoção de nutrientes com o uso da mesma instalação experimental. A adaptação dos lodos à nova configuração do sistema foi realizada nos próprios reatores, com os mesmos parâmetros operacionais utilizados em todo o trabalho. Nessa fase, todo o sistema foi controlado com a ajuda de um micro-computador. Foram testados ciclos de 12 e de 24 horas, como mostrado na Tabela 4.12 e 4.13, respectivamente.

Tabela 4.12 – Ciclo operacional do sistema, com duração de 12 horas, estudado na partida do sistema

RSBAe		
Período	Duração do período	Duração do período (%)
Enchimento	14 min / 0,23 h	1,94
Reação	661 min / 11,02 h	91,80
Agitação/mistura	contínua	
Sedimentação	30 min / 0,5 h	2,50
Descarga	15 min / 0,25 h	4,16
Total	720 min / 12 h	100

RSBAn		
Período	Duração do período	Duração do período (%)
Enchimento	15 min / 0,25 h	2,08
Reação	637 min / 10,61 h	88,47
Agitação/mistura	2 min a cada 20 min	
Sedimentação	58 min / 0,97 h	8,06
Descarga	10 min / 0,17 h	1,39
Total	720 min / 12 h	100

Tabela 4.13 – Ciclo operacional do sistema, com duração de 24 horas, estudado na partida do sistema

Reator RSBAe		
Período	Duração do período (minutos)	Duração do período (%)
Enchimento	14 min / 0,23 h	0,97
Reação	1381 min / 23,02 h contínua	95,9
Sedimentação	30 min / 0,5 h	2,08
Descarga	15 min / 0,25 h	1,05
Total	1440 min / 24 h	100

Reator RSBA_n		
Período	Duração do período	Duração do período (%)
Enchimento	15 min / 0,25 h	1,05
Reação	1357 min / 22,61 h	94,24
Agitação/mistura	2 min a cada 20 min	
Sedimentação	58 min / 0,97 h	4,02
Descarga	10 min / 0,17 h	0,69
Total	1440 min / 24 h	100

Fase 2 – Estudo da desnitrificação usando a fonte de carbono composta por 50% de proteínas, 40% de carboidratos e 10% de lipídeos.

Nessa fase, para realizar-se o estudo da desnitrificação, foi introduzido no reator anaeróbio a Fonte 1 de carbono, correspondente ao próprio substrato sintético. Para essa fonte de carbono, além das relações DQO / N-NO₃⁻ descritas no item 4.6.1, foram também estudadas as relações de 0,5 e 1,0, que, de acordo com os resultados obtidos, não se fez necessário para as outras fontes de carbono.

Nessa fase, todo o sistema foi controlado com a ajuda de um micro-computador. A sequência operacional do sistema era RSBAe/RSBA_n, resultando nos

processos de remoção de matéria orgânica através da nitrificação no RSBAe e da desnitrificação no reator RSBA_n.

O ciclo operacional foi de 24 horas tanto para o reator aeróbio (RSBAe) quanto para o reator anaeróbio (RSBA_n) e a fonte de carbono foi introduzida no reator anaeróbio após o período de enchimento do reator, no início do período de reação, como mostrado na Tabela 4.14

Tabela 4.14 – Ciclo operacional do sistema, com duração de 24 horas, usado na Fase 2 do trabalho

Reator RSBAe		
Período	Duração do período (minutos)	Duração do período (%)
Enchimento	14 min / 0,23 h	0,97
Reação	1381 min / 23,02 h contínua	95,9
Sedimentação	30 min / 0,5 h	2,08
Descarga	15 min / 0,25 h	1,05
Total	1440 min / 24 h	100

Reator RSBA_n		
Período	Duração do período	Duração do período (%)
Enchimento	15 min / 0,25 h	1,05
Reação	1357 min / 22,61 h	94,24
Agitação/mistura	2 min a cada 20 min	
Fonte de carbono	Próprio substrato	
Sedimentação	58 min / 0,97 h	4,02
Descarga	10 min / 0,17 h	0,69
Total	1440 min / 24 h	100

- Fase 3 – Estudo da desnitrificação usando a fonte de carbono composta por 70% de proteínas, 15% de carboidratos e 15% de lipídeos.

Nesta fase, para realizar-se o estudo da desnitrificação, foi introduzido no reator anaeróbio a Fonte 2 de carbono, que correspondeu a uma composição do substrato sintético na proporção de 70% de proteínas, 15% de carboidratos e 15% de lipídeos. Para essa fonte de carbono foram estudadas as relações de DQO / N-NO_3^- iguais a 2, 5, 10 e 14. Todo o sistema foi controlado com a ajuda de um micro-computador com um ciclo operacional de 24 horas, tanto para o reator aeróbio (RSBAe), quanto para o reator anaeróbio (RSBAn) sendo que a fonte de carbono introduzida no reator anaeróbio após o período de enchimento do reator, no início do período de reação, como mostrado na Tabela 4.15.

Tabela 4.15 – Ciclo operacional do sistema, com duração de 24 horas, usado na Fase 3 do trabalho

Reator RSBAe		
Período	Duração do período (minutos)	Duração do período (%)
Enchimento	14 min / 0,23 h	0,97
Reação	1381 min / 23,02 h contínua	95,9
Sedimentação	30 min / 0,5 h	2,08
Descarga	15 min / 0,25 h	1,05
Total	1440 min / 24 h	100

Reator RSBA n		
Período	Duração do período	Duração do período (%)
Enchimento	15 min / 0,25 h	1,05
Reação	1357 min / 22,61 h	94,24
Agitação/mistura	2 min a cada 20 min	
Fonte de carbono	P=70% C=15% L=15%	
Sedimentação	58 min / 0,97 h	4,02
Descarga	10 min / 0,17 h	0,69
Total	1440 min / 24 h	100

- Fase 4 – Estudo da desnitrificação usando a fonte de carbono composta por 15% de Proteínas, 70% de carboidratos e 15% de lipídeos.

Nessa fase, para realizar-se o estudo da desnitrificação, foi introduzido no reator anaeróbio a Fonte 3 de carbono, que correspondeu a uma composição do substrato sintético na proporção de 15% de proteínas, 70% de carboidratos e 15% de lipídeos. A configuração do sistema, o ciclo operacional e a metodologia foram os mesmos descritos na Fase 3 deste trabalho, diferindo apenas pelo uso de uma nova fonte de carbono para o estudo do processo de desnitrificação no reator anaeróbio.

- Fase 5 – Estudo da desnitrificação usando a fonte de carbono composta por 15% de proteínas, 15% de carboidratos e 70% de lipídeos.

Nessa fase, todo o sistema foi operado como descrito na fase 3, diferindo apenas pela fonte de carbono utilizada para a desnitrificação. A fonte de carbono utilizada nessa fase foi uma composição do substrato sintético contendo 15% de proteínas, 15% de carboidratos e 70% de lipídeos.

- Fase 6 – Estudo da desnitrificação usando etanol como fonte de carbono

Nessa fase, foi usado o metanol como fonte de carbono, adicionado ao reator anaeróbio para o estudo do processo de desnitrificação. O sistema foi operado como descrito na Fase 3, no entanto apenas a relação $DQO / N-NO_3^- = 14$ foi avaliada no estudo da desnitrificação.

- Fase 7 – Estudo da desnitrificação usando etanol como fonte de carbono

Nessa fase, foi usado o etanol como fonte de carbono, adicionado ao reator anaeróbio para o estudo do processo de desnitrificação. O sistema foi operado como descrito na Fase 3, mas assim como na Fase 6, apenas a relação $DQO / N-NO_3^- = 14$ foi avaliada no estudo da desnitrificação.

4.7 – Monitoramento do sistema

4.7.1 – Amostragem

As amostras de rotina da massa líquida envolveram coletas dos afluentes e efluentes dos reatores aeróbio e anaeróbio. As coletas de amostras afluentes aos reatores eram feitas por uma conexão ligada à mangueira de acesso ao ponto 1 (Fig. 4.1) e as amostragens efluentes eram feitas por uma conexão ligada à mangueira de acesso ao ponto 3 (Fig.4.1). Para análise de gás eram coletadas amostras na mangueira de borracha que ligava a tubulação de PVC de saída de gás ao tanque de armazenamento individual do reator anaeróbio, com o auxílio de uma seringa. A coleta de amostra de lodo era efetuada no ponto 2 quando o lodo em excesso era descartado.

4.7.2 – Parâmetros, métodos e frequência das análises

Para analisar, avaliar e controlar o desempenho dos sistemas, foram feitos acompanhamentos do substrato, e, de cada reator, para um ciclo completo. A Tabela 4.16 apresenta os parâmetros de monitoramento do sistema, os respectivos métodos de determinação e a frequência de análise.

Tabela 4.16 – Parâmetros analisados, métodos e frequência das análises.

Parâmetro Analisado	Método utilizado	Frequência da Análise	
		RSRA _P	RSRA _N
PH (unidade)	Potenciométrico	2 / ciclo	2 / ciclo
Alcal. (mgCaCO ₃ .L ⁻¹)	Titulométrico	2 / ciclo	2 / ciclo
Ac. Vol. (mg HAc .L ⁻¹)	Titulométrico	2 / ciclo	2 / ciclo
DQO total (mg .L ⁻¹)	Espectrofotométrico	4 / ciclo	4 / ciclo
DQO solúvel (mg .L ⁻¹)	Espectrofotométrico	4 / ciclo	4 / ciclo
N-NTK (mgN .L ⁻¹)	Titulométrico	2 / ciclo	2 / ciclo
N-NH ₄ ⁺ (mgN .L ⁻¹)	Titulométrico	2 / ciclo	2 / ciclo
N-NO ₂ ⁻ (mgN .L ⁻¹)	Titulométrico	2 / ciclo	2 / ciclo
N-NO ₃ ⁻ (mgN .L ⁻¹)	Titulométrico	2 / ciclo	2 / ciclo
SST (mg .L ⁻¹)	Gravimétrico	1 / 12 ciclos	1 / 2 ciclos
SSV (mg .L ⁻¹)	Gravimétrico	1 / 12 ciclos	1 / 2 ciclos
SSV do lodo de excesso	gravimétrico	1 / mês	1 / mês
Oxigênio dissolvido	eletrométrico	1 / 12 ciclos	-
Potencial redox	potenciométrico	-	20 / ciclo
Composição do Gás (%)	cromatografia gas.	-	1 / 2 ciclos
Proteínas	Titulométrico	1 / 12 ciclos	1 / semana
Carboidratos	Titulométrico	1 / 12 ciclos	1 / semana
Lipídeos	Titulométrico	1 / 12 ciclos	1 / semana

Foram realizados além das análises diárias de monitoramento, os perfis temporais do reator anóxico para cada relação DQO / N-NO₃⁻ durante as fases de 2 a 7 do trabalho. Os perfis foram realizados medindo-se as concentrações afluentes e efluentes de nitrato, nitrito, potencial redox e DQO durante o ciclo.

Ao final do estudo de cada fonte de carbono foi realizado o perfil temporal completo para analisar, avaliar e controlar, o desempenho do sistema. Esse perfil consistiu em se fazer todas as análises descritas anteriormente, em espaços de tempo pré-determinados, durante todo o ciclo.

As concentrações de nitrogênio total (N-NTK), nitrogênio amoniacal ($N-NH_3 + N-NH_4^+$), sólidos suspensos voláteis (SSV) e sólidos suspensos totais (SST) foram determinadas de acordo com técnicas do STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER (1995).

As análises de nitrato e nitrito foram realizadas segundo MACKERETH et al. (1978).

As análises de alcalinidade (total, intermediária e a bicarbonato) foram realizadas utilizando-se o método titulométrico modificado por RIPLEY et al. (1986).

As concentrações de ácidos voláteis foram determinadas utilizando-se o método titulométrico proposto por DILLALO & ALBERTSON (1961). A composição de gás será analisada por cromatografia gasosa, e o pH determinado pelo método potenciométrico.

O volume de gás produzido no reator anaeróbio era medido através de um medidor de gás, por deslocamento líquido, ligado ao reator por uma mangueira de silicone.

4.7.3 – Eficiência de remoção de nitrogênio

A eficiência em termos de remoção de nitrogênio foi determinada em todas as fases do trabalho para cada uma das relações DQO / $N-NO_3^-$ existentes no reator anaeróbio, baseada na diferença entre nitrogênio afluente e efluente (nas suas diversas formas) no reator aeróbio, no reator anaeróbio e no sistema como um todo. A equação 4.3 demonstra o procedimento de cálculo para o balanço do nitrogênio no sistema:

$$\%EFIC_N = \frac{\left((N-NTK + N-NO_2^- + N-NO_3^-)_{AAe} + (N-NTK + N-NO_2^- + N-NO_3^-)_{FC} \right) - (N-NTK + N-NO_2^- + N-NO_3^-)_{EAn}}{(N-NTK + N-NO_2^- + N-NO_3^-)_{AAe} + (N-NTK + N-NO_2^- + N-NO_3^-)_{FC}} \times 100$$

.....eq. 4.3

onde:

(..)AAe = Nitrogênio afluente ao reator aeróbio

(..)EAn = Nitrogênio efluente do reator anaeróbio

(..)FC = Nitrogênio da fonte de carbono no reator anaeróbio

4.7.4 – Eficiência de remoção de matéria carbonácea

A concentração da matéria carbonácea em cada unidade foi medida, indiretamente, pelo teste da Demanda Química de Oxigênio (DQO) que expressa o consumo de oxigênio usado na oxidação do material orgânico presente. A eficiência de remoção da matéria carbonácea no reator anaeróbio e aeróbio foram medidas pela eficiência de remoção de DQO, como mostrado pelas equações 4.4 e 4.5 respectivamente:

$$\%EFIC_{DQO} = \frac{(DQO_{EAe} + DQO_{FC} - DQO_{EAn})}{DQO_{EAe} + DQO_{FC}} \times 100 \dots\dots\dots \text{eq. 4.4}$$

$$\%EFIC_{DQO} = \frac{(DQO_{AAe} - DQO_{EAe})}{DQO_{AAe}} \times 100 \dots\dots\dots \text{eq. 4.5}$$

Onde: DQO_{AAe} = Demanda Química de Oxigênio afluente ao reator aeróbio

DQO_{EAe} = Demanda Química de Oxigênio efluente do reator aeróbio

DQO_{FC} = Demanda Química de Oxigênio da fonte de carbono no reator anaeróbio

DQO_{EAn} = Demanda Química de Oxigênio efluente do reator anaeróbio

4.8 – Considerações a respeito do sistema

O balão de armazenamento de gás era trocado periodicamente, assim que era verificada uma deformação ou uma abertura que implicava em vazamento do gás. As válvulas solenóides de enchimento e esvaziamento dos reatores eram supervisionadas e trocadas quando não estavam funcionando adequadamente. As mangueiras de silicone que uniam os componentes do sistema eram verificadas diariamente de forma a impedir a obstrução das mesmas pelo depósito de materiais em suas paredes.

4.9 – Análises microbiológicas do processo

Foram realizados nas Fases de 2, 3, 4 e 5 ensaios para a estimativa dos microrganismos nitrificantes e desnitrificantes, com o uso da técnica dos tubos múltiplos, para quantificação do número mais provável (NMP). O método do número mais provável (NMP) consiste na estimativa da densidade populacional de todos os

microrganismos presentes, não fazendo distinção entre células ou colônias. Essa técnica é baseada na determinação da presença ou ausência de microrganismos em várias porções individuais de cada uma das consecutivas diluições a que são submetidas as amostras. Para a contagem dos microrganismos nitrificantes e desnitrificantes foi utilizada a metodologia descrita por SCHMIDT & BELSER (1982).

A incubação dos microrganismos nitrificantes foi feita em meio seletivo para autótrofos oxidadores de amônia e oxidadores de nitrito, e em meio seletivo enriquecido com carbonato de cálcio em excesso, para manter o pH ao longo do tempo de incubação. As análises foram para as diluições de 10^2 , 10^3 , 10^4 , 10^5 , 10^6 , 10^7 , 10^8 , 10^9 para os microrganismos oxidadores de amônia (oxiamon) e diluições de 10^2 , 10^3 , 10^4 , 10^5 , 10^6 , 10^7 para os microrganismos oxidadores de nitrito (oxinitri).

A incubação dos microrganismos desnitrificantes foi realizada, reproduzindo-se a mesma situação existente no reator anaeróbio para cada fonte de carbono utilizada referente às Fases 2, 3, 4 e 5 do trabalho. Portanto, os microrganismos desnitrificantes foram incubados com o meio real. Foi mantida uma relação DQO / N-NO_3^- igual a 30, para isso o meio real foi enriquecido com 5 mM de NaNO_3 como aceptor de elétrons. Em todas as condições, os tubos foram incubados com diluições de 10^3 , 10^4 , 10^5 , 10^6 , 10^7 e 10^8 .

Além da estimativa do Número Mais Provável, foram feitas análises microscópicas para identificação dos microrganismos presentes através de microscopia óptica de contraste de fase e fluorescência, utilizando-se um microscópio Olympus BH-2 com câmara de captura de imagem Optronix e Software Pro-Plus.

5 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 – Substrato sintético

Para a realização deste trabalho, foi utilizado esgoto sintético simulando esgoto sanitário de média concentração. Foram avaliados para a caracterização do substrato os parâmetros pH, DQO_B (Demanda Química de Oxigênio bruta), DQO_F (Demanda Química de Oxigênio filtrada), AV (ácidos voláteis), AT (alcalinidade total), AP (alcalinidade parcial), N-NTK (nitrogênio total kjeldahl), N-amon (nitrogênio amoniacal), N-NO₂⁻ (nitrito), N-NO₃⁻ (nitrato), ST (sólidos totais) e STV (sólidos totais voláteis). Durante a fase de adaptação e partida do sistema, após o decorrer de 47 ciclos operacionais, optou-se em adicionar uréia ao substrato sintético com vistas ao aumento na produção de nitrato no RSBAe. Como será mostrado neste capítulo, a concentração de nitrato aumentou significativamente, o que possibilitou um estudo mais efetivo do processo de desnitrificação no RSBA_n. A Tabela 5.1 apresenta os valores médios dos parâmetros analisados para o esgoto sintético utilizado durante os primeiros 47 ciclos operacionais (sem adição de uréia) e a Tabela 5.2 apresenta os valores médios para o esgoto sintético adotado no restante da fase experimental.

A variação das características do esgoto sintético, indicada nas Figuras 5.1, 5.3, 5.12, 5.18 e 5.24 é atribuída ao seu preparo, devido à pesagem de alíquotas muito pequenas de seus constituintes. Portanto, a uniformidade de suas características, que era uma vantagem esperada frente ao uso do esgoto doméstico, não foi verificada. No entanto, a ausência de organismos patogênicos justificava o seu uso. Vários trabalhos realizados no Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos também empregaram como substrato, o esgoto sintético (SOUZA, 1996; PICANÇO, 2000; VIEIRA, 2000; CALLADO, 2001).

Estes trabalhos comprovaram a viabilidade da utilização deste tipo de substrato como alternativa de substituição do esgoto doméstico no estudo dos processos de tratamento de efluentes.

Tabela 5.1 – Valores médios dos parâmetros de monitoramento do substrato sintético simulando esgoto sanitário (sem adição de uréia)

Parâmetros	Substrato sintético
pH	6,3-7,9
AV, mg/L	36 ± 19
AT, mg/L	141 ± 14
AP, mg/L	98 ± 20
Al, mg/L	43 ± 14
AB, mg/L	116 ± 24
DQO _B , mg/L	496 ± 61
DQO _F , mg/L	360 ± 40
N-NTK, mg/L	24 ± 8
N-amon, mg/L	0,3 ± 0,4
N-NO ₂ ⁻ , mg/L	-
N-NO ₃ ⁻ , mg/L	3,3 ± 0,4

Tabela 5.2 – Valores médios dos parâmetros de monitoramento do substrato sintético simulando esgoto sanitário (com adição de uréia)

Parâmetros	Substrato sintético
pH	6,2-8,0
AV, mg/L	26 ± 6
AT, mg/L	145 ± 19
AP, mg/L	108 ± 17
Al, mg/L	40 ± 18
AB, mg/L	127 ± 20
DQO _B , mg/L	491 ± 53
DQO _F , mg/L	384 ± 30
N-NTK, mg/L	33 ± 3
N-amon, mg/L	0,8 ± 1,2
N-NO ₂ ⁻ , mg/L	-
N-NO ₃ ⁻ , mg/L	5,0 ± 0,7

5.2 – Fase 1: Adaptação do lodo e partida do sistema

Durante a fase de adaptação e partida do sistema, os reatores foram operados com ciclos de 12 e 24 horas. A duração total desta fase foi de sete semanas. As Tabelas 5.3, 5.4 e 5.5 apresentam os ciclos referentes às sub-fases da adaptação e partida do sistema e os valores médios dos parâmetros avaliados para o reator RSBAe e RSBA_n, respectivamente. Os dados referentes a todos os parâmetros monitorados durante esta fase constam no anexo A.

Tabela 5.3 – Sub-fases da adaptação e partida do sistema

Sub-fase	Duração da sub-fase
1 - ciclos de 12 horas	do ciclo 1 ao 6
2 - ciclos de 24 horas	do ciclo 7 ao 19
3 - ciclos de 12 horas	do ciclo 20 ao 25
4 - ciclos de 24 horas	do ciclo 26 ao 47
5 - ciclos de 24 horas*	do ciclo 48 ao 57

* Adição de uréia ao substrato

Para o reator RSBA_n, além da avaliação de todos os parâmetros medidos para o RSBAe, também foram feitas medidas do potencial redox antes da mistura (pR_a), que ocorria de 20 em 20 minutos, e, depois de mistura (pR_d).

Os reatores foram avaliados primeiramente com ciclos de 12 horas, pois em trabalho anterior, em que eram utilizados os mesmos reatores, os ciclos operacionais eram de 12 horas. Como a configuração do sistema adotada neste trabalho era diferente da utilizada anteriormente, fez-se necessário o teste de ciclos com diferentes tempos de duração e características operacionais. Dessa forma, o sistema foi testado para ciclos de 24 horas, apresentando uma aparente estabilidade em apenas treze ciclos e, novamente, foram testados ciclos de 12 horas para se verificar o comportamento do sistema. A grande preocupação nesta etapa do trabalho era criar condições favoráveis para a conversão, no reator aeróbio (RSBAe), do nitrogênio total em nitrato que ainda não tinha sido satisfatória.

Como as mudanças nos ciclos, de 12 horas para 24 horas e novamente para 12 horas não surtiram efeitos com relação à nitrificação, optou-se em fixar o ciclo em 24 horas, com o intuito de garantir que os processos de amonificação, remoção de DQO e nitrificação pudessem ocorrer no RSBAe. No entanto, apesar do afluente ao

RSBAe apresentar uma concentração de N-NTK de 24 ± 8 mg/L, a concentração de N-NO_3^- efluente ao reator foi de $10,4 \pm 2,5$ mg/L. Dessa forma, objetivando-se o condicionamento do reator para a ocorrência dos processos e para produção considerável de nitrato, optou-se em adicionar uréia ao substrato. Conseqüentemente, com a adição, a relação C/N dentro do reator foi alterada e as concentrações afluentes de N-NTK e efluente de N-NO_3^- no RSBAe aumentaram para 33 ± 3 mg/L e $23 \pm 7,5$ mg/L respectivamente, na sub-fase 5. A mudança na relação C/N pode ter influenciado nas rotas metabólicas dos microrganismos responsáveis pela produção de nitrato o que conferiu ao reator um melhor balanço de massa para o nitrogênio.

Todavia, podemos observar que com ou sem a adição de uréia ao substrato, o balanço de massa para o nitrogênio não fecha. A diferença na concentração afluente e efluente de nitrogênio pode ser explicada pelo uso do nitrogênio na síntese e crescimento celular. No entanto, há uma perda muito grande de nitrogênio que dificilmente seria explicada por esses processos.

Tabela 5.4 – Valores médios dos principais parâmetros avaliados durante a partida do sistema com ciclos de 12 e 24 horas para o RSBAe

Parâmetros	RSBAe				
	12 h	24 h	12 h	24 h	24 h *
pH	7,5-8,0	7,4-8,0	7,4-8,1	7,6-8,1	7,5-7,7
AV, mg/L	13 ± 1	8 ± 1	7 ± 1	$9,4 \pm 3$	14 ± 1
AT, mg/L	173 ± 9	123 ± 18	134 ± 4	122 ± 16	73 ± 4
AP, mg/L	135 ± 5	94 ± 15	104 ± 4	97 ± 17	44 ± 7
Al, mg/L	38 ± 5	29 ± 5	30 ± 5	$25 \pm 4,5$	29 ± 3
AB, mg/L	165 ± 9	116 ± 19	129 ± 5	$115,5 \pm 10$	63 ± 5
DQO _B , mg/L	146 ± 30	38 ± 14	21 ± 13	24 ± 9	45 ± 12
DQO _F , mg/L	91 ± 27	22 ± 7	14 ± 4	18 ± 6	29 ± 23
N-NTK, mg/L	1,7	$2,3 \pm 1$	1,7	1,1	-
N-amon, mg/L	-	$0,4 \pm 0,4$	$0,1 \pm 0,2$	$0,5 \pm 0,9$	$0,7 \pm 1,3$
N-NO_2^- , mg/L	0,0	0,0	0,0	$0,1 \pm 0,1$	$0,5 \pm 0,6$
N-NO_3^- , mg/L	$0,4 \pm 0,4$	$10,4 \pm 2,5$	$5,7 \pm 0,8$	$7,2 \pm 1,9$	$23 \pm 7,5$

24h* - Ciclos de 24 horas com adição de uréia ao substrato sintético

- valores não medidos

Como a concentração de oxigênio dissolvido (OD) no RSBAe era elevada (em torno de 4,5 mg/L), talvez as perdas de nitrogênio possam ser explicadas pelo metabolismo de microrganismos desnitrificantes aeróbios, que convertem diretamente o nitrogênio amoniacal em nitrogênio gasoso (N_2). Essa hipótese contraria a conversão tradicional de nitrogênio, que necessita de uma fase aeróbia e outra anóxica para que possa ocorrer. Alguns pesquisadores como PATUREAU^a *et al.* (1998), HELMER & KUNST (1998), PAI *et al.* (1999) e PATUREAU^b *et al.* (1998) isolando culturas puras de microrganismos desnitrificantes aeróbios, comprovaram em seus estudos, a existência desta rota metabólica, ou seja, conversão aeróbia do N-NTK a N_2 . Essa descoberta pode indicar o caminho para o esclarecimento de várias questões relacionadas aos processos de remoção de nitrogênio, como é o caso da primeira fase deste trabalho experimental.

Tabela 5.5 – Valores médios dos principais parâmetros avaliados durante a partida do sistema com ciclos de 12 e 24 horas para o RSBA_n

Parâmetros	RSBA _n				
	12 h	24 h	12 h	24 h	24 h *
pH	6,9-7,4	7,0-7,9	6,7-7,3	7,1-7,8	7,1-7,8
AV, mg/L	13 ± 1	9 ± 1	9 ± 0	9 ± 2	12 ± 3
AT, mg/L	210 ± 15	154 ± 16	159 ± 5	150 ± 22	143 ± 3,5
AP, mg/L	164 ± 8	122 ± 12	127 ± 4	120 ± 22	107 ± 4
Al, mg/L	46 ± 7	32 ± 5	32 ± 7	31 ± 6,9	36 ± 1
Al/AP	0,3 ± 0	0,3 ± 0	0,3 ± 0	0,3 ± 0	0,3 ± 0
AB, mg/L	202 ± 15	147 ± 17	153 ± 6	154 ± 24	134 ± 5
DQO _B , mg/L	146 ± 25	54 ± 16	42 ± 21	35 ± 6,5	44 ± 12
DQO _F , mg/L	73 ± 15	33 ± 17	27 ± 5	26 ± 6,9	31 ± 18
N-NTK, mg/L	13,0	9 ± 2,5	5 ± 0,8	2,70	-
N-amon, mg/L	-	2,6 ± 1,3	2,9 ± 2,5	2,95 ± 1,6	4,3 ± 0,9
N-NO ₂ ⁻ , mg/L	0,0	0,3 ± 0,4	0,0	0,0	0,0
N-NO ₃ ⁻ , mg/L	0,3 ± 0,5	0,9 ± 1,5	0,0	0,3 ± 0,5	0,0
pR _a , mV	-334 ± 15	-168 ± 115	-115 ± 38	-76 ± 73	60 ± 6
pR _d , mV	-92 ± 10	-21 ± 22	-45 ± 6	-2,5 ± 30	14 ± 1,4

24h* - Ciclos de 24 horas com adição de uréia ao substrato sintético

- valores não medidos

Para uma melhor visualização dos principais parâmetros monitorados, os valores obtidos em cada ciclo, foram plotados a fim de facilitar a visualização da variação dos mesmos no decorrer desta fase. A Figura 5.1 apresenta os dados relativos às determinações da Demanda Química de Oxigênio bruta (DQO_B) e filtrada (DQO_F), Ácidos Voláteis (AV) e Alcalinidade Total (AT), para o substrato, RSBAe e RSBA_n. A Figura 5.2 apresenta os dados relativos as determinações de Nitrogênio Total Kjeldal (N-NTK), Nitrogênio amoniacal (N-amon), Nitrito ($N-NO_2^-$) e Nitrato ($N-NO_3^-$).

Durante esta fase verificou-se que não houve grandes mudanças no valor do pH, que oscilou entre 7,4 e 8,1 para o RSBAe e entre 6,9 e 7,9 para o RSBA_n. Esta faixa de pH é considerada ideal para o desenvolvimento da maioria dos microrganismos envolvidos nos processos biológicos de tratamento.

A concentração de ácidos voláteis no substrato e nos reatores sofreu pequenas variações durante o decorrer desta fase.

A concentração de DQO bruta e filtrada nos reatores foi decrescente até o ciclo 22, permanecendo praticamente constante até o final da fase. Do início da sub-fase 1 até metade da sub-fase 2 (ciclo 12) houve uma queda brusca DQO nos dois reatores, devido provavelmente a mudança do ciclo de 12 para 24 horas, o que resultou numa folga para que os microrganismos pudessem realizar as reações de produção e manutenção.

A partir daí, durante as sub-fases subsequentes, o sistema passou a reproduzir os resultados dos parâmetros avaliados, caracterizando-se o equilíbrio do mesmo. Como a produção de nitrato no reator aeróbio não era satisfatória para uma avaliação mais precisa do processo de desnitrificação e aparentemente o sistema encontrava-se em equilíbrio, optou-se em reduzir o ciclo operacional de 24 para 12 horas para impedir que o nitrogênio fosse assimilado pelos microrganismos, visto que logo após o consumo da matéria carbonácea, o substrato remanescente era a matéria nitrogenada.

Figura 5.1 – Valores de DQO_B, DQO_F, AV e AT obtidos para o Substrato, RSBAe e RSBA n durante a partida e adaptação do sistema

Legenda: — N-NTK — N-amon — N-NO₃ — N-NO₂

Figura 5.2 – Valores de N-NTK, N-amon, N-NO₃ e N-NO₂ obtidos para o Substrato, RSBAe e RSBA n durante a partida e adaptação do sistema

Durante esta sub-fase, quase todos os parâmetros de controle permaneceram praticamente inalterados, no entanto, a produção média de nitrato caiu de 10,4 mg/L para 5,7 mg/L. Como a função esperada para o RSBAe era produzir efluente nitrificado com a menor concentração de DQO, de forma a minimizar sua influência sobre a fonte externa de carbono utilizada no RSBA_n para favorecer o processo de desnitrificação, optou-se mais uma vez para o aumento do ciclo operacional de 12 para 24 horas e esperava-se com esse aumento no tempo de ciclo, uma maior produção de nitrato.

Como na sub-fase anterior, os parâmetros permaneceram praticamente inalterados e a produção de nitrato teve um aumento em média, discreto, passando de 5,7 mg/L para 7,2 mg/L. Para um estudo mais criterioso da desnitrificação, objetivo deste trabalho, era necessário concentrações mais elevadas de nitrato. Desta forma, optou-se em adicionar uréia ao substrato sintético com manutenção do ciclo de 24 horas para garantir a máxima remoção de DQO e uma boa produção de nitrato.

Nesta sub-fase, verificou-se que no RSBAe houve diminuição na concentração média de alcalinidade, variando de 122 mgCaCO₃ na fase anterior para 73 mgCaCO₃. Essa variação no consumo de alcalinidade foi acompanhado pelo aumento da produção de nitrato que subiu de 7,2 mg N-NO₃⁻/L na sub-fase anterior para 23,2 mgN-NO₃⁻/L. Considerando-se a alcalinidade média afluenta e a alcalinidade média efluente, a relação AT_{cons}/N_{oxid} foi igual a 2,8 mgCaCO₃/mgN_{oxid}, valor bem próximo à metade do valor encontrado na relação estequiométrica proposta por Van HAANDEL & MARAIS (1999), que é de 7,14 mgCaCO₃/mgN_{oxid}. Essa diferença nos valores encontrados é explicada pela produção de 3,57 mgCaCO₃ por mg Nitrogênio amonificado na relação estequiométrica proposta por esses mesmos autores. Como a concentração média afluenta de N-NTK foi 24 mg/L e a concentração média afluenta de N-N_{amon} igual a 1 mg/L, conclui-se que 23 mg/L eram amonificados e posteriormente nitrificados.

Nota-se que durante todas as sub-fases, houve uma oxidação quase completa da matéria nitrogenada no RSBAe, sendo detectadas baixas concentrações de N-NH₄⁺, em torno de 0,5 mg/L, e N-NTK, em torno de 2 mg/L, no efluente deste reator.

A concentração de N-NTK no efluente do RSBA_n foi decrescente, passando de 14,0 mg/L na sub-fase 1 para 1,0 mg/L na sub-fase 5. Como o efluente do RSBAe

era composto basicamente por matéria carbonácea remanescente e nitrogênio, na forma de nitrato, conclui-se que a fração de N-NTK estava acumulada no lodo e foi gradativamente convertida em N-NH_4 e também descartada junto com o efluente.

Considerando-se as concentrações de alcalinidade afluentes e efluentes ao RSBA_n, verificou-se que a produção de alcalinidade só foi verificada na sub-fase 5, quando o efluente do RSBA_e continha uma concentração considerável de N-NO_3^- , em torno de 23 mg/L. A produção média de alcalinidade foi de 70 mgCaCO₃/L devido ao processo de desnitrificação, com relação $\text{AT}_{\text{prod}}/\text{N}_{\text{red}}$ média em torno de 3,04 mgCaCO₃/mgN_{red}.

A relação AI/AP manteve-se estável, em torno de 0,3 durante toda a fase de adaptação e partida. A variação nos valores de pH foi pequena, estabilizando-se entre 7,1 e 7,8 nas duas últimas sub-fases.

Nesta fase não foi adicionada fonte externa de carbono ao RSBA_n, no entanto, ocorreu o processo de desnitrificação devido à utilização, pelas bactérias desnitrificantes, da DQO remanescente do RSBA_e e pelo metabolismo endógeno.

A mistura no RSBA_n era realizada de 20 em 20 minutos durante todo o ciclo de reação. Com o intuito de se considerar este fato na medida do potencial redox (pR) eram efetuadas duas medições, uma antes e a outra depois da mistura. Os valores encontrados para o potencial redox foram crescentes no decorrer desta fase e tornaram-se positivos quando o afluente continha grande concentração de nitrato. Desta forma, os valores tornaram-se positivos a partir do início da sub-fase 5. Foi verificada uma grande diferença entre os valores do pR medidos antes e depois da mistura no RSBA_n devido, provavelmente, à entrada de oxigênio no reator, que era de difícil vedação.

5.3 – Fase 2: Estudo da desnitrificação usando a fonte de carbono composta por 50% de proteínas, 40% de carboidratos e 10% de lipídeos (próprio substrato)

Nesta fase, o processo de desnitrificação no RSBA_n foi estudado com o uso do próprio substrato sintético como fonte externa de carbono. As relações de DQO/N-NO₃⁻ estabelecidas no reator foram 0,0, 0,5, 1,0, 2,0, 5,0, 10,0, e 14,0. As relações eram calculadas com o uso da DQO_F da fonte de carbono. Para o cálculo destas relações DQO/N-NO₃⁻ não se considerava a DQO efluente do RSBA_e. Foram realizados 41 ciclos com duração de 24 horas. A configuração do sistema foi a mesma da fase de adaptação e partida do sistema com a seqüência RSBA_e/RSBA_n, no qual o RSBA_e era responsável pela remoção de matéria orgânica carbonácea, amonificação e nitrificação e o RSBA_n, responsável pela desnitrificação. A aeração/mistura no RSBA_e era contínua e a mistura no RSBA_n era realizada de 20 em 20 minutos durante 2 minutos.

A avaliação do desempenho do RSBA_e para nitrificação e do RSBA_n para desnitrificação foi realizada através do acompanhamento dos parâmetros pH, AV, AT, AP, AI, AB, DQO_B, DQO_F, N-NTK, N-amon, N-NO₂⁻, N-NO₃⁻ afluente e efluente de cada reator, além do pR (potencial redox) do RSBA_n antes e depois da mistura. A Tabela 5.6 apresenta os valores médios destes parâmetros e as Figuras 5.3 e 5.4 ilustram a variação dos mesmos no decorrer desta fase. A apresentação mais detalhada, com todas as análises realizadas consta no anexo B.

As relações DQO/N-NO₃⁻ foram testadas na ordem crescente objetivando-se minimizar a influência da DQO remanescente no RSBA_n sobre a nova relação estabelecida. Dessa forma, no estabelecimento da nova relação, não era necessário considerar-se a DQO remanescente. Os ciclos referentes a cada relação estão apresentados na Tabela 5.7.

Tabela 5.6 – Valores médios dos principais parâmetros avaliados durante a Fase 2 do trabalho experimental

Parâmetros	Efluente do RSBAe	Efluente do RSBA _n
pH	7,3-7,8	6,9-7,9
AV, mg/L	10 ± 3	12 ± 4
AT, mg/L	57 ± 16	178 ± 51
AP, mg/L	44 ± 13	144 ± 42
Al, mg/L	13 ± 5	34 ± 12
Al/AP	-	0,3 ± 0,1
AB, mg/L	49 ± 17	170 ± 49
DQOB, mg/L	20 ± 7	31 ± 14
DQOF, mg/L	18 ± 5	27 ± 9
N-NTK, mg/L	0,4 ± 0,4	7 ± 4
N-amon, mg/L	0,3 ± 0,2	5 ± 3
N-NO-2, mg/L	0,1 ± 0,2	0,0 ± 0,0
N-NO-3, mg/L	28 ± 4	0,7 ± 0,4
pRa, mV	-	-177 ± 138

Tabela 5.7 – Duração da operação do sistema para cada relação DQO/N-NO₃⁻

Relação DQO/N-NO ₃ ⁻	Duração
0,0	do ciclo 1 ao 3
0,5	do ciclo 4 ao 7
1,0	do ciclo 8 ao 11
2,0	do ciclo 12 ao 15
5,0	do ciclo 16 ao 18
10,0	do ciclo 19 ao 22
14,0	do ciclo 23 ao 41

Legenda: — DQO_B — DQO_F — AV — AT

Figura 5.3 – Valores de DQO_B, DQO_F, AV e AT obtidos para o Substrato, RSBAe e RSBA n durante a Fase 2 do trabalho experimental

Legenda: — N-NTK — N-amon — N-NO₃ — N-NO₂

Figura 5.4 – Valores de N-NTK, N-amon, N-NO₃ e N-NO₂ obtidos para o Substrato, RSBAe e RSBA n durante a Fase 2 do trabalho experimental

Os resultados da Fase 2 mostraram que não houve uma considerável mudança no pH do RSBAe, com oscilações entre 7,3 e 7,8, visto que as condições operacionais permaneceram constantes durante toda a fase. Já o pH do RSBA_n apresentou tendência a diminuir com o aumento da relação DQO/N-NO₃⁻, estabilizando-se em torno da neutralidade. Os valores do pH encontrados podem ser encontrados no Anexo B.

O consumo médio de alcalinidade no RSBAe foi de 88 mgCaCO₃/L rendendo uma relação AT_{cons}/N_{oxid} igual a 2,7 mgCaCO₃/mgN_{oxid} o que é bem inferior à relação de 7,14 apresentada pela relação estequiométrica de Van HAANDEL & MARAIS (1999). Esta diferença pode ser explicada pela produção de alcalinidade no reator devido à ocorrência do processo de amonificação.

A concentração de alcalinidade no RSBA_n aumentou com o aumento da relação DQO/N-NO₃⁻ passando de 156 mgCaCO₃/L na relação 0,0 para 307 mgCaCO₃/L com o uso da relação 14,0. A produção média de alcalinidade com o uso da relação 0,0 foi de 4,01 mgCaCO₃/mgN_{reduz} devido unicamente ao processo de desnitrificação. Com a utilização da fonte externa de carbono, a concentração crescente de alcalinidade era devida à produção, pelo processo de desnitrificação e pelo processo de amonificação que ocorria devido à presença de nitrogênio orgânico na fonte externa adicionada. O aumento também era devido à introdução de alcalinidade ao RSBA_n, que era um constituinte da fonte externa de carbono.

A eficiência média de remoção de DQO_B e de DQO_F foi de 96% e 95%, respectivamente, para o RSBAe e de 61% e 59%, respectivamente, considerando-se o RSBA_n. Como pôde ser observado, não houve remoção de DQO no RSBA_n com o uso da relação DQO/N-NO₃⁻ igual a 0,0. Ao contrário, o efluente do RSBA_n apresentou, sempre, valores de DQO, brutas e filtradas, superiores às do RSBAe. Este fato indica que a maior concentração de DQO efluente ao RSBA_n era devido tanto à liberação de SV, quanto à liberação de produtos metabólicos de difícil degradação no reator. No entanto com o aumento da relação DQO/N-NO₃⁻, isto é, aumento da DQO de mais fácil biodegradabilidade, o reator passou a apresentar uma remoção crescente de matéria carbonácea, até a uma relação de 10, a partir da qual passou a perder eficiência.

As concentrações de N-NTK e N-amon afluentes ao RSBAe foram em média 32 mg/L e 0,8 mg/L, respectivamente, e as concentrações efluentes foram em média 0,4 mg/L e 0,3 mg/L, o que comprova a eficiência do processo de nitrificação neste reator, alcançando valores bem próximos de 100%. Estes valores estão apresentados na Tabela B3 do Anexo B.

No efluente do RSBA_n as concentrações de N-NTK e N-amon foram em média de 7,0 mg/L e 5,0 mg/L, como pode ser observado na Tabela 5.7. Estas concentrações apresentaram tendência a aumentar com o aumento da relação DQO/N-NO₃⁻, sendo resultantes, principalmente, da fonte externa de carbono adicionada ao reator para o processo de desnitrificação. Nos primeiros ciclos, em que havia condições de baixas relações DQO/N-NO₃⁻, observou-se elevadas concentrações de N-NTK e N-amon, que, provavelmente, estavam absorvidas pela biomassa e foram liberadas. Esta consideração é plausível, visto que este reator foi utilizado em pesquisa anterior com a função única de amonificação.

Durante 18 ciclos, foi introduzido no RSBA_n, a fonte de carbono com relação DQO/N-NO₃⁻ fixa em 14, o que pode ter resultado nas elevadas concentrações de N-NTK e N-amon encontradas para o ciclo 40.

Não houve acúmulo de nitrito nos reatores, o que permite confirmar o bom desempenho dos processos de nitrificação e desnitrificação.

Durante toda esta fase verificou-se a conversão quase completa do nitrato produzido. Portanto, pode-se concluir que para o ciclo de 24 horas o RSBA_n alcançava a desnitrificação tanto com a introdução de fonte externa de carbono, quanto pelo metabolismo endógeno.

As variações ocorridas nos parâmetros medidos para o substrato foram ocasionadas pelo preparo manual do mesmo, no qual eram feitas pesagens de alíquotas muito pequenas de seus constituintes, o que acarretava em erros.

Todas as variações observadas nos parâmetros medidos nos reatores estão apresentadas nas Figuras 5.3 e 5.4.

Como o objetivo principal da variação das relações DQO/N-NO₃⁻ estabelecidas no RSBA_n era avaliar a influência da concentração de matéria carbonácea no processo de desnitrificação foram realizados, em todos os dias de coleta de amostras, os perfis de variação da concentração de N-NO₂⁻ e N-NO₃⁻

juntamente com o consumo de DQO durante o período de 12 horas. Nas primeiras quatro horas, eram feitas coletas no RSBA_n de 20 em 20 minutos, e, nas horas restantes, de duas em duas horas. Também foi feito o acompanhamento da variação do potencial redox para o mesmo período.

Para a relação DQO/N-NO₃⁻ igual a 14, além de realizados perfis com todas as análises descritas para as outras relações, foi realizado ao final das fases 2 a 5 os perfis que incluíam monitoramento do pH, AV, AT, N-amon, NTK, P (proteínas), C (carboidratos) e L (lipídeos). As Figuras 5.5 e 5.6 apresentam os perfis para relações de 0 a 10 e a Figura 5.7 apresenta os perfis para a relação 14.

Os parâmetros monitorados para a relação DQO/N-NO₃⁻ igual a 14 que não foram considerados na Figura 5.7 constam no Anexo B.

Para a realização destes perfis, a fonte de carbono era introduzida no RSBA_n logo após o seu completo enchimento, que demorava cerca de 15 minutos. Quando o líquido no reator estava completamente homogeneizado era feita a primeira coleta. Portanto, o tempo total decorrente desde o início do enchimento do reator até a primeira coleta era aproximadamente 20 minutos, tempo este em que ocorria uma pequena desnitrificação. Esta desnitrificação inicial não foi considerada nas Figuras 5.5, 5.6 e 5.7, devido à grande dificuldade em se fazer estas medidas.

Com o uso da relação DQO/N-NO₃⁻ igual a 0,0, ou seja, sem introdução de fonte de carbono externa, a desnitrificação ocorreu lentamente, com a concentração de N-NO₃⁻ decrescendo de 20 mg/L para 14 mg/L nas três primeiras horas e para 6 mg/L no decorrer das 12 horas de experimento. A concentração de N-NO₂⁻ permaneceu constante em torno de 0,5 mg/L, não sendo observado nenhum pico durante toda a análise. Ao final do experimento, a remoção de N-NO₃⁻ advindo do RSBA_e chegou ao patamar de 70%. O potencial redox aumentou nas primeiras horas e depois se estabilizou. Este comportamento não era esperado, mas pode ser explicado pela dificuldade em se vedar o RSBA_n, possibilitando a entrada de ar no mesmo. Este fato pode ter influenciado com maior significância no valor do pR devido à condição de baixas taxas de desnitrificação existente no interior do reator.

Legenda: — DQO_F — pR — N- NO_3^- — N- NO_2^-

Figura 5.5 – Perfis temporais do RSBA para valores da relação DQO/NO_3^- iguais a 0, 0,5 e 1 com o uso da Fonte 1 de carbono

Legenda: — DQO_F — pR — N-NO₃⁻ — N-NO₂⁻

Figura 5.6 – Perfis temporais do RSBA para valores da relação DQO/ NO₃⁻ iguais a 2, 5 e 10 com o uso da Fonte 1 de carbono

Figura 5.7 – Perfil temporal do RSBA para valor da relação DQO/ NO₃⁻ igual a 14 com o uso da Fonte 1 de carbono

Com o uso das relações 0,5, 1,0 e 2,0, a resposta do sistema foi semelhante com a obtida com o uso da relação 0,0. O potencial redox aumentou nas primeiras horas depois permaneceu constante até o final do experimento. O consumo de N-NO₃⁻ foi lento, chegando a remoções de 80%, 62% e 90% ao final do ensaio com o uso das relações 0,5, 1,0 e 2,0, respectivamente. A concentração de N-NO₂ sofreu poucas variações durante a realização do perfil. A concentração de matéria carbonácea (medida em DQO) teve um declínio nas primeiras horas de ciclo, permanecendo constante no restante do tempo.

Usando a relação $DQO/N-NO_3^-$ igual a 5, o sistema alcançou 100% de desnitrificação em menos de 8 horas e o consumo de DQO foi mais intenso nas duas primeiras horas, caindo de 100 mg/L para 35 mg/L, permanecendo praticamente constante a partir daí. O potencial redox oscilou em torno de 130 mV nas 4 primeiras horas. Quando a concentração de $N-NO_3^-$ alcançou valores menores que 2,0 mg/L, o pR começou a baixar chegando, em duas horas, a -47 mV, decrescendo lentamente a partir daí, até o final do perfil. Houve uma pequena produção de $N-NO_2^-$ no início do perfil, sendo convertido, ainda nas primeiras quatro horas.

O consumo de nitrato usando-se a relação 10 foi bem mais rápido que com o uso da relação 5. Nas primeiras duas horas a remoção de $N-NO_3^-$ alcançou 100%. O potencial redox teve valores positivos (entre 0 e 100) até o ponto em que havia nitrato no RSBA. Após a conversão de todo o $N-NO_3^-$, o pR caiu drasticamente chegando ao final do perfil, em torno de -450 mV.

Para a relação $DQO/N-NO_3^-$ igual a 14, além das análises de DQO_F , pR, $N-NO_3^-$ e $N-NO_2^-$, foram realizadas análises de pH, AV, AT, N-amon, N-NTK, P, C, e L. Estas análises adicionais foram realizadas para se verificar o comportamento de todos os parâmetros envolvidos no processo, relevantes para a comparação entre as diferentes respostas do sistema, relativas a cada fonte de carbono utilizada. Os testes completos foram realizados nesta relação pelo fato de o sistema apresenta-se mais adaptado à essa fonte de carbono, visto que essa relação foi a última testada.

A concentração de L (lipídeos) ficou em torno de 5 mg/L durante todo o tempo de realização do perfil. Estima-se que esse fato é devido à separação do lipídeo do meio líquido, tornando difícil a sua quantificação.

As concentrações de C (carboidratos) e P (proteínas) tiveram o mesmo comportamento da concentração de DQO_F visto que também são quantificadas em termos de DQO. Nota-se que em qualquer tempo da realização do perfil, a soma das concentrações de P, C e L é sempre superior à concentração de DQO_F , isto porque para a obtenção destes parâmetros, são realizadas análises com o uso de amostras brutas. O maior consumo da matéria carbonácea aconteceu nas 4 primeiras horas e praticamente cessou a partir daí, até o final do perfil.

Houve uma produção média de AT de 40 mgCaCO₃ também nas 4 primeiras horas, não sendo notada nenhuma mudança até o final do perfil. O pH no interior do

reator baixou de 7,4 para 7,1 ao final do perfil e a concentração de AV permaneceu praticamente inalterada.

A remoção de N-NO_3^- aconteceu nas duas primeiras horas e a de nitrito na primeira hora. A alta concentração de N-NTK no reator é oriunda da fonte de carbono adicionada ao mesmo, como alimento aos microrganismos desnitrificantes.

Através dos perfis realizados, foi possível a determinação de alguns parâmetros cinéticos que permitem um melhor entendimento do processo de desnitrificação que ocorreu no RSBAn. Esses parâmetros foram as constantes cinéticas de primeira ordem de decaimento de N-NO_3^- (K_{1N}) e as velocidades médias de decaimento de N-NO_3^- (r_N), para todas as fontes de carbono utilizadas e respectivas relações $\text{DQO}/\text{N-NO}_3^-$. Para facilitar a visualização do consumo de N-NO_3^- em função do tempo, foram feitas curvas ajustadas ao modelo de primeira ordem de decaimento durante a desnitrificação no RSBAn. Estas curvas estão apresentadas no Apêndice B e os valores das constantes e velocidades de decaimento estão apresentados na Tabela 5.8.

Tabela 5.8 – Valores das constantes e velocidades de decaimento de N-NO_3^- no RSBAn

Relação $\text{DQO}/\text{N-NO}_3^-$	K_{1N} h^{-1}	r_N $\text{mgN-NO}_3^-/\text{L.h}$
0,0	0,10135	1,3
0,5	0,13981	1,3
1,0	0,09356	0,8
2,0	0,17437	1,0
5,0	0,59970	2,5
10,0	1,13573	7,3
14,0	1,13375	5,6

De acordo com a Tabela 5.8 a velocidade de decaimento de N-NO_3^- (r_N) apresentou valores semelhantes até a relação $\text{DQO}/\text{N-NO}_3^-$ igual a 2 sendo crescente até a relação 10. Percebe-se que com o uso da relação 14 a velocidade de decaimento sofre uma pequena queda. Provavelmente, se o sistema fosse operado a relações

superiores a essa, a velocidade continuaria caindo podendo ocorrer a inibição do processo pelo excesso de substrato fornecido aos microrganismos desnitrificantes.

Os valores encontrados permitem sugerir que a velocidade de desnitrificação aumentou com o aumento da relação $DQO/N-NO_3^-$ até um ponto ótimo, tendendo a diminuir a partir dele. A constante de decaimento de primeira ordem (K_{IN}) teve o mesmo comportamento da velocidade de decaimento.

▪ Microbiologia dos reatores

A Figura 5.8 apresenta os microrganismos encontrados nas amostras do reator Aeróbio (RSBAe) através de microscopia de luz comum (Figura 5.8a, b, c, d) e microscopia em contraste de fase (Figura 5.8e, f).

Foi detectada a presença de ciliados pedunculados, ciliados livres e *Arcella*, que são indicativos da manutenção de boas condições de depuração e a presença de *Aspidisca*, que indica a ocorrência de nitrificação no sistema (CETESB, 1992).

As altas taxas de remoção de matéria carbonácea e a grande eficiência de nitrificação no RSBAe, explicam a presença destes microrganismos no reator.

Os microrganismos encontrados na Figura 5.8 e, f, são bactérias filamentosas do Tipo 0041 (JENKINS et al., 1993), que não foram predominantes nas amostras. Esse tipo de bactéria, presente tanto no floco como livres, igualmente consomem a matéria orgânica, mas deve ter seu crescimento controlado para se evitar problemas de sedimentação do lodo (CETESB, 1992).

Figura 5.8 – Morfologias celulares encontradas nas amostras do lodo proveniente do RSBAc. (a) aspecto do floco, (b) esquerda – ciliados fixos pedunculados, semelhantes a *Epistylis*, direita – rizópodes, semelhantes a *Amoeba*, (c) rizópodes semelhantes a *Amoeba* (esquerda) e semelhantes a *Arcella* (direita), (d) esquerda – rotíferos, semelhantes a *Philodina*, direita – livre-natantes, semelhantes a *Aspidisca*, (e) e (f) bactérias filamentosas Tipo 0041

A Figura 5.9 apresenta os microrganismos encontrados nas amostras do reator Anaeróbio (RSBAn) através de microscopia em contraste de fase (Figura 5.9a, b, c) e microscopia de fluorescência (Figura 5.9d).

Figura 5.9 - Morfologias celulares encontradas nas amostras do lodo proveniente do RSBAn. (a) esquerda - bactéria filamentosa semelhante ao Tipo 0041, direita - bactéria filamentosa semelhante a *Thiotrix II*, (b) (c) e (d) arqueas metanogênicas semelhantes a *Methanosarcinas*.

As bactérias filamentosas do Tipo 0041 encontradas no RSBAn são semelhantes às encontradas no RSBAe, porém apresentam-se em menor número. Como o RSBAn recebia o efluente do RSBAe é bem provável que estas bactérias tenham sido carreadas junto com o efluente. As baterias filamentosas semelhantes a *Thiotrix II* (Figura 5.9 a-dir.) indicam a alta concentração de compostos orgânicos de baixo peso molecular ou escassez de oxigênio ou nutrientes (JENKINS et al., 1993). Nos exames de microscopia de fluorescência e contraste de fase, foi observada a presença de microrganismos metanogênicos semelhantes a *Methanosarcina*.

▪ Estimativa das bactérias Nitrificantes e Desnitrificantes (NMP)

A estimativa do número de microrganismos nitrificantes, presentes no RSBAe, e de microrganismos desnitrificantes, presentes no RSBA_n, foi realizada utilizando-se a técnica dos tubos múltiplos para quantificação do NMP (Número Mais Provável).

As análises microscópicas foram realizadas para os tubos que apresentaram resultado positivo. Foram retiradas amostras e observadas em microscopia óptica de contraste de fase. As morfologias encontradas no RSBAe estão apresentadas na Figura 5.10 e as encontradas no RSBA_n estão apresentadas na Figura 5.11.

A estimativa da microbiota autotrófica nitrificante consta na Tabela 5.9.

Tabela 5.9 – Estimativa do número de microrganismos nitrificantes

Meio de incubação	Amônio-oxidadoras		Nitrato-oxidadoras	
	cel/gSSV	cel/mL	cel/gSSV	cel/mL
seletivo	$1,3 \times 10^9$	$4,9 \times 10^6$	$1,3 \times 10^6$	$4,9 \times 10^4$

O elevado número de bactérias nitrificantes encontradas no lodo do RSBAe corroborado pelo monitoramento do nitrogênio total (N-NTK), nitrogênio amoniacal (N-Namon), nitrato (N-NO₃⁻) e nitrito (N-NO₂⁻) no efluente do RSBAe indicam a alta eficiência do processo de nitrificação no reator.

CALLADO (2001), estudando o tratamento de esgoto sintético com reatores seqüenciais em batelada, encontrou no ensaio de NMP, $4,9 \times 10^5$ bactérias amônio-oxidadoras/mL e $1,6 \times 10^6$ bactérias nitrato-oxidadoras em uma amostra retirada do lodo do RSBAe.

Figura 5.10 - Morfologias celulares encontradas nas amostras do lodo proveniente do RSBAe responsáveis pela nitrificação. (a) colônia de bactérias nitrificantes nitrato-oxidantes, semelhantes a *Nitrobacter*, (b) e (d) colônia de bactérias nitrificantes amônio-oxidantes, semelhantes a *Nitrosomonas*, (c) bactérias nitrificantes amônio-oxidantes, semelhantes a *Nitrosococcus*.

Os microrganismos desnitrificantes foram incubados em meio real (com a mesma fonte de carbono introduzida ao RSBAe) e 5 mM de nitrato (NaNO_3) de forma a se reproduzir as condições existentes no RSBAe. Os resultados da quantificação celular pelo NMP estão apresentados na Tabela 5.10.

Tabela 5.10 – Estimativa do número de microrganismos desnitrificantes

Meio de incubação	Desnitrificantes	
	cel/gSSV	cel/mL
real	$6,4 \times 10^8$	$3,3 \times 10^6$

Os valores obtidos foram semelhantes aos encontrados por JERÔNIMO et al. (1997) tratando esgoto sintético. Esses valores situaram-se entre $6,0 \times 10^7$ cel/gSSV e $1,62 \times 10^9$ cel/gSSV.

CALLADO (2001) encontrou valores de $1,41 \times 10^9$ cel/gSSV e $7,28 \times 10^9$ cel/gSSV, utilizando o meio de incubação Nutriente Broth.

Os valores da quantificação de microrganismos desnitrificantes encontrados, associados ao monitoramento dos parâmetros envolvidos na remoção de nitrato indicam a grande eficiência do processo de desnitrificação que ocorria no RSBA_n. Dos tubos que apresentaram resultado positivo, foram retiradas amostras para serem observadas em microscopia ótica de contraste de fase. As morfologias encontradas estão apresentadas na Figura 5.11

Figura 5.11 - Morfologias celulares encontradas nas amostras do lodo proveniente do RSBA_n responsáveis pela desnitrificação. (a) e (b) bacilos desnitrificantes, encontrados na diluição de 10^6 incubados em meio real, observados em microscopia ótica de contraste de fase.

As morfologias encontradas eram semelhantes a bacilos retos e foram observadas em microscopia ótica de contraste de fase. Morfologias semelhantes foram encontradas por CALLADO (2001) utilizando a mesma técnica dos tubos múltiplos para isolamento das bactérias desnitrificantes.

5.4 – Fase 3: Estudo da desnitrificação usando a fonte de carbono composta por 70% de proteínas, 15% de carboidratos e 15% de lipídeos

Nesta fase, o processo de desnitrificação no RSBA_n foi estudado com o uso da fonte de carbono composta por 70% de proteínas, 15% de carboidratos e 15% de lipídeos utilizando os mesmos constituintes do substrato sintético, com concentrações medidas em termos de DQO. As relações teóricas de $DQO/N-NO_3^-$ estudadas para esta fonte foram 0,0, 2,0, 5,0, 10,0, e 14,0 considerando-se apenas a DQO oriunda da fonte externa de carbono. Foram realizados 18 ciclos com duração de 24 horas. A configuração do sistema foi a mesma utilizada na Fase 2, com o RSBA_e (reator seqüencial em batelada aeróbio) recebendo o substrato sintético e o RSBA_n (reator seqüencial em batelada anaeróbio) recebendo o efluente do RSBA_e. O RSBA_e era responsável pela remoção de matéria orgânica carbonácea, amonificação e nitrificação e o RSBA_n, no qual era introduzida a fonte de carbono, responsável pela desnitrificação. As relações $DQO/N-NO_3^-$ estabelecidas eram calculadas usando-se a DQO_F (demanda química de oxigênio filtrada) da fonte de carbono. A aeração/mistura no RSBA_e era contínua e a mistura no RSBA_n era realizada durante 2 minutos a cada 20 minutos.

A avaliação do desempenho dos reatores era realizada através do acompanhamento dos parâmetros pH, AV (ácidos voláteis), AT (alcalinidade total), AP (alcalinidade parcial), AI (alcalinidade intermediária), AB (alcalinidade à bicarbonato), DQO_B (demanda química de oxigênio bruta), DQO_F (demanda química de oxigênio filtrada), N-NTK (nitrogênio total Kjeldahl), N-amon (nitrogênio na forma de amônio), $N-NO_2^-$ (nitrogênio na forma de nitrito), $N-NO_3^-$ (nitrogênio na forma de nitrato) afluente e efluente de cada reator, além do pR (potencial redox) do RSBA_n antes e depois da mistura. A Tabela 5.11 apresenta os valores médios destes parâmetros. Os ciclos referentes a cada relação $DQO/N-NO_3^-$ testada estão apresentados na Tabela 5.12. A variação dos parâmetros medidos para cada ciclo está representada pelas Figuras 5.12 e 5.13. A apresentação mais detalhada, com todas as análises realizadas nesta fase experimental, consta no anexo C.

Tabela 5.11 – Valores médios dos principais parâmetros avaliados durante a Fase 3 do trabalho experimental

Parâmetros	Efluente do RSBAe	Efluente do RSBAn
pH	7,3-7,7	6,9-7,6
AV, mg/L	12 ± 5	25 ± 25
AT, mg/L	46 ± 2	202 ± 66
AP, mg/L	34 ± 4	158 ± 59
Al, mg/L	11 ± 2	44 ± 10
Al/AP	-	0,3 ± 0,1
AB, mg/L	37 ± 3	184 ± 68
DQO _B , mg/L	23 ± 6	33 ± 11
DQO _F , mg/L	18 ± 4	28 ± 12
N-NTK, mg/L	0,2 ± 0,3	9,4 ± 7,4
N-amon, mg/L	0,2 ± 0,2	3,6 ± 2,5
N-NO ₂ ⁻ , mg/L	0,0 ± 0,0	0,3 ± 0,6
N-NO ₃ ⁻ , mg/L	28 ± 3	1 ± 1
pR _a , mV	-	-157 ± 230

Tabela 5.12 – Duração da operação do sistema para cada relação DQO/N-NO₃⁻

Relação DQO/N-NO ₃ ⁻	Duração
0,0	do ciclo 1 ao 2
2,0	do ciclo 3 ao 5
5,0	do ciclo 6 ao 12
10,0	do ciclo 13 ao 16
14,0	do ciclo 17 ao 18

Figura 5.12 – Valores de DQO_B, DQO_F, AV e AT obtidos para o Substrato, RSBAe e RSBA n durante a Fase 3 do trabalho experimental

Legenda: — N-NTK — N-amon — N-NO₃ — N-NO₂

Figura 5.13 – Valores de N-NTK, N-amon, N-NO₃ e N-NO₂ obtidos para o Substrato, RSBAe e RSBA n durante a Fase 3 do trabalho experimental

Nesta fase foram mantidas, no RSBAe, as mesmas condições operacionais da fase anterior. Os valores do pH neste reator oscilaram entre 7,3 e 7,7 que é uma faixa de variação aceitável e não refletem complicações ao sistema. Como no RSBAe era adicionada uma fonte externa de carbono, era esperado que houvesse alguma mudança no comportamento do pH, visto que houve grande aumento na concentração de alcalinidade, no entanto, variou muito pouco, ficando em torno de 7,0. Esses valores do pH, medidos nos dois reatores, implicam na estabilidade do sistema.

O consumo médio de alcalinidade no RSBAe foi de $91 \text{ mgCaCO}_3/\text{L}$ rendendo uma relação $\text{AT}_{\text{cons}}/\text{N}_{\text{oxid}}$ igual a 2,6 $\text{mgCaCO}_3/\text{mgN}_{\text{oxid}}$ o que é bem inferior à relação de 7,14 apresentada pela relação estequiométrica de Van HAANDEL & MARAIS (1999). Esta diferença pode ser explicada pela produção de alcalinidade no reator, devido à ocorrência do processo de amonificação, que segundo os mesmos autores é de $3,57 \text{ mg CaCO}_3/\text{mgN}_{\text{amon}}$.

A concentração de alcalinidade no RSBAe aumentou com o aumento da relação $\text{DQO}/\text{N-NO}_3^-$ passando de $134 \text{ mgCaCO}_3/\text{L}$ na relação 2,0 para $301 \text{ mgCaCO}_3/\text{L}$ com o uso da relação 14. Com a utilização da fonte externa de carbono, a concentração de AT no RSBAe aumentou, com relação à AT efluente do RSBAe. A produção de AT no RSBAe era a soma da AT produzida através da desnitrificação, da AT advinda do RSBAe, e da AT resultante do processo de amonificação do nitrogênio orgânico presente na fonte externa de carbono adicionada.

Nesta fase foi avaliada a composição do gás produzido no RSBAe. A variação da composição do gás durante os ciclos está apresentada na Figura 5.14. As análises da composição do gás mostraram que o percentual de N_2 , CH_4 e CO_2 mudaram de 97,62%, 2,38% e 0,0% para 93,53%, 3,28% e 3,19%, respectivamente. Este aumento na produção de metano é devido ao aumento da matéria orgânica remanescente no RSBAe. Este gás é o mesmo que recirculava no reator, para promover a mistura.

A eficiência média de remoção de DQO_B e DQO_F foi de 95% no RSBAe e de 85% e 81%, respectivamente, considerando-se o RSBAe. A DQO efluente do RSBAe era sempre superior à efluente do RSBAe.

Figura 5.14 – Variação da composição do gás produzido no RSBAn

Com o aumento da relação $DQO/N-NO_3^-$ aumentou também a eficiência na remoção de DQO no RSBAn, pois desta forma a influência dos produtos metabólicos e a liberação de SV no reator tenderam diminuir.

As concentrações de N-NTK e N-amon afluentes ao RSBAe foram em média 34 mg/L e 0,4 mg/L, respectivamente, e as concentrações efluentes foram em média 0,1 mg/L e 0,2 mg/L. Estes valores comprovam a eficiência do processo de nitrificação no RSBAe, com taxas médias de nitrificação próximas a 100%. As diferenças nas concentrações da matéria nitrogenada na entrada e saída do RSBAe talvez possam ser explicadas pela manutenção e síntese celular e pela ocorrência do processo de “*stripping*” de amônia, somados a limitações das determinações laboratoriais. Embora haja inúmeros trabalhos acerca dos processos de nitrificação e de desnitrificação este tema ainda carece de muitos estudos para ser totalmente compreendido.

No efluente do RSBAn as concentrações de N-NTK e N-amon foram em média de 9,4 mg/L e 3,6 mg/L. A concentração de N-NTK foi crescente com o aumento da relação $DQO/N-NO_3^-$ oriunda, principalmente, da fonte externa de carbono adicionada ao reator para o processo de desnitrificação.

No RSBAe não foi detectada a presença de $N-NO_2^-$ e no RSBAn a concentração média foi de 0,3 mgN- NO_2^- /L o que permite confirmar o bom desempenho dos processos de nitrificação e desnitrificação.

Em todos os ciclos verificou-se a conversão quase completa do nitrato produzido, alcançando praticamente, 100% de desnitrificação em todos os ciclos. Portanto, com ciclos operacionais de 24 horas, a desnitrificação ocorria até mesmo através do metabolismo endógeno. Dessa forma, para se avaliar a influência da relação $DQO/N-NO_3^-$ no processo, foram realizados os perfis de variação da concentração de $N-NO_2^-$ e $N-NO_3^-$ juntamente com o consumo de DQO durante o período de 12 horas em todos os dias de coleta de amostras.

Os perfis realizados com as relações de 2,0 a 10 estão apresentados na Figura 5.14 e o perfil realizado para a relação igual a 14 está apresentado na Figura 5.15. É importante ressaltar que as relações $DQO/N-NO_3^-$ eram estabelecidas teoricamente. Na figuras acima mencionadas, estas relações não se comprovam o que é facilmente explicado pelo consumo imediato do nitrato e da fonte de carbono (FC) logo após a introdução da FC no RSBA.

Os parâmetros monitorados para a relação $DQO/N-NO_3^-$ igual a 14 que não foram considerados na Figura 5.15 estão no Anexo C.

Estabelecendo-se a relação $DQO/N-NO_3^-$ no RSBA igual a 2,0 a desnitrificação foi lenta e alcançou apenas 60% ao final do perfil. A concentração de $N-NO_2^-$ foi crescente, subindo de 0,02 mg/L no início do perfil para 1,76 mg/L ao final das 12 horas. O potencial redox manteve-se positivo, em torno de 170 mV, durante todo o tempo de realização do perfil. A faixa de valores para o pR que caracteriza um sistema anóxico é de 100mV a -100mV. Os valores observados não se enquadram nesta faixa, devido, provavelmente à entrada de ar no sistema. Este fato pode ter influenciado com maior significância no valor do pR devido à condição de baixas taxas de desnitrificação existente no interior do reator.

Com o uso da relação 5,0 o processo de desnitrificação foi bem mais eficiente. O RSBA alcançou 100% de desnitrificação em seis horas de ciclo. O potencial redox manteve-se positivo até o momento em que todo o nitrato foi convertido. A partir daí permaneceu negativo, alcançando -200mV ao final do perfil. O consumo de $N-NO_3^-$ foi rápido, se comparado ao consumo com o uso da relação 2,0. A concentração de $N-NO_2^-$ aumentou nas primeiras horas, por ser o produto intermediário, e depois diminuiu, chegando a 0 ao final do perfil.

Legenda: — DQO_F — pR — N-NO₃⁻ — N-NO₂⁻

Figura 5.15 – Perfis temporais do RSBAn para valores da relação DQO/ NO₃⁻ iguais a 2, 5 e 10 com o uso da Fonte 2 de carbono

Figura 5.16 – Perfil temporal do RSBA para valor da relação DQO/ NO₃⁻ igual a 14 com o uso da Fonte 2 de carbono

A concentração de matéria carbonácea (medida em DQO) diminuiu de 60 mg/L para 25 mg/L, tendo uma maior taxa de consumo no início do perfil.

O sistema alcançou 100% de desnitrificação em menos de 3 horas usando a relação DQO/N-NO₃⁻ igual a 10, e o consumo de DQO acompanhou o consumo de N-NO₃⁻ decrescendo de 146 mg/L para 37 mg/L ao final do perfil. Os valores medidos para o pR foram positivos na fase inicial da desnitrificação. Na fase final, quando a concentração de N-NO₃⁻ se aproximou de 0,0 os valores obtidos foram negativos. Ao final do perfil, estabeleceu-se no reator condições de anaerobiose, pois

o pR chegou a valores de -341 mV. Houve uma pequena produção de N-NO_2^- no início do perfil, sendo convertido, ainda nas primeiras três horas. Para a relação DQO/N-NO_3^- igual a 14, também foram realizadas análises de pH, AV, AT, N-amon , N-NTK , P, C, e L de forma a se fazer uma comparação mais criteriosa da desnitrificação com o uso das outras fontes de carbono.

A concentração de L (lipídeos) permaneceu em torno de 5 mg/L durante todo o tempo de realização do perfil. Este fato já havia sido observado na fase anterior do trabalho, e estima-se que isto tenha acontecido devido à separação do lipídeo do meio líquido, tornando difícil a sua quantificação. O óleo usado na preparação da fonte de carbono, como fonte de lipídeos, era emulsionado com detergente. Provavelmente a emulsão não foi eficiente, permitindo que o óleo se separasse do meio líquido.

As concentrações de C (carboidratos) e P (proteínas) tiveram o mesmo comportamento da concentração de DQO_F visto que também são quantificadas em termos de DQO. O consumo da matéria carbonácea foi gradativo até o final do perfil.

A concentração de AV diminuiu de 31 mg/L para 18 mg/L nos primeiros 20 minutos, permanecendo neste patamar até o final. O pH do reator manteve-se constante em $7,3$ nas primeiras seis horas diminuindo para $7,2$ nas horas restantes.

A concentração de AT aumentou nas seis primeiras horas e diminuiu nas horas restantes. O esperado era que a concentração tivesse um aumento mais acentuado devido à desnitrificação, no início do perfil, e mais discreto, no tempo restante, devido à amonificação. Como a variação foi pequena é possível que os valores encontrados ao final do perfil sejam originados de erros de análise.

A remoção de N-NO_3^- foi mais eficiente que a encontrada com o uso da relação 10 e aconteceu praticamente em duas horas. A formação e consumo de nitrito ocorreram nas duas primeiras horas. A alta concentração de N-NTK no reator era oriunda da fonte de carbono adicionada ao mesmo, que continha 70% de proteínas em sua composição. O decréscimo na concentração de N-NTK , acompanhado pelo aumento na concentração de N-N_{amon} é explicado pela conversão do nitrogênio orgânico em N-N_{amon} .

Para facilitar a visualização do consumo de N-NO_3^- em função do tempo, foram feitas curvas ajustadas ao modelo de primeira ordem de decaimento durante a desnitrificação no RSBA_n. Estas curvas estão apresentadas no Apêndice C e os valores das constantes e velocidades de decaimento estão apresentados na Tabela 5.13.

Tabela 5.13 – Valores das constantes e velocidades de decaimento de N-NO_3^- no RSBA_n

Relação DQO/ N-NO_3^-	K_{1N} h^{-1}	r_N $\text{mgN-NO}_3^-/\text{L.h}$
2,0	0,06398	1,0
5,0	0,46202	2,9
10,0	0,78552	5,9
14,0	1,08081	7,1

A velocidade de decaimento de N-NO_3^- (r_N) encontrada para todas as relações foi crescente com o aumento da relação DQO/ N-NO_3^- não sendo observada nenhuma tendência à inibição do processo. Talvez, se fossem estabelecidas relações DQO/ N-NO_3^- maiores, a velocidade de decaimento chegasse a um ponto ótimo, tendendo a diminuir a partir dele. A constante de decaimento de primeira ordem (K_{1N}) teve o mesmo comportamento da velocidade de decaimento. Portanto, os problemas associados ao aumento das DQO/ N-NO_3^- eram o aumento nas concentrações de matéria carbonácea e nitrogenada remanescentes no RSBA_n que eram descartadas junto com o efluente. O aumento da relação também acarretava, na saída do reator, pequeno aumento na concentração de sólidos.

▪ Estimativa das bactérias Desnitrificantes (NMP)

A estimativa do número de microrganismos desnitrificantes, presentes no RSBA_n, foi realizada utilizando-se a técnica dos tubos múltiplos para quantificação do NMP (Número Mais Provável).

Os microrganismos desnitrificantes foram incubados em meio real (com a mesma fonte de carbono introduzida ao RSBA_n) e 5 mM de nitrato (NaNO_3) de

forma a se reproduzir as condições existentes no RSBA_n durante sua operação. Os resultados da quantificação celular pelo NMP estão apresentados na Tabela 5.14.

Tabela 5.14 – Estimativa do número de microrganismos desnitrificantes

Meio de incubação	Desnitrificantes	
	cel/gSSV	cel/mL
real	$6,5 \times 10^7$	$5,4 \times 10^5$

Os valores encontrados na quantificação de microrganismos desnitrificantes, são mais baixos que os obtidos com o uso do próprio substrato como fonte de carbono, mas enquadram-se entre os valores encontrados na literatura. Estes altos valores associados ao monitoramento dos parâmetros envolvidos na remoção de nitrato indicam a grande eficiência do processo de desnitrificação no RSBA_n.

As análises microscópicas foram realizadas para os tubos que apresentaram resultado positivo. Foram retiradas amostras e observadas em microscopia óptica de contraste de fase. As morfologias encontradas no RSBA_n estão apresentadas na Figura 5.17. As mesmas morfologias foram observadas na fase anterior, em que era usado o próprio substrato sintético como fonte de carbono para as bactérias desnitrificantes.

Figura 5.17 - Morfologias celulares encontradas nas amostras do lodo proveniente do RSBA_n responsáveis pela desnitrificação, na Fase 3 do trabalho. (a) e (b) bacilos desnitrificantes, encontrados na diluição de 10^6 incubados em meio real, observados em microscopia óptica de contraste de fase.

5.5 – Fase 4: Estudo da desnitrificação usando a fonte de carbono composta por 15% de Proteínas, 70% de carboidratos e 15% de lipídeos

O processo de desnitrificação no RSBA_n foi estudado, nesta fase do trabalho, com o uso da fonte de carbono composta por 15% de Proteínas, 70% de carboidratos e 15% de lipídeos. O sistema foi operado durante 20 ciclos completos de 24 horas. As relações teóricas de $DQO/N-NO_3^-$ estudadas foram 2,0, 5,0, 10,0, e 14,0 considerando-se unicamente a DQO da fonte de carbono (F.C.). A configuração do sistema, utilizada nesta fase, foi a mesma das fases 1, 2 e 3. O RSBA_e era responsável pela remoção de matéria carbonácea, amonificação e nitrificação, e o RSBA_n, responsável pela desnitrificação. A fonte de carbono externa, utilizada como alimento para as bactérias desnitrificantes, era adicionada ao RSBA_n no início de cada ciclo. As relações $DQO/N-NO_3^-$ estabelecidas eram calculadas usando-se a DQO_F (Demanda Química de Oxigênio Filtrada) da fonte de carbono. A aeração/mistura no RSBA_e era contínua e a mistura no RSBA_n era realizada durante 2 minutos a cada 20 minutos. O gás de recirculação era armazenado num balão que era trocado a cada início de nova fase. Quando era feita a troca do balão, o mesmo era preenchido com nitrogênio.

Os parâmetros monitorados para avaliação do desempenho dos reatores eram pH, AV (ácidos voláteis), AT (alcalinidade total), AP (alcalinidade parcial), AI (alcalinidade intermediária), AB (alcalinidade à bicarbonato), DQO_B (demanda química de oxigênio bruta), DQO_F (demanda química de oxigênio filtrada), N-NTK (nitrogênio total Kjeldahl), N-amon (nitrogênio na forma de amônio), $N-NO_2^-$ (nitrogênio na forma de nitrito), $N-NO_3^-$ (nitrogênio na forma de nitrato) afluente e efluente de cada reator, além do pR (antes e depois da mistura) do RSBA_n. Os valores médios desses parâmetros estão apresentados na Tabela 5.15. As relações $DQO/N-NO_3^-$ e os respectivos ciclos operacionais estão discriminados na Tabela 5.16. As Figuras 5.18 e 5.19 descrevem a tendência de variação dos parâmetros monitorados durante esta fase. Alguns parâmetros não foram apresentados, mas constam no anexo D.

Tabela 5.15 – Valores médios dos principais parâmetros avaliados durante a Fase 4 do trabalho experimental

Parâmetros	Efluente do RSBAe	Efluente do RSBA _n
pH	7,3-7,9	6,9-7,0
AV, mg/L	11 ± 2	12 ± 1
AT, mg/L	66 ± 14	205 ± 37
AP, mg/L	52 ± 12	162 ± 40
Al, mg/L	14 ± 5	42 ± 13
Al/AP	-	0,3 ± 0,1
AB, mg/L	59 ± 15	196 ± 37
DQO _B , mg/L	19 ± 2	30 ± 9
DQO _F , mg/L	19 ± 2	27 ± 8
N-NTK, mg/L	0,0 ± 0,0	1 ± 0,7
N-amon, mg/L	0,0 ± 0,0	1 ± 0,6
N-NO ₂ ⁻ , mg/L	0,1 ± 0,1	0,0 ± 0,0
N-NO ₃ ⁻ , mg/L	26 ± 2	0,2 ± 0,4
pR _a , mV	-	-282 ± 95

Tabela 5.16 – Duração da operação do sistema para cada relação DQO/N-NO₃⁻

Relação DQO/N-NO ₃ ⁻	Duração
2,0	do ciclo 1 ao 3
5,0	do ciclo 4 ao 6
10,0	do ciclo 7 ao 9
14,0	do ciclo 10 ao 20

Figura 5.18 – Valores de DQO_B, DQO_F, AV e AT obtidos para o Substrato, RSBAe e RSBA n durante a Fase 4 do trabalho experimental

Legenda: — N-NTK — N-amon — N-NO₃⁻ — N-NO₂⁻

Figura 5.19 – Valores de N-NTK, N-amon, N-NO₃⁻ e N-NO₂⁻ obtidos para o Substrato, RSBAe e RSBA n durante a Fase 4 do trabalho experimental

Os valores do pH no RSBAe não sofreram grandes mudanças no decorrer desta fase variando entre 7,4 e 7,8, o que indica sua estabilidade. Os valores do pH encontrados para o RSBAe se estabeleceram em torno da neutralidade, visto que dispunha de uma concentração média de $205 \text{ mgCaCO}_3/\text{L}$ para a AT.

O consumo médio de alcalinidade no RSBAe foi de $92 \text{ mgCaCO}_3/\text{L}$, o que produziu, na nitrificação, uma relação média entre a concentração de alcalinidade consumida e a concentração de nitrogênio oxidado ($AT_{\text{cons}}/N_{\text{oxid}}$) igual a $2,6 \text{ mgCaCO}_3/\text{mgN}_{\text{oxid}}$. Como o RSBAe também era responsável pela amonificação do nitrogênio orgânico, havia uma produção teórica de $3,57 \text{ mgCaCO}_3$ por mg de nitrogênio orgânico oxidado ($\text{mgAT}_{\text{prod}}/\text{mgN}_{\text{oxid}}$), de acordo com a relação estequiométrica descrita por Van HAANDEL & MARAIS (1999). Segundo esses mesmos autores, na oxidação de 1 mg de nitrogênio, na nitrificação, há consumo de $7,14 \text{ mg}$ de alcalinidade. A diferença existente entre os valores encontrados no RSBAe e os valores estequiométricos descritos por esses autores pode ser explicada pela produção de alcalinidade durante o processo de amonificação.

A concentração de alcalinidade no RSBAe aumentou de $144 \text{ mgCaCO}_3/\text{L}$ no ciclo 1, para 243 mgCaCO_3 no último ciclo. Este aumento é devido à fonte externa de carbono, que continha considerável concentração de alcalinidade.

Todos valores encontrados para os parâmetros pH, AV, AT, AP, AI e AB estão na tabela D1 do Anexo D.

A composição do gás produzido no RSBAe no decorrer desta fase está apresentada na Figura 5.20. A tendência era que com o aumento da relação $\text{DQO}/\text{N}-\text{NO}_3^-$ houvesse uma maior produção de CO_2 e CH_4 , no entanto este comportamento não foi verificado. Vale ressaltar que o balão de armazenamento de gás foi trocado no meio da fase, por um novo balão, que foi previamente cheio com gás nitrogênio. Isto explica as baixas porcentagens de CO_2 e CH_4 encontradas no final da fase.

As remoções de DQO_B e DQO_F foram em média, 96% e 95% no RSBAe e 85% e 79% no RSBAe, respectivamente. As eficiências de remoção para o RSBAe mantiveram-se praticamente constantes durante toda essa fase, no entanto, as remoções no RSBAe foram maiores com o uso da relação $\text{DQO}/\text{N}-\text{NO}_3^-$ igual a 10 apresentando ligeira queda com a passagem para relação 14.

Legenda: — N₂ — CH₄ — CO₂

Figura 5.20 – Variação da composição do gás produzido no RSBAe

A eficiência do processo de nitrificação, no RSBAe, alcançada em quase todos os ciclos foi de 100%. A concentração de N-NTK no substrato era, em média, 35 mg/L e no efluente do RSBAe não foi detectado. Valores semelhantes foram encontrados nas fases anteriores, o que comprova a boa adaptação dos microrganismos nitrificantes no sistema. Os valores medidos das concentrações de DQO e nitrogênio são mostrados nas tabelas D2 e D3 do Anexo D, respectivamente.

Como a fonte de carbono utilizada nesta fase, para o processo de desnitrificação, continha apenas 15% de proteínas em sua composição, não foi verificado o acúmulo de N-NTK no RSBAe, que é um diferencial positivo com relação à utilização das fontes de carbono anteriores.

A eficiência da desnitrificação, no RSBAe, foi de 100% em quase todos os ciclos não sendo detectada a presença de N-NO₂⁻ com o uso de nenhuma das relações DQO/N-NO₃⁻. Portanto, com ciclos operacionais de 24 horas, aplicando-se ao RSBAe qualquer uma das relações, a desnitrificação era completa. Dessa forma, para se avaliar a influência da relação DQO/N-NO₃⁻ no processo, foram realizados os perfis de variação da concentração de N-NO₂⁻ e N-NO₃⁻ e de DQO durante o período de 12 horas em todos os dias de coleta de amostras.

A Figura 5.21 apresenta a variação da concentração de N-NO₃⁻, N-NO₂⁻, DQO_F e pR (medido sempre antes da mistura) durante o tempo de realização perfil,

usando-se as relações DQO/N-NO₃⁻ 2,0, 5,0 e 10,0. A Figura 5.22 mostra a variação destes parâmetros com o uso da relação igual a 14.

Os parâmetros monitorados para a relação DQO/N-NO₃⁻ igual a 14 que não foram considerados na Figura 5.15 estão no Anexo D.

Com a relação DQO/N-NO₃⁻ no RSBAn igual a 2,0 a desnitrificação foi completa ao final das 12 horas de ciclo. A concentração de N-NO₂⁻ foi crescente até a metade do tempo total de ciclo, aumentando de 0,34 mg/L para 1,95 mg/L decrescendo a partir daí até o valor de 0,04 mg/L. O potencial redox manteve-se entre 80 mV e -60 mV durante todo o tempo de realização do perfil. Segundo SPERLING (1996) a faixa do pR que caracteriza condições anóxicas no sistema é de 100 mV a -100 mV. Portanto, para esta relação esta faixa foi de valores foi atendida.

Com o uso da relação 5,0 houve um consumo mais rápido de nitrato e o RSBAn chegou a 100% de desnitrificação em apenas sete horas. Enquanto havia N-NO₃⁻ no reator, o potencial redox manteve-se entre 80 mV e -20 mV. Quando o N-NO₃⁻ foi todo consumido o pR continuou decrescendo até o valor de -100 mV. A maior parte da matéria carbonácea, medida em termos de DQO_F, foi consumida mais rapidamente nas três primeiras horas, mantendo-se praticamente constante no restante do perfil.

Usando-se a relação DQO/N-NO₃⁻ igual a 10, não foi detectado N-NO₃⁻ após a segunda hora de perfil. O potencial redox diminuiu de 0 mV para -180 mV nas primeiras três horas e ficou constante o restante do perfil. O consumo de matéria carbonácea foi mais intenso no início do perfil, enquanto havia N-NO₃⁻, sendo discreto no restante do ciclo.

Legenda: — DQO_F — pR — N-NO₃ — N-NO₂

Figura 5.21 – Perfis temporais do RSBA_n para valores da relação DQO/ NO₃ iguais a 2, 5 e 10 com o uso da Fonte 3 de carbono

Figura 5.22 – Perfil temporal do RSBA_n para valor da relação DQO/ NO₃⁻ igual a 14 com o uso da Fonte 3 de carbono

Para a relação DQO/N-NO₃⁻ igual a 14 além de todas as análises realizadas para as outras relações, também foram realizadas análises de pH, AV, AT, N-amon, N-NTK, P, C, e L.

A concentração de L (lipídeos), como também para as outras fases, ficou em torno de 5 mg/L durante todo o tempo de realização do perfil devido à separação entre o óleo usado como fonte de lipídeos e o meio líquido. O óleo usado na preparação da fonte de carbono era emulsionado com detergente. Provavelmente a emulsão não era eficiente.

As variações nas concentrações de carboidratos e proteínas não ocorreram como esperado, devido talvez, a erros de análise. A variação na concentração de DQO_F teve comportamento semelhante ao obtido como o uso das outras relações $DQO/N-NO_3^-$, com o maior consumo inicial e um consumo mais moderado no restante do ciclo.

A concentração de AV manteve-se praticamente invariável e o pH ficou em torno de 7,0 durante todo o perfil. A AT que teve um aumento inicial estabilizou-se em torno de 200 $mgCaCO_3/L$.

A remoção total de $N-NO_3^-$ ocorreu nas duas primeiras horas, da mesma forma que com o uso da relação 10, mas a velocidade de consumo foi menor. Não houve acúmulo de N-NTK no reator, pois a fonte de carbono introduzida continha baixa concentração de nitrogênio orgânico.

Para facilitar a visualização do consumo de $N-NO_3^-$ em função do tempo, foram feitas curvas ajustadas ao modelo de primeira ordem de decaimento durante a desnitrificação no RSBA_n. Estas curvas estão apresentadas no Apêndice D e os valores das constantes e velocidades de decaimento estão apresentados na Tabela 5.17.

Tabela 5.17 – Valores das constantes e velocidades de decaimento de $N-NO_3^-$ no RSBA_n

Relação $DQO/N-NO_3^-$	K_{1N} h^{-1}	r_N $mgN-NO_3^-/L.h$
2,0	0,18869	1,3
5,0	0,46174	4,2
10,0	1,03175	7,8
14,0	0,99624	6,5

A velocidade de decaimento de $N-NO_3^-$ (r_N) foi crescente com o aumento da relação até 10. Para a relação 14, houve uma diminuição na velocidade de decaimento, o que permite supor, que se a relação fosse aumentada, haveria inibição do processo. A constante de decaimento de primeira ordem (K_{1N}) teve o mesmo comportamento da velocidade de decaimento.

▪ Estimativa das bactérias Desnitrificantes (NMP)

A estimativa do número de microrganismos desnitrificantes, presentes no RSBA_n, foi realizada utilizando-se a mesma técnica dos tubos múltiplos para quantificação do NMP (Número Mais Provável) utilizada nas outras fases.

Os microrganismos desnitrificantes foram incubados em meio real, ou seja, com a mesma fonte de carbono introduzida ao RSBA_n. Foram utilizados também 5 mM de nitrato (NaNO₃). A fonte de carbono foi dosada de forma a se reproduzir a relação DQO/N-NO₃⁻ igual a 14. Os resultados da quantificação celular pelo NMP estão apresentados na Tabela 5.18.

Tabela 5.18 – Estimativa do número de microrganismos desnitrificantes

Meio de incubação	Desnitrificantes	
	cel/gSSV	cel/mL
real	$5,6 \times 10^7$	$7,9 \times 10^5$

Os valores encontrados na quantificação de microrganismos desnitrificantes, são semelhantes aos obtidos com o uso da fonte 2 de carbono (70% de P, 15% de C, 15% de L), enquadrando-se entre os valores encontrados na literatura. Estes valores obtidos, associados aos resultados do monitoramento dos parâmetros envolvidos na remoção de nitrato, indicam a grande estabilidade alcançada pelo RSBA_n.

As análises microscópicas foram realizadas para os tubos que apresentaram resultado positivo. Foram retiradas amostras e observadas em microscopia óptica de contraste de fase. As morfologias encontradas no RSBA_n estão apresentadas na Figura 5.23. As mesmas morfologias foram observadas nas fases anteriores.

Figura 5.23 - Morfologias celulares encontradas nas amostras do lodo proveniente do RSBA n responsáveis pela desnitrificação, na Fase 3 do trabalho. (a) e (c) bacilos desnitrificantes, encontrados na diluição de 10^5 incubados em meio real, observados em microscopia ótica de contraste de fase, (b) e (d) bacilos desnitrificantes, encontrados na diluição de 10^6 incubados em meio real, observados em microscopia ótica de contraste de fase

5.6 – Fase 5: Estudo da desnitrificação usando a fonte de carbono composta por 15% de Proteínas, 15% de carboidratos e 70% de lipídeos

Nesta fase, o processo de desnitrificação no RSBA_n foi estudado com o uso da fonte de carbono composta por 15% de proteínas, 15% de carboidratos e 70% de lipídeos utilizando os mesmos constituintes do substrato sintético, com concentrações medidas em termos de DQO. As relações teóricas de DQO/N-NO₃⁻ estudadas nesta fase foram 2,0, 5,0, 10,0, e 14,0. Foram realizados 15 ciclos com duração de 24 horas. A configuração do sistema foi a mesma utilizada em todas as fases anteriores, ou seja, RSBA_e/RSBA_n. O RSBA_e era responsável pela remoção de matéria orgânica carbonácea, amonificação e nitrificação e o RSBA_n, responsável pela desnitrificação. Também foram mantidas as mesmas condições operacionais admitidas nas outras fases.

Foram monitorados, durante toda a fase, os parâmetros: pH, AV, AT, AP, AI, AB, DQO_B, DQO_F, N-NTK, N-amon, N-NO₂⁻ e N-NO₃⁻. As análises foram realizadas para o afluente e efluente de cada reator, além do pR (antes e depois da mistura) do RSBA_n. A Tabela 5.20 apresenta os valores médios destes parâmetros. Os ciclos referentes a cada relação DQO/N-NO₃⁻ testada estão apresentados na Tabela 5.19. A variação dos parâmetros medidos para cada ciclo está representada pelas Figuras 5.24 e 5.25. A apresentação mais detalhada, com todas as análises realizadas consta no anexo E.

Tabela 5.19 – Duração da operação do sistema para cada relação DQO/N-NO₃⁻

Relação DQO/N-NO ₃ ⁻	Duração
2,0	do ciclo 1 ao 3
5,0	do ciclo 4 ao 9
10,0	do ciclo 10 ao 12
14,0	do ciclo 13 ao 15

Tabela 5.20 – Valores médios dos principais parâmetros avaliados durante a Fase 5 do trabalho experimental para o RSBAe e RSBA_n

Parâmetros	Efluente do RSBAe	Efluente do RSBA _n
pH	7,5-7,7	6,9-7,4
AV, mg/L	11 ± 1	11 ± 1
AT, mg/L	73 ± 6	163 ± 23
AP, mg/L	59 ± 6	126 ± 20
Al, mg/L	23 ± 20	65 ± 57
Al/AP	-	0,3 ± 0,1
AB, mg/L	65 ± 6	155 ± 23
DQOB, mg/L	22 ± 5	44 ± 17
DQOF, mg/L	20 ± 3	36 ± 12
N-NTK, mg/L	0,4 ± 0,8	1,0 ± 1,1
N-amon, mg/L	0,0 ± 0,0	0,4 ± 0,8
N-NO-2, mg/L	0,0 ± 0,0	0,0 ± 0,0
N-NO-3, mg/L	24 ± 2	0,4 ± 0,8
pRa, mV	-	-305 ± 188

Os valores do pH do RSBAe ficaram em torno de 7,6 e do RSBA_n em torno de 7,0, com comportamentos similares aos obtidos com os usos das fontes 2 e 3 de carbono. A semelhança destes valores, com os encontrados com o uso das outras fontes, e a boa remoção de matéria carbonácea e nitrogenada comprovam a estabilidade do sistema.

Figura 5.24 – Valores de DQO_B, DQO_F, AV e AT obtidos para o Substrato, RSBAe e RSBA n durante a Fase 5 do trabalho experimental

Legenda: — N-NTK — N-amon — N-NO₃ — N-NO₂

Figura 5.25 – Valores de N-NTK, N-amon, N-NO₃ e N-NO₂ obtidos para o Substrato, RSBAe e RSBA n durante a Fase 5 do trabalho experimental

O consumo médio de alcalinidade no RSBAe, extraído da Tabela E1 do Anexo E, foi de 78 mgCaCO₃/L. A relação AT_{cons}/N_{oxid} encontrada foi igual a 2,34 mgCaCO₃/mgN_{oxid}, inferior à relação estequiométrica de Van HAANDEL & MARAIS (1999) que é de 7,14. Esta diferença pode ser explicada pela produção de alcalinidade no reator, devido à ocorrência do processo de amonificação, que segundo os mesmos autores é de 3,57 mg CaCO₃/mgN_{amon}.

A concentração de alcalinidade no RSBA_n teve um aumento discreto com o aumento da relação DQO/N-NO₃⁻, se comparado com os resultados obtidos com o uso das outras fontes. O ganho de AT no RSBA_n com o aumento da relação DQO/N-NO₃⁻, que com o uso das outras fontes era em média 100,0 mgCaCO₃, baixou para 23 mgCaCO₃. Isto é devido à grande dificuldade em se fixar a DQO da fonte de carbono. Como o óleo era emulsionado com detergente, este constituinte adicional passou a ter maior influência na DQO da fonte de carbono, pois nesta fonte, 75% da DQO era devida ao óleo. Com isso, a DQO da fonte de carbono era sempre, cerca de 100% superior à esperada. Dessa forma, para se manter a relação DQO/N-NO₃⁻, era necessário fazer-se uma diluição da fonte. Como os outros constituintes eram previamente pesados, a concentração dos mesmos também era diluída.

A composição do gás produzido pelo RSBA_n durante o período desta fase está apresentada na Figura 5.26. A variação na composição do gás foi semelhante à observada com o uso das outras fontes.

A eficiência média de remoção de DQO_B e DQO_F foi de 96% e 95% no RSBAe, respectivamente e de 91%, considerando-se o RSBA_n. Como pode ser visto na Tabela E2 do Anexo E, o RSBA_n apresentou uma remoção alta e praticamente constante de DQO. Isto se deve ao processo de flotação que ocorria no reator devido à alta concentração de lipídeos insuficientemente emulsionado. Desta forma os lipídeos, que representavam a maior parte da DQO, permaneciam no topo do reator.

A concentração média de N-NTK afluente ao RSBAe foi 33,3 mg/L e a concentração efluente foi 0,4 mg/L. O RSBAe alcançou, portanto, uma eficiência aproximada de 100% na conversão do N-NTK.

Legenda: — N₂ — CH₄ — CO₂

Figura 5.26 – Variação da composição do gás produzido no RSBA n

No efluente do RSBA n a concentração de N-NTK foi em média de 1,0 mg/L. A concentração de N-NTK não aumentou consideravelmente com o aumento da relação DQO/N-NO₃⁻. Como explicado anteriormente, isto é devido à baixa concentração de N-NTK na fonte de carbono adicionada.

No RSBA e não foi detectada a presença de N-NO₂⁻ e no RSBA n a concentração média foi de 0,4 mgN-NO₂⁻/L o que permite confirmar o bom desempenho dos processos de nitrificação e desnitrificação.

Em todos os ciclos verificou-se a conversão quase completa do nitrato produzido, alcançando praticamente, 100% de desnitrificação em todos os ciclos. Portanto, o RSBA n trabalhou com folga, podendo ser operado com ciclos menores.

Para se avaliar a influência da relação DQO/N-NO₃⁻ no processo, foram realizados os perfis de variação da concentração de N-NO₂⁻ e N-NO₃⁻ juntamente com o consumo de DQO com o tempo. Os perfis realizados com as relações de 2,0 a 10 estão apresentados na Figura 5.27 e o perfil realizado para a relação igual a 14 está apresentado na Figura 5.28.

Com o uso da relação DQO/N-NO₃⁻ igual a 2,0 a desnitrificação alcançou 100% de eficiência nas primeiras quatro horas.

Legenda: — DQO_F — pR — N-NO₃⁻ — N-NO₂⁻

Figura 5.27 – Perfis temporais do RSBA para valores da relação DQO/ NO₃⁻ iguais a 2, 5 e 10 com o uso da Fonte de carbono 4

Figura 5.28 – Perfil temporal do RSBA para valor da relação DQO/ NO₃⁻ igual a 14 com o uso da Fonte 4 de carbono

A concentração inicial de N-NO₂⁻ era 2,0 mg/L no início do perfil chegando a 0 também em menos de quatro horas. O pR manteve-se positivo, enquanto havia N-NO₃⁻ no reator. Quando todo o N-NO₃⁻ foi convertido, o pR estava em torno de -25 mV chegando a -125 ao final do perfil. A DQO_F no reator ficou em torno de 30 mg/L durante todo o perfil.

Com o uso da relação 5,0 a desnitrificação alcançou 100% em pouco mais de uma hora, no entanto, com o uso da relação 10,0 a completa desnitrificação apenas foi alcançada em três horas. O potencial redox comportou-se da mesma forma tanto

para a relação igual a 5,0 quanto para a relação igual a 10,0 chegando a -400 mV e -450 mV, respectivamente, ao final do perfil. A concentração de DQO_F com o uso da relação 5,0, ficou em torno de 30 mg/L e com o uso da relação 10,0, baixou de 80 mg/L no início do perfil para 33 mg/L no final.

Houve uma produção inicial de N-NO_2^- de 2,0 mg/L, com o uso da relação 2,0, que foi convertida em menos de duas horas, a contar do início do perfil. Com o uso da relação 10,0 a produção foi discreta.

Estabeleceu-se, tanto para a relação 5,0 quanto 10,0, condições de anaerobiose no RSBA_n, logo após o consumo total de N-NO_3^- .

Para a relação DQO/N-NO_3^- igual a 14, também foram realizadas análises de pH, AV, AT, N-amon, N-NTK, P, C, e L de forma a se fazer uma comparação mais criteriosa da desnitrificação com o uso das outras fontes de carbono.

A concentração de L (lipídeos) ficou em torno de 9 mg/L durante todo o tempo de realização do perfil, embora a fonte de carbono ser composta basicamente por lipídeos. Este fato foi observado nas fases anteriores e estima-se que isto tenha acontecido por causa da separação do lipídeo do meio líquido, tornando difícil a sua quantificação. PISCANÇO (2000), teve as mesmas dificuldades na medição da concentração de lipídeos. O óleo usado na preparação da fonte de carbono, como fonte de lipídeos, era emulsionado com detergente, o que não foi suficiente para solubilizar o óleo no meio líquido.

As concentrações de C (carboidratos) e P (proteínas) tiveram o mesmo comportamento da concentração de DQO_F visto que também são quantificadas em termos de DQO. O consumo da matéria carbonácea foi gradativo até o final do perfil.

A concentração de AV manteve-se em torno de 18 mg/L durante toda a realização do perfil. A AT sofreu um aumento inicial e permaneceu inalterada o restante do tempo de perfil. O pH não se alterou, ficando em 7,2 todo o tempo.

A remoção de N-NO_3^- foi mais eficiente que a encontrada com o uso da relação 10 e aconteceu em duas horas. A formação e consumo de nitrito também ocorreram neste período. A concentração de N-N_{amon} aumentou com o decréscimo da concentração de N-NTK, não sendo observadas ao final do perfil.

Para facilitar a visualização do consumo de N-NO_3^- em função do tempo, foram feitas curvas ajustadas ao modelo de primeira ordem de decaimento durante a desnitrificação no RSBA_n. Estas curvas estão apresentadas no Apêndice E e os valores das constantes e velocidades de decaimento estão apresentados na Tabela 5.21.

Tabela 5.21 – Valores das constantes e velocidades de decaimento de N-NO_3^- no RSBA_n

Relação DQO/ N-NO_3^-	K_{1N} h^{-1}	r_N $\text{mgN-NO}_3^-/\text{L.h}$
2,0	0,64538	4,0
5,0	1,13276	6,0
10,0	0,61188	4,3
14,0	1,05013	5,7

A velocidade de decaimento de N-NO_3^- (r_N) encontrada para as relações não teve um comportamento condizente com os observados com o uso das outras fontes. A maior velocidade de decaimento foi alcançada com o uso da relação 5,0. Como o lipídeo é de difícil biodegradabilidade se comparado a proteína e ao carboidrato é incoerente admitir que para as relações DQO/ N-NO_3^- iguais a 2,0 e 5,0 as maiores velocidades de conversão tenham sido encontradas com o uso desta fonte. São vários os pontos que podem ser explorados como tentativa de elucidar esta questão: o difícil estabelecimento das relações que poderiam ser bem maiores que as fixadas, o aproveitamento do detergente como fonte de carbono, melhor exposição das partículas pelo detergente e uma maior adaptação das bactérias desnitrificantes.

■ Estimativa das bactérias Desnitrificantes (NMP)

A estimativa do número de microrganismos desnitrificantes, presentes no RSBA_n, foi realizada utilizando-se a técnica dos tubos múltiplos para quantificação do NMP (Número Mais Provável), que foi usada também, para a determinação do número de microrganismos, com o uso das outras fontes.

Os microrganismos desnitrificantes foram incubados em meio real (com a mesma fonte de carbono introduzida ao RSBA_n) e 5 mM de nitrato (NaNO₃) de forma a se reproduzir as condições existentes no RSBA_n durante sua operação. Os resultados da quantificação celular pelo NMP estão apresentados na Tabela 5.14.

Tabela 5.22 – Estimativa do número de microrganismos desnitrificantes

Meio de incubação	Desnitrificantes	
	cel/gSSV	cel/mL
real	$2,4 \times 10^2$	$2,4 \times 10^2$

Os valores encontrados na quantificação de microrganismos desnitrificantes, são mais baixos que os obtidos para todas as outras fontes de carbono utilizadas. A comunidade microbiana não se estabeleceu da mesma forma que nas outras situações. Esses valores obtidos, não se enquadram entre os valores correntes na literatura.

As análises microscópicas foram realizadas para os tubos que apresentaram resultado positivo. Foram retiradas amostras e observadas em microscopia óptica de contraste de fase. As morfologias encontradas no RSBA_n estão apresentadas na Figura 5.29. Estas mesmas morfologias foram observadas nas fases anteriores, a única diferença é que essas morfologias foram observadas para diluições da ordem de 10^6 .

Figura 5.29 - Morfologias celulares encontradas nas amostras do lodo proveniente do RSBA_n responsáveis pela desnitrificação, na Fase 5 do trabalho. (a) e (b) bacilos desnitrificantes, encontrados na diluição de 10^2 incubados em meio real, observados em microscopia óptica de contraste de fase.

5.7 – Fase 6: Estudo da desnitrificação usando o etanol como fonte de carbono

Nesta fase, o processo de desnitrificação no RSBA_n foi estudado com o uso do etanol como fonte externa de carbono. Esta fase teve duração de dois ciclos completos de 24 horas. O objetivo principal da aplicação desta fonte, foi verificar o comportamento do sistema utilizado nesta pesquisa, para fontes de carbono, hoje largamente utilizadas e consagradas. A única relação DQO/N-NO₃⁻ estudada foi a 14. Esta relação foi escolhida pelo fato de, nas fases anteriores, ser a relação em que mais análises foram realizadas. A relação foi calculada com o uso da DQO_B da fonte de carbono, visto que a DQO_F é de mesmo valor. Não foi feita nenhuma modificação do sistema operacional nem na metodologia de acompanhamento dos parâmetros.

A avaliação do desempenho dos reatores, foi realizada através do acompanhamento dos parâmetros DQO_B (demanda química de oxigênio bruta), DQO_F (demanda química de oxigênio filtrada), N-NTK (nitrogênio total Kjeldahl), N-amon (nitrogênio amoniacal), N-NO₂⁻ (nitrogênio nitrito), N-NO₃⁻ (nitrogênio nitrato) afluente e efluente de cada reator, além do pR (antes e depois da mistura) do RSBA_n. As tabelas com os valores destes parâmetros estão apresentadas no anexo F. Foi alcançada eficiência de remoção de DQO_B e DQO_F de 94% e 93%, respectivamente, para o RSBA_e. Houve remoção de 95% do nitrato produzido no RSBA_e.

A Figura 5.30 apresenta a variação dos parâmetros monitorados durante o perfil realizado.

A remoção de N-NO₂⁻ e N-NO₃⁻ ocorreu em menos de três horas. O maior consumo de DQO foi verificado nas primeiras quatro horas, depois disto a concentração de DQO decresceu lentamente até o final do perfil. O valor do pR ficou próximo de -100 mV até o momento em que o N-NO₃⁻ foi totalmente consumido. A partir daí decresceu rapidamente para -400 mV, estabelecendo-se condições de anaerobiose no reator. Fica claro que a concentração de DQO utilizada foi muito superior à necessária, visto que ao final do perfil, ainda havia uma concentração de 200 mg/L de DQO remanescente. Vários trabalhos reportam que a relação C/N (carbono/nitrogênio) ótima, situa-se entre 1,0 e 2,0 mgC/mgN.

Legenda: — DQOF — pR — N-NO₃⁻ — N-NO₂⁻

Figura 5.30 – Perfil temporal do RSBA para valor da relação DQO/NO_3^- igual a 14, usando o etanol como fonte externa de carbono

A velocidade de consumo de nitrato encontrada foi 5,15 mgN-NO₃⁻/L.h. Esta velocidade de consumo, observada com o uso da relação 14, é menor que os valores encontrados para as outras fontes a esta mesma relação.

5.8 – Fase 7: Estudo da desnitrificação usando o metanol como fonte de carbono

Nesta fase, o processo de desnitrificação no RSBA_n foi estudado com o uso do metanol como fonte externa de carbono. Da mesma forma que na fase anterior, esta fase teve duração de dois ciclos completos de 24 horas. O objetivo principal da aplicação desta fonte, também foi verificar o comportamento do sistema com uso de fontes de carbono, hoje, largamente utilizadas e consagradas. A única relação DQO/N-NO₃⁻ estudada foi a 14. Não foi feita nenhuma modificação do sistema operacional nem na metodologia de acompanhamento dos parâmetros.

A avaliação do desempenho dos reatores, foi realizada através do acompanhamento dos parâmetros DQO_B, DQO_F, N-NTK, N-amon, N-NO₂⁻, N-NO₃⁻ afluente e efluente de cada reator, além do pR (antes e depois da mistura) do RSBA_n. As tabelas com os valores destes parâmetros estão apresentadas no anexo G. Foi alcançada eficiência de remoção de DQO_B e DQO_F de 93% e 92%, respectivamente, para o RSBA_e. Houve remoção de 96% do nitrato produzido no RSBA_e. A Figura 5.31 apresenta a variação dos parâmetros no perfil realizado.

Legenda: — DQO_F — pR — N-NO₃⁻ — N-NO₂⁻

Figura 5.31 – Perfil temporal do RSBA_n para valor da relação DQO/ NO₃⁻ igual a 14, usando o metanol como fonte externa de carbono

A remoção de N-NO₃⁻ e N-NO₂⁻ ocorreu em três horas. O maior consumo de DQO foi verificado nas primeiras quatro horas, depois disto a concentração de DQO decresceu lentamente até o final do perfil. Quando a concentração de N-NO₃⁻ decresceu para valores próximos de 2,0 mg/L o pR decresceu de -50 mV para -320

mV, e, chegou ao final do perfil em -450 mV. Fica claro que a de DQO utilizada também para esta fonte foi muito superior à necessária, visto que ao final do perfil, ainda havia uma concentração de 210 mg/L de DQO remanescente. Vários trabalhos reportam que a relação C/N (carbono/nitrogênio) ótima, situa-se entre 1,0 e 2,0 mgC/mgN.

A velocidade de consumo de nitrato encontrada foi 4,5 mgN-NO₃⁻/L.h. Esta velocidade de consumo, observada com o uso da relação 14, é menor que os valores encontrados para as outras fontes de carbono testadas para esta relação.

6 – CONCLUSÕES

O sistema RSBAe/RSBAn, operado com ciclos de 24 h, apresentou eficiência média de remoção de DQO superior a 94% e eficiência média de remoção de nitrogênio, considerando-se o nitrogênio afluente ao sistema, de 98%, utilizando-se qualquer uma das fontes de carbono no RSBAn. Este sistema poderia ser operado tranquilamente com ciclos de 12 horas.

O processo de nitrificação, no RSBAe, ocorreu com 100% de eficiência, em todas as fases subsequentes à fase de adaptação e partida do sistema e o processo de desnitrificação, no RSBAn, ocorreu com eficiência média de 99%.

Os valores do pR medidos no RSBAn apresentaram valor médio, ao final dos ciclos, de -220 mV, não sendo verificada a presença de nitrato, caracterizando desta forma, condições anaeróbias no reator.

Os perfis temporais realizados para cada uma das fontes de carbono, à diferentes relações DQO/N-NO₃⁻, demonstraram que enquanto era detectada a presença de nitrato no RSBAn o pR permanecia entre os valores de 100 mV e -100 mV decrescendo para valores próximos a -400 mV, quando o nitrato era completamente consumido. As reações de consumo de DQO e desnitrificação ocorriam nas primeiras horas dos perfis, sendo que a DQO remanescente continuava sendo degradada lentamente, após o consumo de nitrato.

Utilizando-se a fonte de carbono, para a desnitrificação no RSBAn, composta por 50% de proteínas, 40% de carboidratos e 10% de lipídeos (próprio substrato sintético), a velocidade de decaimento de N-NO₃⁻ aumentou com o aumento da relação DQO/N-NO₃⁻ alcançando uma relação ótima de 10 mgDQO/mgN-NO₃⁻, a

partir da qual a velocidade tendeu a decrescer. Com o uso desta fonte, houve acúmulo de N-NTK no reator.

Utilizando-se a fonte de carbono composta por 70% de proteínas, 15% de carboidratos e 15% de lipídeos, a velocidade de decaimento de N-NO_3^- também aumentou com o aumento da relação DQO/ N-NO_3^- . Não foi verificada tendência de inibição da desnitrificação com o uso desta fonte de carbono. A velocidade de decaimento de N-NO_3^- aumentou de 1,0 $\text{mgN-NO}_3^-/\text{L.h}$, com o uso da relação 2,0, para 7,1 $\text{mgN-NO}_3^-/\text{L.h}$, com o uso da relação 10. A concentração de N-NTK no reator aumentou com o aumento da relação DQO / N-NO_3^- .

Com o uso da fonte de carbono composta por 15% de proteínas, 70% de carboidratos e 15% de lipídeos, a velocidade de decaimento de N-NO_3^- também aumentou com o aumento da relação DQO/ N-NO_3^- , apresentando tendência a decrescer a partir da relação DQO/ N-NO_3^- igual a 10. A concentração de N-NTK no RSBA_n foi discreta durante todo o tempo de utilização desta fonte carbono.

Não houve acúmulo de N-NTK no RSBA_n com o uso da fonte de carbono composta por 15% de proteínas, 15% de carboidratos e 70% de lipídeos. As velocidades de decaimento de N-NO_3^- encontradas variando-se as relações DQO/ N-NO_3^- não apresentaram comportamento que sugerisse alguma tendência. Era muito difícil estabelecer-se condições homogêneas para a fonte de carbono devido à emulsão deficiente do óleo usado como fonte de lipídeo.

Com o uso do metanol e etanol como fontes de carbono para a relação DQO/ N-NO_3^- igual a 14, o RSBA_e apresentou uma concentração de DQO remanescente muito elevada, visto que as relações DQO/ N-NO_3^- ótimas para estas fontes são da ordem de 2,0 mgDQO/mg N-NO_3^- .

Com o uso das fontes 1, 2 e 3 de carbono, o RSBA_n apresentou constantes e velocidades de decaimento aproximadas, no entanto, numa avaliação global, o

sistema apresentou melhores resultados com o uso da fonte 3 de carbono, visto que não foi observado acúmulo de nitrogênio no sistema.

Não foi observada nenhuma diferença entre as fontes de carbono no que se relaciona ao comportamento das concentrações de proteínas e carboidratos. De forma geral, a variação da concentração destes constituintes acompanhou a variação da concentração de DQO. Não foi possível se fazer o acompanhamento da concentração de lipídeos.

As caracterizações microbiológicas dos lodos aeróbio e anaeróbio comprovaram a adaptação dos microrganismos ao sistema.

Em termos práticos, com o uso da relação $DQO/N-NO_3$ igual a 5 foi alcançado quase 100% de desnitrificação em menos de três horas. Dessa forma para a maioria dos sistemas esse processo teria tempo para ocorrer.

7 – SUGESTÕES

A partir dos resultados obtidos no desenvolvimento deste trabalho, são feitas as seguintes sugestões para pesquisas futuras:

- Investigar o comportamento do processo de desnitrificação em relações DQO/N- NO_3^- superiores às utilizadas nesta pesquisa visando a utilização
- Estudar a desnitrificação num sistema de tratamento de esgoto real, usando como fontes de carbono os seus próprios constituintes.
- Estudar de forma mais criteriosa a aplicação de taxas DQO/N- NO_3^- inferiores a 5, visto que foram alcançados bons resultados abaixo desta taxa.
- Verificar a possibilidade de conversão aeróbia do N-NTK a N_2 neste tipo de reator.

8 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, L. M. (1994). Aspectos microbiológicos de los procesos de nitrificación-desnitrificación. In: TALLER Y SEMIRÁRIO LATINO-AMERICANO DE TRATAMIENTO ANAEROBIO DE ÁGUAS RESIDUALES. Montevideu, Anais Montevideu, p. 55-63.

ABUFAYED, A. A. and SCHROEDER, E. D. (1986). Kinetics and Stoichiometry of SBR/Denitrification with a Primary Sludge Carbon Source. *J. Water Pollut. Control Fed.*, 58, 398-405.

APS, T. (1991). Health Hazards of Nitrate in Drinking Water. *Water AS.*, v. 7, pp. 1-17.

BANG, D., LI, Y., NOIKE, T. and WATANABE, Y. (1994). Denitrification Using PVA as an Organic Carbon Source with Aerobic Biofilms. *Proc. of Environmental Engineering Research*, v. 31, pp. 199-208

BANG, D., WATANABE, Y. and NOIKE, T. (1995). An Experimental Study on Aerobic Denitrification with Polyvinyl Alcohol as a Carbon Source in Biofilms. *Water Science and Technology*, v. 32 nº. 8, pp. 235-242

BATTISTONI, P. and FAVA, G. (1995). Fesh Processing Wastewater: Production of Internal Carbon Source for Enhanced Biological Nitrogen Removal. *Water Science and Technology*. N. 9-10, p. 293-302.

BEUN, J. J., HENDRIKS, A., VAN LOOSDRECHT, M. C. M., MORGENROTH, E., WILDERER, P. A. and HEIJNEN, J. J. (1998). Aerobic Granulation in a Sequencing Batch Reactor. *Water Research*, v. 33, n. 10, pp. 2283-2290.

- BICKERS, P. O. and VAN OOSTROM, A. J. (2000). Availability for Denitrification of Organic Carbon in Meat-processing Wastestreams. *Bioresource Technology*, v. 73, pp. 53-58.
- BLASZCZYK, M., MUCIELLSKI, R., JAWOROWSKA, D. H. and MATUSIAK, K. (1980). Effects of Various Sources of Organic Carbon and Nitrite and Nitrate Concentrations on the Selection of Denitrifying Bacteria. *Acta Microbiologica Polonica*. 29, 397-406.
- BORZACCONI, L., OTTONELLO, G., CATELLÓ, E., PELAEZ, H., GAZZOLA, A. and VIÑAS, M. (1999). Denitrification in a Carbon and Nitrogen Removal System for Leachate Treatment: Performance of a Upflow Sludge Blanket (USB) Reactor. *Water Science and Technology*, v. 40, nº. 8, pp. 145-151.
- CALLADO, N. H. (2001). *Reatores Sequenciais em Batelada em Sistema Anaeróbio/Aeróbio Tratando Esgoto Sanitário Sintético*. São Carlos, 226 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- CETESB – COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL (1992). *Microbiologia de lodos ativados*. São Paulo – SP
- CHERNICHARO, C. A. L. (1997). *Princípios do tratamento biológico de águas residuárias – Reatores anaeróbios*. v.5.
- CHOI, E.; LEE, H. S.; LEE J. W. and OA, S. W. (1996). Another Carbon Souce for BNR System. *Water Science Technology*, v.34, n. 1-2, pp. 363-369.
- COLLIVIGNARELLI, C. and BERTANZA, G. (1999). Simultaneous Nitrification-Denitrification Process in Activated Sludge Plants: Performance and Applicability. *Water Science and Technology*, v. 40, nº. 4-5, pp. 187-194.

- CUERVO-LÓPEZ, F. M., MARTINEZ, F., GUTIÉRREZ-ROJAS, M., NOYOLA, R.A. and GÓMES, J. (1999). Effects of Nitrogen Loading Rate and Carbon Source on Denitrification na Sludge Settleability in Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) Reactor. *Water Science and Technology*, v. 40, nº 8, pp. 123-130.
- DAGUE, R. R., HABBEN, C. E., PIDAPARTI, S. R. (1992). Initial Studies on the Anaerobic Sequencing Batch Reactor, *Water Science and Technology*, v. 26, n. 9-11, p. 2429-2432.
- DILALLO, R.; ALBERTSON, E. (1961). Volatile Acids by Direct Tritation. *Journal Water Pollution Control Federation*, vol. 33, p. 356 - 365.
- GERNAEY, K., VANDERHASSELT, A., BOGAERT, H., VANROLLEGHEM, P. and VERSTRAETE, W. (1998). Sensors to Monitor Biological Nitrogen Removal and Activated Sludge Settling. *Journal of Microbiological Methods*, v. 32, pp. 193-204.
- GRADY, C.P.L. and LIM, H.C. (1990) *Biological Wastewater Treatment. Theory and Applications*. New York, Marcel Dekker, Inc..
- HAAS, C. N. & POLPRASERT, C. (1993). Biological sulfide prestripping for metal and COD removal. *Water Enviromental Research*, v. 65, nº. 5, p. 645-649.
- HELMER, C. and KUNST, S. (1998). Simultaneous Nitrification/Denitrification in na Aerobic Biofilm System. *Water Science and Technology*, v. 37, nº. 4-5, pp.183-187.
- HER, J. J. and HUANG, J. S. (1995). Influences of Carbon source and C/N Ratio on Nitrate/Nitrite Denitrification and Carbon Breakthrough. *Bioresource Technology*, v. 54, pp. 45-51.

- ISAACS, S. H. and HENZE, M. (1995). Controlled Carbon Source Addition to an Alternative Nitrification-Denitrification Wastewater Treatment Process Including Biological P Removal. *Water Research*, v.29, nº. 1, pp. 79-89.
- JENKINS, D., RICHARD, M. G. and DAIGGER, G. T. (1993). Manual on the Causes and Control of Activated Sludge Bulking and Foaming, 2^a ed., *Lewis Publishers*, United States of America.
- JERÔNIMO, V. L., GIANOTTI, E. P., CAMPOS, J. R. (1997). Estimate of the Number of Denitrifying Bactéria and Maximum Rate of Denitrification in Anoxic Reactor. *Revista de Microbiologia*, v. 28, nº 1, pp 91-94
- KIRSTEIN, D., KIRSTEIN, L., SCHELLER, F., BORCHERDING, H., RONNENBERG, J., DIEDMANN, S., STEINRECKE, P. (1999). Amperometric Nitrate Biosensors on the Bases of *Pseudomonas Stutzeri* Nitrate Reductase. *Journal of Electroanalytical chemistry*, 474, 43-51.
- KÖNIG, A. and RIEDEL, K. (1998). A Microbial Sensor for Detecting Inhibitors of Nitrification in Wastewater. *Biosensors & Bioelectronics* v. 13, pp. 869-874.
- KRISTENSEN, G. H. and JØRGENSEN, P. E. (1990). Preprecipitation Followed by Biological Denitrification Supported by Addition of Biological or Thermal/Chemical hydrolysis products. *Proceedings from 4th Gothenburg Symposium*, Madrid, Oct. pp. 313-328. Springer Verlag, Berlin.
- LEE, D. U., LEE, I. S., CHOI, Y. D. and BAE, J. H. (2001). Effects of External Carbon Source and Empty Bed Contact Time on Simultaneous Heterotrophic and Sulfur-Utilizing Autotrophic Denitrification. *Process Biochemistry*, v. 36, pp. 1215-1224.

- LEEuw, E. J., KRAMER, J. F., BULT, B. A. and WIJCHERSON, M. H. (1996). Optimization of Nutrient Removal with On-line Monitoring and Dynamic Simulation. *Water Science and Technology*, v. 33, nº. 1, pp. 203-209.
- LEHNINGER, A. L. (1976). *Bioquímica*, 2ª ed., Edgar Blücher, v. 2, p. 262.
- LEMMER, H., ZAGLAUER, A. and METZNER, G. (1997). Denitrification in a Methanol –Fed Reactor. Part 1: Physico-Chemical and Biological Characterization. *Water Research*, v. 31, nº. 8, pp. 1897-1902.
- LIE, E. & WELANDER, T. (1994). Influence of Dissolved Oxygen and Oxidation-reduction Potential on the Denitrification Rate of Activated Sludge. *Water Science Technology*, v.30, nº 6, pp 91-100.
- LIN, S. H. & CHENG, K. W. (2001). A New Sequencing Batch Reactor for Treatment of Municipal Sewage Wastewater for Agricultural Reuse. *Desalination*, v. 133, pp. 41-51.
- MACKERTH, F. J. H., HERONS, J., TALLING, J. F. (1978). *Water Analysis: Some Revised Methods for Limnologists*. Scientific Publication nº 36. Freshwater Biological Association.
- MASSONE, A. G., GERNAY, K., BOGAERT, H., VANDERHASSELT, A., ROZZI, A., VERSTRAETE, W. (1996). Biosensors for Nitrogen Control in Wastewaters. *Water Science and Technology* v. 34, pp. 213-220.
- MARTIENSSEN, M. and SCHÖPS, R. (1996). Biological Treatment of Leachate from Solid Waste Landfill Sites – Alterations in the Bacterial Community During the Denitrification Process. *Water Research*, v. 31, nº 5, pp. 1164-1170.

- McCARTY, P. L. (1966). Feasibility of the denitrification process for removal of nitrate nitrogen from agricultural drainage water. *Rep. San Joaquin District, California, Dep. Wat. Res.* Fresno, California, June 1966.
- MENOUD, P., WONG, C. H., ROBINSON, H. A., FARQUHAR, A., BARFORD, J. P. and BARTON, G. W. (1999). Simultaneous Nitrification and Denitrification Using Siporax^{TM} Packing. *Water Science and Technology*. 40, n. 4-5, pp. 153-160.
- METCALF & EDDY (1991) Wastewater Engineering. Treatment Disposal and Reuse. McGraw-Hill Series in Water Resources and Environmental Engineering, 3^a ed.
- MOHSENI-BANDPI, A. and ELLIOTT, D. J. (1998). Groundwater Denitrification with Alternative Carbon Source. *Water Science Technology*, v.38, n. 6, pp. 237-243.
- MORGENROTH, E. SHERDEN, T., VAN LOOSDRECHT, M. C. M., HEIJNEN, J. J. and WILDERER, P. A. (1997). Aerobic Granular Sludge in a Sequencing Batch Reactor. *Water Research*, v. 31 n. 12, p. 3191-3194.
- NDON, U. J. and DAGUE, R. R. (1997). Effects of Temperature and Hydraulic Retention Time on Anaerobic Sequencing Batch Reactor Treatment of Low-Strength Wastewater. *Water Research*, v. 31, n. 10, pp. 2455-2466.
- NYBERG, U., ANDERSON, B., ASPEGREN, H. (1996). Long-term Experiences with External Carbon Sources for Nitrogen Removal. *Water Science and Technology*, v. 33, n. 12, p. 109-116.
- PAI, S. L., CHONG, N. M., CHEN, C. H. (1999). Potential Applications of Aerobic Denitrifying Bacteria as Bioagents in Wastewater Treatment. *Bioresource Technology*, v. 68, pp. 179-185.

PATUREAU^a, D., BERNET, N., BOUCHEZ, T., DABERT, P., DELGENES, J. P., MOLETTA, R. (1998) Biological Nitrogen Removal in a Single Aerobic Reactor by Association of a Nitrifying Ecosystem to an Aerobic Denitrifier, *Microvirgula Aerodenitrificans*. *Journal of Molecular Catalysis*, v. 5, pp. 435-439.

PATUREAU^b, D., BERNET, N., DABERT, P., GODON, J. J., STEYER, J. P. (1998) Physiological, Molecular and Modeling Studies of an Aerobic Denitrifier: *Microvirgula Aerodenitrificans*. Use of its Properties in Integrated Nitrogen Removal Plant. *Water Science and Technology*, v. 38, n. 1, p. 167-175.

PICANÇO, A. P. (2000). *Estudo da Remoção de Matéria Orgânica Específica e Avaliação da Atividade Biológica dos Grânulos e Biofilmes Formados em Diferentes Suportes em um Reator Anaeróbio* - Dissertação de Mestrado - Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Paulo 152p.

QUAGLIANO, J.V. (1973). Chemistry. Florida State University.

RAJAPAKSE, J. P. and SCUTT, J. E. (1999). Denitrification with Natural Gas and Various New Growth Media. *Water Research*, v. 33, nº 18, pp. 3723-3734.

Resolução CONAMA, n. 20 de 18 de junho de 1986. Estabelecimento de Classificação de Águas Doces, Salobras e Salinas do Território Nacional. Ministério de Desenvolvimento Urbano e Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 30 jul. Seção 1, p. 113356-60.

RIPLEY, L. E.; BOYLE, W. C.; CONVERSE, J. C. (1986). Improved alkalimetric monitoring for anaerobic digestion of high-strenght waste. *Journal Water Pollution Control Federation*, vol. 58, p. 406 - 411.

- RITTMANN, B. E., REGAN, J. M. and STAHL, D. A. (1994) Nitrification as a Source of Soluble Organic Substrate in Biological Treatment. *Water Science and Technology*. 30 (6), 1-8.
- ROS, M. (1995). Denitrification Kinetics in an Activated Sludge System. *Water Science and Technology*, v. 32, nº. 9-10, pp. 323-330.
- SMIDTH, E. L. and BELSER, L. W. (1982). Nitrifying Bacteria. In: Methods of Soil Analysis, Page, A. L. *et al.* (eds). 2 ed Madison, pp. 1027-1042.
- SPEECE, R. E. (1996). *Anaerobic biotechnology for industrial wastewater*. Ed. Archae Press, Nashville, Tennessee. 394p.
- SØRENSEN, B. H., NIELSEN, S. N. (1996). A model of Nitrogen Removal from Waste Water in a Fixed Bed Reactor Using Simultaneous Nitrification and Denitrification (SND). *Ecological Modeling*, v. 87, pp. 131-141.
- SOUZA, (1996). Pós-tratamento de Efluente de Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente em Reator Aeróbio Sequencial em Batelada e Coluna de Lodo Anaeróbio para Desnitrificação. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, USP.
- SÖZEN, S., ORHON, D. and SAN, H. A. (1996). A New Approach for the Evaluation of the Maximum Specific Growth Rate in Nitrification. *Water Research*, v. 30, nº 7, pp.1661-1669.
- SURAMPALLI, R. Y., TYAGI, R. D., SCHEIBLE, O. K. and HEIDMAN, J. A. (1997). Nitrification, Denitrification and Phosphorus Removal in Sequential Batch Reactors. *Bioresource Technology*, n. 61, pp. 151-157.

STANDARDS METHODS FOR EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER (1995). 19th ed. Amer. Public Health Association/American Water Works Association, Water Environment Federation, Washington, D. C. USA, 1134p.

SURMACZ-GORSKA, J., GERNAEY, K., DEMUYNCK, C., VANROLLEGHEM, P. and VERSTRAETE, W. (1996). Nitrification Monitoring in Activated Sludge by Oxygen Uptake Rate (OUR) Measurements. *Water Research*, v. 30, n^o. 5, pp. 1228-1236.

TAM, N. F. Y.; WONG, Y. S. and LEUNG, G. (1992). Effect of Exogenous Carbon Sources on Removal of Inorganic Nutrient by the Nitrification-Denitrification Process. *Water Science Technology*, v.26, pp. 1229-1236.

THALASSO, F., VALLECILLO, A., GARCÍA-ENCINA, P. and FDZ-POLANCO, F. (1997). The Use of Methane as a Sole Carbon Source for Wastewater Denitrification. *Water Research*, v. 31, n^o 1, pp. 55-60.

TIMUR, H. and ÖZTURK, J. (1999). Anaerobic Sequencing Batch Reactor Treatment of Landfill Leachate. *Water Research*, v. 33, n. 15, pp. 3225-3230.

TORRES, P. (1992). *Desempenho de um Reator Anaeróbico de Manta de Lodo (UASB) de Bancada no Tratamento de Substrato Sintético Simulando Esgoto Sanitário*. São Carlos. 185p Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo.

TSONIS, S. P. (1997). Olive Oil Mill Wastewater as Carbon Source in Post Anoxic Denitrification. *Water Science and Technology*, v. 36, n^o. 2-3, pp. 53-60

VAN HAANDEL. A., LETTINGA, G. (1994). *Tratamento Anaeróbico de Esgotos: Um Manual para Regiões de Clima Quente*. Epigraf., Campina Grande.

- VAN HAANDEL, A., MARAIS, G. (1999). *O Comportamento do Sistema de Lodo Ativado*. Epgraf., Campina Grande, 488 p..
- VAZZOLER, R.F. (1993). *Características e interações microbianas nos processos de tratamento biológico aeróbio e anaeróbio*. IN II CURSO DE TRATAMENTO BIOLÓGICO DE RESÍDUOS. EESC/USP-SÃO CARLOS.
- VIEIRA, L. G. T. (2000). *Desenvolvimento de Sistema Misto (Anaeróbio/Aeróbio) de Leito Fixo para Remoção de Nitrogênio de Esgoto Sanitário Pré-tratado em Reator Anaeróbio*. Tese (Doutorado) 144p. Escola de Engenharia de São Carlos, USP.
- VON SPERLING, M (1996) *Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias – Princípios básicos do tratamento de esgotos*. v.2.
- VON SPERLING, M (1997) *Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias – Lodos Ativados*. v.4.
- YU, T., BISHOP, P. L. (2001). Stratification and Oxidation-Reduction Potential Change in an Aerobic and Sulfate-Reducing Biofilm Studied Using Microelectrodes. *Water Environment Research*, v. 73, nº 3, pp. 368-373.
- WASIAK-WOUTERS, K.; HEDUIT, A.; AUDOIC, J.M; LEFEVRE, F. (1994). Real-time control of nitrogen removal at full-scale using oxidation reduction potential. *Water Science and Technology*. v. 30 , nº. 4, p. 206-210.
- WELANDER, U., HENRYSSON, T. and WELANDER, T. (1998). Biological Nitrogen Removal from Municipal Landfill Leachate in a Pilot Scale Suspended Carrier Biofilm Process. *Water Science and Technology*, v. 32, nº. 5, pp. 1564-1570.

WUHRMANN, K. (1964). Nitrogen Removal in Sewage Treatment Process. *Verh. Int. Ver. Limnol.*, v. 15, pp. 580-596.

ZHAO, HONG W. et al. (1997). Controlling Factors for Simultaneous Nitrification and Denitrification in a Two-Stage Intermittent Aeration process Treating Domestic Sewage. *Water Science Technology*, v.33, nº 4, pp 961-970.

ANEXO A

Dados obtidos na fase de adaptação
e partida do sistema

Tabela A1 - Valores do pH, ácidos voláteis (AV), alcalinidade total (AT), alcalinidade parcial (AP), alcalinidade intermediária (AI) e alcalinidade à bicarbonato (AB) encontrados para o substrato, RSBAe e RSBA_n na fase 1 do trabalho

Ciclo	Data	SUBSTRATO						RSBAe						RSBA _n						
		pH	AV	AT	AP	AI	AB	pH	AV	AT	AP	AI	AB	pH	AV	AT	AP	AI	AB	AI/AP
3	02/08/00 M	6,4	63	145	74	70	100	7,5	14	164	132	32	155	6,9	14	227	174	54	219	0,3
4	02/08/00 N	7,6	22	145	100	44	129	8,0	12	174	132	41	165	7,0	11	198	159	39	190	0,2
5	03/08/00 M	6,3	61	139	83	57	96	8,0	12	182	140	41	173	7,0	12	205	159	45	196	0,3
6	03/08/00 N	7,5	-	-	-	-	-	7,6	-	-	-	-	-	7,4	-	-	-	-	-	-
11	08/08/00	6,5	54	129	67	62	91	7,4	10	119	86	33	112	7,0	9	170	133	37	164	0,3
12	09/08/00	7,6	18	159	117	42	146	7,6	10	106	83	24	99	7,1	10	165	130	35	158	0,3
13	10/08/00	6,7	49	129	76	53	95	7,8	9	129	97	32	123	7,2	8	159	129	30	153	0,2
14	11/08/00	7,7	22	150	129	21	134	8,0	8	127	93	34	121	7,4	9	157	124	33	151	0,3
15	12/08/00	6,6	38	144	85	59	117	7,8	8	116	93	23	110	7,2	8	157	124	33	152	0,3
16	13/08/00	7,6	20	168	118	50	154	7,7	9	110	84	26	104	7,2	9	157	124	33	150	0,3
17	14/08/00	6,6	61	132	83	50	89	7,9	8	109	89	21	104	7,2	9	144	117	27	137	0,2
18	15/08/00	7,9	-	155	118	37	-	8,0	-	124	93	31	-	7,4	-	157	120	37	-	0,3
19	16/08/00	6,7	56	123	85	38	83	7,4	9	164	131	33	158	7,9	9	117	93	24	111	0,3
20	17/08/00 M	7,6	18	153	132	21	140	8,1	8	130	100	30	125	7,3	9	157	124	33	151	0,3
21	17/08/00 N	7,0	-	-	-	-	-	7,9	-	-	-	-	-	7,1	-	-	-	-	-	-
22	18/08/00 M	7,6	16	155	106	49	143	7,9	8	133	108	25	128	7,3	9	165	127	38	159	0,3
23	18/08/00 N	7,1	-	-	-	-	-	7,8	-	-	-	-	-	6,7	-	-	-	-	-	-
24	19/08/00 M	7,7	15	150	126	24	139	7,7	5	138	103	35	135	7,3	9	155	131	24	148	0,2
25	19/08/00 N	6,9	-	-	-	-	-	7,4	-	-	-	-	-	6,9	-	-	-	-	-	-

Tabela A1 - Valores do pH, ácidos voláteis (AV), alcalinidade total (AT), alcalinidade parcial (AP), alcalinidade intermediária (AI) e alcalinidade à bicarbonato (AB) encontrados para o substrato, RSBAe e RSBA_n na fase 1 do trabalho

[illegible]

Tabela A2 - Valores da Demanda Química de Oxigênio bruta (DQOB) e filtrada (DQOF) do substrato, RSBAe e RSBA_n; eficiência de remoção de DQOB (E_B) e filtrada (E_F) no RSBAe e eficiência de remoção de DQOB (ET_B) e DQOF (ET_F) para o sistema, na fase 1 do trabalho

Ciclo	Data	SUBSTRATO		RSBAe				RSBA _n					
		DQOB	DQOF	DQOB	DQOF	$E_B\%$	$E_F\%$	DQOB	DQOF	$ET_B\%$	$ET_F\%$	RD _A	RD _D
3	02/08/00 M	437	351	159	120	-	-	175	90	-	-	-333	-100
4	02/08/00 N	554	417	112	84	74	76	135	68	-	-	-349	-97
5	03/08/00 M	436	370	167	68	70	84	129	63	70	82	-320	-80
6	03/08/00 N	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11	08/08/00	487	342	35	29	-	-	73	42	-	-	-370	-80
12	09/08/00	559	396	20	27	96	92	48	45	-	-	-258	-17
13	10/08/00	507	358	29	28	95	93	83	69	83	80	-139	0
14	11/08/00	564	384	30	12	94	97	46	24	92	94	-290	-15
15	12/08/00	376	266	31	13	95	97	43	24	92	93	-138	-16
16	13/08/00	591	405	61	27	84	90	51	27	91	93	-50	-16
17	14/08/00	504	332	54	20	91	95	60	36	84	87	-52	-16
18	15/08/00	526	373	34	15	93	96	50	17	92	96	-58	-15
19	16/08/00	454	323	53	29	90	92	33	15	94	96	-158	-15
20	17/08/00 M	570	404	44	21	90	93	69	35	87	91	-191	-47
21	17/08/00 N	470	328	15	12	97	97	69	28	85	91	-86	-40
22	18/08/00 M	559	383	10	9	98	97	29	21	95	95	-97	-44
23	18/08/00 N	437	318	12	10	98	97	31	29	94	91	-101	-52
24	19/08/00 M	560	388	23	14	95	96	27	24	95	94	-117	-36
25	19/08/00 N	470	330	24	16	96	96	29	25	93	92	-101	-52

Tabela A3 - Valores de nitrogênio total (N-NTK), nitrogênio amoniacal (N-amon), nitrito (N-NO₂⁻), nitrato (N-NO₃⁻) encontrados para o substrato, RSBAe e RSBA_n, na fase 1 do trabalho

Ciclo	Data	SUBSTRATO				RSBAe				RSBA _n			
		N-NTK	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₂ ⁻	N-NO ₃ ⁻	N-NTK	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₂ ⁻	N-NO ₃ ⁻	N-NTK	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₂ ⁻	N-NO ₃ ⁻
3	02/08/00 M	-	-	0,0	3,2	-	-	0,0	0,7	-	-	0,0	0,9
4	02/08/00 N	-	-	0,0	3,6	-	-	0,0	0,0	-	-	0,0	0,0
5	03/08/00 M	-	-	0,0	3,5	-	-	0,0	0,7	-	-	0,0	0,0
6	03/08/00 N	5,8	-	-	-	1,7	-	-	-	13,3	-	-	-
11	08/08/00	31,8	0,7	0,0	3,0	2,9	0,6	0,1	13,0	7,5	4,2	0,0	0,0
12	09/08/00	-	1,0	0,0	3,6	-	1,0	0,0	12,0	-	3,5	0,0	0,0
13	10/08/00	-	0,0	0,0	3,9	-	0,3	0,0	7,8	-	3,9	0,3	0,0
14	11/08/00	-	0,0	0,0	3,3	-	0,0	0,0	7,8	-	2,7	0,0	0,0
15	12/08/00	-	0,6	0,0	3,0	-	0,0	0,0	9,6	-	2,5	0,0	0,0
16	13/08/00	26,0	0,1	0,0	4,4	-	0,7	0,1	13,2	-	2,0	0,8	2,9
17	14/08/00	26,6	0,7	0,0	3,2	1,2	-	0,2	12,9	11,6	-	0,7	3,7
18	15/08/00	-	0,0	0,1	3,2	-	0,4	0,1	10,0	-	1,9	1,0	1,7
19	16/08/00	27,8	0,7	0,0	2,8	2,9	0,0	0,0	7,1	6,9	0,0	0,0	0,0
20	17/08/00 M	-	0,6	0,0	3,5	-	0,4	0,0	7,1	-	2,5	0,0	0,0
21	17/08/00 N	20,2	0,0	0,0	2,8	1,7	0,0	0,0	5,2	5,8	2,0	0,0	0,0
22	18/08/00 M	-	0,0	0,0	3,0	-	0,0	0,0	5,8	-	1,4	0,0	0,0
23	18/08/00 N	26,0	1,6	0,0	3,7	1,7	0,0	0,1	5,6	7,2	4,6	0,0	0,0
24	19/08/00 M	-	0,1	0,0	3,3	-	0,0	0,0	5,2	-	1,4	0,0	0,0
25	19/08/00 N	-	-	0,0	3,6	-	-	0,0	4,9	-	-	0,0	0,0

Tabela A3 - Valores de nitrogênio total (N-NTK), nitrogênio amoniacal (N-amon), nitrito (N-NO₂⁻), nitrato (N-NO₃⁻) encontrados para o substrato, RSBAe e RSBAn, na fase 1 do trabalho

Ciclo	Data	SUBSTRATO				RSBAe				RSBAn			
		N-NTK	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₂ ⁻	N-NO ₃ ⁻	N-NTK	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₂ ⁻	N-NO ₃ ⁻	N-NTK	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₂ ⁻	N-NO ₃ ⁻
26	20/08/00	-	0,3	0,0	2,9	-	0,0	0,0	4,2	-	1,7	0,0	0,0
27	21/08/00	-	0,0	0,0	2,5	-	0,0	0,0	6,8	-	1,7	0,0	0,0
28	22/08/00	-	0,0	0,0	3,3	-	0,0	0,0	7,4	-	1,4	0,0	0,0
34	28/08/00	-	0,0	0,0	3,1	-	0,0	0,0	8,8	-	2,5	0,0	0,0
35	29/08/00	-	0,0	0,0	3,5	-	0,0	0,1	6,1	-	1,6	0,0	0,0
43	06/09/00	-	0,3	0,0	3,0	-	2,6	0,0	6,2	-	4,4	0,0	0,0
45	08/09/00	-	-	-	-	-	0,7	0,0	9,9	6,5	5,9	0,0	0,5
46	09/09/00	-	-	-	-	-	0,7	0,4	5,6	-	4,1	0,0	0,7
47	10/09/00	30,1	0,4	0,0	4,3	1,1	0,4	0,1	9,5	3,3	2,7	0,0	1,4
50	13/09/00	-	6,3	0,0	3,4	-	0,3	0,0	21,7	-	2,0	0,0	0,0
51	14/09/00	-	0,3	0,0	4,2	-	0,4	0,0	28,0	-	1,0	0,0	0,0
52	14/09/00	-	-	-	-	-	3,8	1,2	5,7	-	-	-	-
53	15/09/00	-	-	-	-	-	0,0	0,4	25,6	-	-	-	-
54	15/09/00	-	-	-	-	-	0,5	0,0	23,4	-	-	-	-
55	16/09/00	-	-	-	-	-	0,3	0,2	24,7	-	-	-	-
56	16/09/00	-	-	-	-	-	0,4	1,7	28,2	-	-	-	-
57	17/09/00	-	-	-	-	-	0,0	0,4	28,3	1,0	-	-	-

ANEXO B

**Dados obtidos na fase 2 do trabalho usando como fonte de carbono
substrato composto por 50% de proteínas 40% de carboidratos
e 10% de lipídeos**

Tabela B1 - Valores do pH, ácidos voláteis (AV), alcalinidade total (AT), alcalinidade parcial (AP), alcalinidade intermediária (AI) e alcalinidade à bicarbonato (AB) encontrados para o substrato, RSBAe e RSBA_n na fase 2 do trabalho

Relação DQO/N-NO ₃	Data	SUBSTRATO						RSBAe						RSBA _n						
		pH	AV	AT	AP	AI	AB	pH	AV	AT	AP	AI	AB	pH	AV	AT	AP	AI	AB	AI/AP
0	18/09/00	7,6	30	146	106	40	125	7,5	14	41	31	10	31	7,4	14	156	132	24	146	0,2
	19/09/00	7,4	28	146	96	51	126	7,3	14	37	28	9	27	7,9	15	157	136	21	147	0,2
	20/09/00	7,5	-	-	-	-	-	7,3	-	-	-	-	-	7,8	-	-	-	-	-	-
0,5	21/09/00	7,8	32	208	156	52	185	7,5	13	63	53	10	54	7,3	14	158	137	21	148	0,2
	22/09/00	7,5	-	-	-	-	-	7,6	-	-	-	-	-	7,4	-	-	-	-	-	-
	23/09/00	7,6	-	-	-	-	-	7,5	-	-	-	-	-	7,4	-	-	-	-	-	-
1	25/09/00	7,2	21	138	102	35	122	7,3	10	38	28	10	31	7,2	11	142	103	39	135	0,4
	27/09/00	7,2	24	137	107	29	120	7,3	11	39	29	10	31	7,2	10	146	117	29	139	0,3
	28/09/00	7,6	20	132	102	29	117	7,6	8	76	52	24	70	7,1	8	158	120	38	153	0,3
2	29/09/00	7,0	-	-	-	-	-	7,7	-	-	-	-	-	7,2	-	-	-	-	-	-
	01/10/00	7,2	-	-	-	-	-	7,7	-	-	-	-	-	7,2	-	-	-	-	-	-
	02/10/00	7,3	29	131	88	43	110	7,8	8	71	54	18	66	7,2	8	146	117	29	141	0,3
5	03/10/00	7,5	-	-	-	-	-	7,8	-	-	-	-	-	7,0	-	-	-	-	-	-
	04/10/00	6,8	40	140	91	49	112	7,8	6	62	48	14	58	7,2	7	192	151	41	187	0,3
	05/10/00	6,9	-	-	-	-	-	7,8	-	-	-	-	-	7,1	-	-	-	-	-	-
10	06/10/00	6,5	-	-	-	-	-	7,8	-	-	-	-	-	7,2	-	-	-	-	-	-
	07/10/00	6,3	-	-	-	-	-	7,7	-	-	-	-	-	7,0	-	-	-	-	-	-
	09/10/00	6,2	35	155	120	35	129	7,6	11	67	56	12	60	7,0	11	216	173	43	209	0,3
14	10/10/00	7,4	-	-	-	-	-	7,5	-	-	-	-	-	7,1	-	-	-	-	-	-
	27/10/00	7,3	39	115	72	43	88	7,3	9	72	60	12	66	6,9	21	307	250	58	292	0,2
	28/10/00	7,6	-	-	-	-	-	7,6	-	-	-	-	-	7,0	-	-	-	-	-	-

Tabela B2 - Valores da Demanda Química de Oxigênio bruta (DQOB) e filtrada (DQOF) do substrato, RSBAe e RSBA_n; eficiência de remoção de DQOB (E_B) e filtrada (E_F) no RSBAe e no RSBA_n e o potencial redox (pR) medido antes e depois da mistura no RSBA_n, na fase 2 do trabalho

Relação DQO/N-NO ₃	Ciclo	Data	SUBSTRATO		RSBAe				F.C.(no reator)		RSBA _n					
			DQO _B	DQO _F	DQO _B	DQO _F	E _B %	E _F %	DQO _B	DQO _F	DQO _B	DQO _F	E _B %	E _F %	pR _A	pR _D
0	1	18/09/00	461	389	30	25	-	-	-	-	45	25	-	-	-130	70
	2	19/09/00	541	372	33	26	93	93	-	-	39	34	-	-	-131	70
	3	20/09/00	530	380	34	27	94	93	-	-	40	35	0	0	-130	68
0,5	4	21/09/00	423	397	28	26	95	93	17	16	42	34	0	0	-128	85
	5	22/09/00	414	382	24	21	94	95	17	15	36	34	19	19	-135	67
	6	23/09/00	416	380	25	20	94	95	17	15	37	33	9	8	-131	68
1	8	25/09/00	457	374	22	20	-	-	37	30	24	25	-	-	-130	70
	10	27/09/00	456	373	23	19	-	-	36	30	24	24	-	-	-130	70
	11	28/09/00	497	406	13	13	97	97	40	32	17	17	72	66	-125	94
2	12	29/09/00	369	307	17	17	97	96	59	49	21	21	60	54	-30	129
	14	01/10/00	480	340	16	16	-	-	77	54	17	18	-	-	-11	180
	15	02/10/00	475	336	15	15	97	96	76	54	16	17	83	77	-9	198
5	16	03/10/00	494	397	17	17	96	95	198	159	25	21	73	70	-20	170
	17	04/10/00	486	367	14	13	97	97	194	147	23	23	89	87	-159	82
	18	05/10/00	490	370	15	14	97	96	196	148	23	23	89	86	-160	80
10	19	06/10/00	549	406	14	12	97	97	439	325	21	21	90	87	-160	80
	20	07/10/00	540	400	13	12	98	97	432	320	25	20	94	94	-290	100
	22	09/10/00	545	410	12	12	-	-	436	328	25	21	94	94	-399	128
14	23	10/10/00	436	352	14	15	97	96	488	394	27	23	-	-	-435	97
	40	27/10/00	414	326	17	17	-	-	464	365	68	49	-	-	-436	124
	41	28/10/00	513	392	17	16	96	95	575	438	65	49	87	87	-433	118

Tabela B3 - Valores de nitrogênio total (N-NTK), nitrogênio amoniacal (N-amon), nitrito (N-NO₂⁻), nitrato (N-NO₃⁻) encontrados para o substrato, RSBAe e RSBA_n, na fase 2 do trabalho

Relação DQO/N-NO ₃	Ciclo	Data	SUBSTRATO				RSBAe				RSBA _n			
			N-NTK	N-amon	N-NO ₂ ⁻	N-NO ₃ ⁻	N-NTK	N-amon	N-NO ₂ ⁻	N-NO ₃ ⁻	N-NTK	N-amon	N-NO ₂ ⁻	N-NO ₃ ⁻
0	1	18/09/00	-	0,0	0,0	3,5	-	0,3	0,1	29,5	-	5,7	0,0	0,8
	2	19/09/00	33,9	1,4	0,0	4,8	1,1	0,0	0,9	32,7	6,6	4,4	0,0	1,1
	3	20/09/00	34,0	1,5	0,0	4,7	1,2	0,2	0,2	32,0	6,4	4,5	0,0	1,0
0,5	4	21/09/00	-	0,0	0,0	5,1	-	0,1	0,0	31,6	-	6,6	0,0	0,0
	5	22/09/00	26,8	0,1	0,0	4,7	0,4	0,4	0,2	31,6	6,3	6,3	0,0	1,2
	6	23/09/00	27,0	0,0	0,0	4,3	0,3	0,3	0,1	30,0	6,4	6,4	0,0	1,0
1	8	25/09/00	33,3	1,9	0,0	4,4	0,5	0,4	0,2	34,9	5,5	4,4	0,2	1,4
	10	27/09/00	-	2,0	0,0	4,6	-	0,3	0,2	30,8	-	0,4	0,2	1,3
	11	28/09/00	33,9	0,3	0,0	4,7	0,5	0,5	0,8	22,6	8,7	3,5	0,0	0,5
2	12	29/09/00	-	0,5	0,0	3,0	-	0,3	0,0	21,4	-	3,9	0,0	0,0
	14	01/10/00	-	0,1	0,0	3,8	-	0,3	0,0	22,0	-	3,1	0,0	0,4
	15	02/10/00	35,5	0,0	0,0	4,0	0,3	0,3	0,0	21,5	8,9	3,0	0,0	0,5
5	16	03/10/00	-	0,3	0,0	4,2	-	0,0	0,0	22,6	-	1,9	0,0	0,7
	17	04/10/00	32,8	0,3	0,0	4,3	0,5	0,5	0,0	26,7	5,4	5,4	0,0	0,5
	18	05/10/00	32,0	0,2	0,0	4,2	0,6	0,5	0,0	27,0	5,4	5,2	0,0	0,6
10	19	06/10/00	-	-	0,0	4,9	-	-	0,0	25,4	-	-	0,0	0,0
	20	07/10/00	32,0	2,0	0,0	5,0	0,5	0,5	0,0	30,0	5,0	4,6	0,0	0,6
	22	09/10/00	33,3	2,2	0,0	5,8	0,5	0,5	0,0	29,0	6,0	4,5	0,0	0,7
14	23	10/10/00	-	-	0,1	4,2	-	-	0,0	27,2	-	-	0,0	1,1
	40	27/10/00	27,3	1,1	0,0	5,8	0,3	0,3	0,0	29,0	17,5	13,9	0,0	0,7
	41	28/10/00	-	-	0,0	5,2	-	-	0,0	22,4	-	-	0,0	0,0

Tabela B4 - Perfis realizados no RSBA, na fase 2 do trabalho, com o uso da relação DQO/N-NO₃⁻ igual a 0, com monitoramento do pR, N-NO₂⁻ e N-NO₃⁻

18/09/00

T. de anál.	N-NO ₂ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ % rem.	N-NO _x % rem.	Redox (mV)	
					antes	depois
0,00	0,06	18,43	0	0	110	67
0,33	0,07	18,10	2	2	105	70
0,67	0,12	19,53	0	0	110	79
1,00	0,17	19,09	0	0	108	80
1,33	0,15	16,34	11	11	110	81
1,67	0,21	18,76	0	0	121	81
2,00	0,06	16,45	11	11	122	81
2,33	0,14	15,83	14	14	122	85
2,67	0,21	16,23	12	11	134	96
3,00	0,12	13,63	26	26	135	97
5,00	0,28	12,53	32	31	141	99
7,00	0,28	10,51	43	42	145	100
9,00	0,30	7,77	58	56	145	100
11,00	0,47	7,51	59	57	122	92

19/09/00

T. de anál.	N-NO ₂ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ % rem.	N-NO _x % rem.	Redox (mV)	
					antes	depois
0,00	0,49	21,28	0	0	20	25
0,33	0,47	20,95	2	2	20	24
0,67	0,39	18,24	14	14	21	31
1,00	0,42	18,54	13	13	20	20
1,33	0,40	15,72	26	26	22	24
1,67	0,54	15,90	25	25	22	23
2,00	0,46	17,07	20	19	22	23
2,33	0,42	15,79	26	26	32	30
2,67	0,37	16,85	21	21	33	28
3,00	0,48	15,90	25	25	33	34
5,00	0,69	13,33	37	36	34	32
7,00	0,58	9,60	55	53	34	37
9,00	0,56	6,89	68	66	34	36
11,00	0,71	5,86	72	70	32	30

Tabela B4 - Perfis realizados no RSBA_n, na fase 2 do trabalho, com o uso da relação DQO/N-NO₃⁻ igual a 0, com monitoramento do pR, N-NO-2 e N-NO₃⁻ (cont.)

20/09/00

T. de anál.	N-NO ₂ (mg/l)	N-NO ₃ (mg/l)	N-NO ₃ % rem.	N-NO _x % rem.	Redox (mV)	
					antes	depois
0,00	0,40	20,00	0	0	21	24
0,33	0,45	19,80	1	1	22	23
0,67	0,38	18,30	9	8	20	30
1,00	0,38	18,10	9	9	21	19
1,33	0,39	15,20	24	24	23	22
1,67	0,50	15,30	24	23	23	21
2,00	0,40	16,90	16	15	21	22
2,33	0,39	15,00	25	25	31	29
2,67	0,35	16,20	19	19	32	29
3,00	0,45	15,30	24	23	32	32
5,00	0,58	13,10	35	33	33	31
7,00	0,52	10,00	50	48	33	38
9,00	0,50	7,10	65	63	35	37
11,00	0,60	6,00	70	68	31	31

Tabela B5 - Perfis realizados no RSBA_n, na fase 2 do trabalho, com o uso da relação DQO/N-NO₃⁻ igual a 0,5, com monitoramento do pR, N-NO₂⁻, N-NO₃⁻ e DQO_F

21/09/00

T. de anál.	N-NO ₂ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ % rem.	N-NO _x % rem.	Redox (mV)	
					antes	depois
0,00	0,06	19,82	0	0	85	70
0,33	0,13	18,68	6	5	115	85
0,67	0,26	18,94	4	3	98	82
1,00	0,37	16,92	15	13	110	90
1,33	0,51	17,51	12	9	115	95
1,67	0,50	15,68	21	19	125	100
2,00	0,45	14,29	28	26	132	100
2,33	0,42	12,53	37	35	137	110
2,67	0,57	13,77	30	28	140	112
3,00	0,57	12,71	36	33	149	120
3,33	0,51	12,53	37	34	152	123
3,67	0,69	12,64	36	33	154	127
5,67	0,85	8,79	56	51	160	136
7,67	1,00	6,92	65	60	172	142
9,67	1,05	4,43	78	72	167	141
11,67	1,09	4,25	79	73	160	140

22/09/00

T. de anál.	N-NO ₂ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ % rem.	N-NO _x % rem.	Redox (mV)		DQO _F (mg/l)
					antes	depois	
0,00	0,19	19,34	0	0	67	60	35
0,33	0,23	18,57	4	4	100	96	37
0,67	0,41	20,15	0	0	117	101	35
1,00	0,44	16,34	16	14	129	109	35
1,33	0,58	16,85	13	11	151	117	27
1,67	0,63	16,12	17	14	153	120	29
2,00	0,70	15,39	20	18	153	124	31
2,33	0,75	14,76	24	21	160	126	27
2,67	0,81	15,02	22	19	164	134	27
3,00	0,81	13,55	30	26	169	136	24
3,33	0,81	13,77	29	25	172	139	26
3,67	0,88	12,68	34	31	174	141	26
5,67	0,98	9,23	52	48	176	142	28
7,67	1,13	7,22	63	57	176	149	28
9,67	1,32	5,39	72	66	178	147	25
11,67	0,98	3,81	80	75	170	142	28

Tabela B5 - Perfis realizados no RSBA_n, na fase 2 do trabalho, com o uso da relação DQO/N-NO₃⁻ igual a 0,5, com monitoramento do pR, N-NO-2 e N-NO₃⁻ (cont.)

23/09/00

T. de anál.	N-NO ₂ (mg/l)	N-NO ₃ (mg/l)	N-NO ₃ % rem.	N-NO _x % rem.	Redox (mV)	
					antes	depois
0,00	0,18	20,00	0	0	58	55
0,33	0,22	19,00	5	5	90	85
0,67	0,42	21,00	0	0	100	72
1,00	0,43	17,00	15	14	130	85
1,33	0,55	16,50	18	16	148	83
1,67	0,62	16,70	17	14	150	122
2,00	0,71	15,00	25	22	151	120
2,33	0,74	14,90	26	22	150	123
2,67	0,82	15,00	25	22	160	130
3,00	0,81	14,00	30	27	159	135
3,33	0,80	13,70	32	28	170	140
3,67	0,85	13,00	35	31	170	141
5,67	0,90	9,00	55	51	175	145
7,67	0,90	7,30	64	59	175	150
9,67	1,20	5,30	74	68	181	145
11,67	1,00	4,00	80	75	175	142

Tabela B6 - Perfis realizados no RSBA_n, na fase 2 do trabalho, com o uso da relação DQO/N-NO₃⁻ igual a 1,0, com monitoramento do pR, N-NO₂⁻, N-NO₃⁻ e DQO_F

25/09/00

T. de anál.	N-NO ₂ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ % rem.	N-NO _x % rem.	Redox (mV)	
					antes	depois
0,00	0,05	17,62	0	0	120	100
0,33	0,18	17,99	0	0	160	140
0,67	0,20	18,65	0	0	155	130
1,00	0,22	16,92	4	3	147	140
1,33	0,27	16,59	6	5	173	150
1,67	0,42	17,84	0	0	179	151
2,00	0,58	15,24	14	10	188	162
2,33	0,55	16,27	8	5	188	161
2,67	0,59	16,78	5	2	196	170
3,00	0,60	14,91	15	12	196	171
3,33	0,58	13,92	21	18	199	179
3,67	0,77	15,17	14	10	200	179
5,67	1,35	14,43	18	11	206	185
7,67	1,08	9,71	45	39	209	189
9,67	1,38	9,85	44	36	205	185
11,67	1,38	10,11	43	35	200	180

27/09/00

T. de anál.	N-NO ₂ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ % rem.	N-NO _x % rem.	Redox (mV)		DQO _F (mg/l)
					antes	depois	
0,00	0,07	15,17	0	0	120	100	21
0,33	0,12	15,13	0	0	160	140	17
0,67	0,18	13,92	8	7	155	130	15
1,00	0,21	12,60	17	16	147	140	16
1,33	0,35	15,17	0	0	173	150	16
1,67	0,39	13,08	14	12	179	151	15
2,00	0,18	12,05	21	20	188	162	14
2,33	0,19	12,49	18	17	188	161	13
2,67	0,32	12,05	21	19	196	170	12
3,00	0,27	10,84	29	27	196	171	13
3,33	0,27	11,06	27	26	199	179	14
3,67	0,55	10,40	31	28	200	179	15
5,67	0,28	9,34	38	37	206	185	14
7,67	0,34	6,48	57	55	209	189	12
9,67	0,31	6,34	58	56	205	185	13
11,67	0,28	5,71	62	61	200	180	13

Tabela B6 - Perfis realizados no RSBA_n, na fase 2 do trabalho, com o uso da relação DQO/N-NO₃⁻ igual a 1,0, com monitoramento do pR, N-NO-2 e N-NO₃⁻ (cont.)

28/09/00

T. de anál.	N-NO ₂ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ % rem.	N-NO _x % rem.	Redox (mV)	
					antes	depois
0,00	0,38	13,08	0	0	160	122
2,00	0,72	10,40	20	17	172	150
4,00	0,79	7,66	41	37	187	165
6,00	0,68	5,57	57	54	191	155
8,00	0,58	3,52	73	70	188	160
10,00	0,32	2,23	83	81	189	148
12,00	0,30	1,69	87	85	176	160

Tabela B7 - Perfis realizados no RSBA_n, na fase 2 do trabalho, com o uso da relação DQO/N-NO₃⁻ igual a 2,0, com monitoramento do pR, N-NO₂⁻, N-NO₃⁻ e DQO_F

29/09/00

T. de anál.	N-NO ₂ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ % rem.	N-NO _x % rem.	Redox (mV)	
					antes	depois
0,00	0,05	12,42	0	0	129	87
2,00	0,63	7,69	38	33	167	139
4,00	0,81	6,01	52	45	179	155
6,00	0,94	4,65	63	55	190	158
8,00	0,66	2,60	79	74	191	158
10,00	0,14	0,95	92	91	189	160
12,00	0,00	0,84	93	93	185	161

01/10/00

T. de anál.	N-NO ₂ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ % rem.	N-NO _x % rem.	Redox (mV)	
					antes	depois
0,00	0,17	13,00	0	0	129	87
2,00	0,63	10,00	23	19	167	139
4,00	0,81	6,00	54	48	179	155
6,00	0,94	5,50	58	51	190	158
8,00	0,66	2,90	78	73	191	158
10,00	0,20	1,50	88	87	189	160
12,00	0,15	1,20	91	90	185	161

02/10/00

T. de anál.	N-NO ₂ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ % rem.	N-NO _x % rem.	Redox (mV)		DQO _F (mg/l)
					antes	depois	
0,00	0,17	12,89	0	0	198	180	34,5
0,33	0,22	12,02	7	6	190	170	30
0,67	0,35	11,10	14	12	180	160	30
1,00	0,49	9,45	27	24	159	173	32
1,33	0,63	10,29	20	16	159	162	27
1,67	0,68	10,84	16	12	170	151	26
2,00	0,73	10,40	19	15	182	169	26
2,33	0,77	8,02	38	33	196	176	26
2,67	0,85	8,10	37	32	201	180	23
3,00	0,93	7,40	43	36	204	180	21
3,33	0,92	7,33	43	37	205	182	20
3,67	0,98	6,74	48	41	209	184	20
5,67	0,90	5,57	57	50	212	193	20
7,67	0,78	3,04	76	71	211	191	17
9,67	0,21	1,54	88	87	198	178	18
11,67	0,16	1,28	90	89	196	175	18

Tabela B8 - Perfis realizados no RSBA_n, na fase 2 do trabalho, com o uso da relação DQO/N-NO₃⁻ igual a 5,0, com monitoramento do pR, N-NO₂⁻, N-NO₃⁻ e DQO_F

03/10/00

T. de anál.	N-NO ₂ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ % rem.	N-NO _x % rem.	Redox (mV)	
					antes	depois
0,00	0,27	13,00	0	0	166	150
2,00	1,43	7,80	40	30	144	144
4,00	1,65	5,97	54	43	147	150
6,00	0,88	3,11	76	70	148	148
8,00	0,11	1,61	88	87	153	137
10,00	0,00	1,06	92	92	-4	101
12,00	0,00	0,00	100	100	-60	0

05/10/00

T. de anál.	N-NO ₂ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ % rem.	N-NO _x % rem.	Redox (mV)	
					antes	depois
0,00	0,40	15,00	0	0	142	131
2,00	1,00	4,90	67	62	140	115
4,00	0,40	2,00	87	84	130	115
6,00	0,00	0,55	96	96	-50	-2
8,00	0,00	0,00	100	100	-80	-45
10,00	0,00	0,00	100	100	-89	-63
12,00	0,00	0,00	100	100	-100	-80

04/10/00

T. de anál.	N-NO ₂ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ % rem.	N-NO _x % rem.	Redox (mV)		DQO _F (mg/l)
					antes	depois	
0,00	0,49	14,95	0	0	140	131	99
0,33	0,74	14,54	3	1	120	104	73
0,67	0,90	11,47	23	20	129	111	58
1,00	1,16	9,71	35	30	139	120	51
1,33	1,25	8,06	46	40	140	120	40
1,67	1,25	6,04	60	53	135	120	38
2,00	1,15	4,65	69	62	136	120	35
2,33	1,00	3,85	74	69	135	120	33
2,67	0,70	2,49	83	79	134	119	27
3,00	0,63	2,42	84	80	134	114	28
3,33	0,41	1,76	88	86	134	108	24
3,67	0,34	1,28	91	89	120	120	19
5,67	0,00	0,55	96	96	-47	0	18
7,67	0,00	0,00	100	100	-75	-42	18
9,67	0,00	0,00	96	96	-89	-62	21
11,67	0,00	0,00	100	100	-102	-73	22

Tabela B9 - Perfis realizados no RSBA_n, na fase 2 do trabalho, com o uso da relação DQO/N-NO₃⁻ igual a 10, com monitoramento do pR, N-NO₂⁻, N-NO₃⁻ e DQO_F

06/10/00

T. de anál.	N-NO ₂ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ % rem.	N-NO _x % rem.	Redox (mV)	
					antes	depois
0,00	1,19	13,96	0	0	120	76
2,00	1,06	11,14	20	19	121	80
4,00	0,19	1,80	87	87	112	79
6,00	0,00	0,92	93	94	-121	-118
8,00	0,00	0,81	94	95	-158	-152
10,00	0,00	0,66	95	96	-164	-155
12,00	0,00	0,00	100	100	-172	-160

07/10/00

T. de anál.	N-NO ₂ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ % rem.	N-NO _x % rem.	Redox (mV)	
					antes	depois
0,00	1,00	19,00	0	0	130	80
2,00	0,65	0,84	96	93	80	60
4,00	0,00	0,00	100	100	-375	-356
6,00	0,00	0,00	100	100	-430	-360
8,00	0,00	0,00	100	100	-431	-380
10,00	0,00	0,00	100	100	-430	-360
12,00	0,00	0,00	100	100	-429	-360

09/10/00

T. de anál.	N-NO ₂ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ % rem.	N-NO _x % rem.	Redox (mV)		DQO _F (mg/l)
					antes	depois	
0,00	0,93	20,22	0	0	128	75	201
0,33	1,00	12,13	40	38	83	62	155
0,67	1,19	10,22	49	46	83	74	128
1,00	1,07	6,63	67	64	84	76	112
1,33	1,12	5,49	73	69	100	73	102
1,67	0,80	3,66	82	79	86	69	74
2,00	0,60	0,84	96	93	79	54	79
2,33	0,03	0,62	97	97	0	-30	63
2,67	0,00	0,62	97	97	-150	-142	48
3,00	0,00	0,00	100	100	-301	-283	47
3,33	0,00	0,00	100	100	-368	-348	44
3,67	0,00	0,00	100	100	-375	-355	44
5,67	0,00	0,00	100	100	-425	-358	34
7,67	0,00	0,00	100	100	-430	-379	33
9,67	0,00	0,00	100	100	-426	-365	31
11,67	0,00	0,00	100	100	-429	-379	26

Tabela B10 - Perfis realizados no RSBA_n, na fase 2 do trabalho, com o uso da relação DQO/N-NO₃⁻ igual a 14, com monitoramento do pR, N-NO₂⁻, N-NO₃⁻ e DQO_F

10/10/00

T. de anál.	N-NO ₂ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ % rem.	N-NO _x % rem.	Redox (mV)	
					antes	depois
0,00	0,97	10,59	0	0	97	55
2,00	0,00	1,87	82	84	-371	-365
4,00	0,00	0,00	100	100	-442	-423
6,00	0,00	0,00	100	100	-443	-430
8,00	0,00	0,00	100	100	-441	-429
10,00	0,00	0,00	100	100	-441	-426
12,00	0,00	0,00	100	100	-442	-427

28/10/00

T. de anál.	N-NO ₂ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ % rem.	N-NO _x % rem.	Redox (mV)	
					antes	depois
0,00	1,33	12,89	0	0	118	55
2,00	0,00	1,87	86	87	-371	-365
4,00	0,00	0,00	100	100	-437	-423
6,00	0,00	0,00	100	100	-438	-430
8,00	0,00	0,00	100	100	-438	-429
10,00	0,00	0,00	100	100	-439	-426
12,00	0,00	0,00	100	100	-439	-427

27/10/00

T. de anál.	N-NO ₂ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ % rem.	N-NO _x % rem.	Redox (mV)		DQO _F (mg/l)
					antes	depois	
0,00	0,97	10,22	0	0	124	93	244
0,33	1,31	7,47	27	21	95	75	210
0,67	1,36	5,17	49	42	101	77	172
1,00	0,92	3,00	71	65	100	56	148
1,33	0,16	1,87	82	82	70	14	127
1,67	0,00	1,80	82	84	-273	-279	122
2,00	0,00	0,00	100	100	-365	-352	111
2,33	0,00	1,21	88	89	-384	-380	108
2,67	0,00	1,21	88	89	-390	-385	106
3,00	0,00	1,25	88	89	-430	-427	105
3,33	0,00	0,00	100	100	-437	-419	102
3,67	0,00	0,00	100	100	-438	-422	99
5,67	0,00	0,00	100	100	-435	-414	88
7,67	0,00	0,00	100	100	-436	-417	70
9,67	0,00	0,00	100	100	-438	-420	70
11,67	0,00	0,00	100	100	-440	-419	70

Tabela B11 - Perfil realizado no RSBA_n, na fase 2 do trabalho, com o uso da relação DQO/N-NO₃⁻ igual a 14 envolvendo todos os parâmetros de monitoramento

02/11/00

T. de anál.	N-NO ₂ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ % rem.	N-NO _x % rem.	Redox (mV)		DQO _f (mg/l)	pH	Ác.Vol.	Alcal.	N-am (mg/l)	NTK (mg/l)	P	C	L
					antes	depois									
0,00	2,43	12,71	0	0	80	66	239	7,4	20	246	6,6	38,3	237	46	5
0,33	2,77	8,50	33	26	71	55	231	7,4	18	255			210	60	7
0,67	2,29	5,24	59	50	68	45	179	7,4	17	262			219	58	6
1,00	0,20	2,42	81	83	16	0	145	7,5	18	255			172	39	4
1,33	0,00	2,27	82	85	-302	-298	128	7,5	18	266			152	22	3
1,67	0,00	2,27	82	85	-378	-360	110	7,4	18	267			130	31	2
2,00	0,00	1,43	89	91	-387	-380	95	7,4	18	273	8,5	38,3	130	25	2
2,33	0,00	0,00	100	100	-426	-417	96	7,3	18	289			103	21	1
2,67	0,00	0,00	100	100	-437	-430	82	7,3	18	282			98	18	2
3,00	0,00	0,00	100	100	-440	-423	78	7,3	17	287			87	9	3
3,33	0,00	0,00	100	100	-439	-425	75	7,3	15	287			84	10	5
3,67	0,00	0,00	100	100	-439	-430	70	7,3	15	284	10,7	32,8	72	8	3
5,67	0,00	0,00	100	100	-444	-428	71	7,2	16	287	13,9	27,3	74	9	4
7,67	0,00	0,00	100	100	-441	-430	63	7,1	19	278	14,5	27,3	74	6	2
9,67	0,00	0,00	100	100	-439	-433	58	7,1	17	284	14,5	26,2	66	6	3
11,67	0,00	0,00	100	100	-439	-423	50	7,1	16	289	14,5	24,6	67	6	2

Figura B1- Curvas de decaimento de nitrato de primeira ordem ajustadas para os perfis das Fase 2 do trabalho

Figura B1- Curvas de decaimento de nitrato de primeira ordem ajustadas para os perfis das Fase 2 do trabalho (cont.)

ANEXO C

**Dados obtidos na fase 3 do trabalho usando como fonte de carbono
substrato composto por 70% de proteínas 15% de carboidratos
e 15% de lipídeos**

Tabela C1 - Valores do pH, ácidos voláteis (AV), alcalinidade total (AT), alcalinidade parcial (AP), alcalinidade intermediária (AI) e alcalinidade à bicarbonato (AB) encontrados para o substrato, RSBAe e RSBA_n na fase 3 do trabalho

Relação DQO/N-NO ₃	Ciclo	Data	SUBSTRATO						RSBAe						RSBAn						
			pH	AV	AT	AP	AI	AB	pH	AV	AT	AP	AI	AB	pH	AV	AT	AP	AI	AB	AI/AP
0	1	06/11/00	7,5	-	-	-	-	-	7,6	-	-	-	-	-	7,1	-	-	-	-	-	-
	2	07/11/00	7,4	-	-	-	-	-	7,5	-	-	-	-	-	7,0	-	-	-	-	-	-
2	3	08/11/00	7,0	22	141	113	28	126	7,7	7	48	38	10	43	7,2	11	134	101	34	127	0,3
	4	09/11/00	7,6	-	-	-	-	-	7,3	-	-	-	-	-	7,1	-	-	-	-	-	-
	5	10/11/00	7,2	-	-	-	-	-	7,5	-	-	-	-	-	7,1	-	-	-	-	-	-
5	9	14/11/00	7,6	31	156	110	46	134	7,3	8	44	32	12	38	6,9	13	153	104	49	144	0,5
	11	16/11/00	7,6	25	114	113	1	96	7,4	11	43	29	14	35	7,1	70	196	160	36	147	0,2
	12	17/11/00	7,0	-	-	-	-	-	7,7	-	-	-	-	-	7,6	-	-	-	-	-	-
10	14	19/11/00	7,7	-	-	-	-	-	7,5	-	-	-	-	-	7,1	-	-	-	-	-	-
	15	20/11/00	7,8	23	143	111	32	127	7,6	18	47	35	12	34	7,3	18	225	183	42	213	0,2
	16	21/11/00	7,7	-	-	-	-	-	7,5	-	-	-	-	-	7,1	-	-	-	-	-	-
14	17	22/11/00	7,7	-	-	-	-	-	7,6	-	-	-	-	-	7,2	-	-	-	-	-	-
	18	23/11/00	7,8	22	131	100	31	115	7,3	16	47	37	10	36	7,0	13	301	242	59	291	0,2

Tabela C2 - Valores da Demanda Química de Oxigênio bruta (DQOB) e filtrada (DQOF) do substrato, RSBAe e RSBA_n; eficiência de remoção de DQOB (E_B) e filtrada (E_F) no RSBAe e no RSBA_n e o potencial redox (pR) antes e depois da mistura no RSBA_n na fase 3 do trabalho

Relação	Ciclo	Data	SUBSTRATO		RSBAe				F.C. (no reator)		RSBA _n					
			DQOB	DQOF	DQOB	DQOF	$E_B\%$	$E_F\%$	DQOB	DQOF	DQOB	DQOF	$E_B\%$	$E_F\%$	pR _A	pR _D
0	1	06/11/00	470	344	20	13	-	-	-	-	31	23	-	-	-350	104
	2	07/11/00	482	350	21	13	96	96	-	-	30	22	-	-	-340	100
2	3	08/11/00	428	410	25	18	95	95	75	48	25	22	-	-	124	209
	4	09/11/00	386	336	33	17	92	96	-	-	33	26	67	61	141	204
	5	10/11/00	380	340	32	16	92	95	-	-	32	25	-	-	140	200
5	9	14/11/00	442	396	26	21	-	-	-	-	32	28	-	-	153	200
	11	16/11/00	489	398	27	23	-	-	151	113	32	27	-	-	-242	180
	12	17/11/00	394	367	12	16	98	96	156	120	20	20	89	86	-261	153
10	14	19/11/00	508	396	23	18	-	-	324	239	28	26	-	-	7	140
	15	20/11/00	505	385	21	21	96	95	328	231	35	30	90	88	-306	150
	16	21/11/00	500	380	22	20	96	95	-	-	32	29	91	88	-330	160
14	17	22/11/00	483	374	19	14	96	96	500	341	34	25	-	-	-353	96
	18	23/11/00	469	359	25	26	95	93	501	339	68	67	87	82	-432	55

Tabela C3 - Valores de nitrogênio total (N-NTK), nitrogênio amoniacal (N-amon), nitrito (N-NO₂⁻), nitrato (N-NO₃⁻) encontrados para o substrato, RSBAe e RSBA_n, na fase 3 do trabalho

Relação	Ciclo	Data	SUBSTRATO				RSBAe				RSBA _n			
			N-NTK	N-amon	N-NO ₂ ⁻	N-NO ₃ ⁻	N-NTK	N-amon	N-NO ₂ ⁻	N-NO ₃ ⁻	N-NTK	N-amon	N-NO ₂ ⁻	N-NO ₃ ⁻
0	1	06/11/00	-	-	0,0	4,3	-	-	0,0	23,3	-	-	0,0	0,0
	2	07/11/00	-	-	0,0	4,0	-	-	0,0	24,0	-	-	0,0	0,0
2	3	08/11/00	33,3	0,8	0,0	5,3	0,0	0,5	0,1	30,3	2,2	0,2	0,3	1,4
	4	09/11/00	-	-	0,0	5,2	-	-	0,0	24,8	-	-	0,4	2,1
	5	10/11/00	-	-	0,0	5,0	-	-	0,1	25,0	-	-	0,2	2,0
5	9	14/11/00	-	0,3	0,0	5,0	-	0,0	0,1	27,0	-	1,9	2,2	4,2
	11	16/11/00	-	-	0,0	5,7	-	-	0,0	32,4	-	-	0,0	0,0
	12	17/11/00	33,9	0,1	0,0	5,3	0,0	0,0	0,1	30,3	6,6	4,4	0,1	0,7
10	14	19/11/00	-	-	0,0	6,2	-	-	0,0	30,2	-	-	0,0	1,0
	15	20/11/00	35,5	0,5	0,0	5,6	0,5	0,4	0,0	33,0	9,2	6,0	0,0	1,2
	16	21/11/00	-	-	0,0	5,0	-	-	0,0	31,0	-	-	0,0	1,0
14	17	22/11/00	-	-	0,0	5,8	-	-	0,0	29,0	-	-	0,1	0,0
	18	23/11/00	35,5	0,0	0,0	4,7	0,0	0,3	0,0	28,1	19,7	5,5	0,0	0,0

Tabela C4 - Perfis realizados no RSBA_n, na fase 3 do trabalho, com o uso da relação DQO/N-NO₃⁻ igual a 0, com monitoramento do pR,
N-NO₂⁻ e N-NO₃⁻

06/11/00

T. de anál.	N-NO ₂ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ % rem.	N-NO _x % rem.	Redox (mV)	
					antes	depois
0,00	0,84	14,07	0	0	104	110
2,00	1,13	10,11	28	25	168	150
4,00	1,86	9,08	35	27	141	174
6,00	1,90	6,01	57	47	140	125
8,00	1,48	2,97	79	70	144	130
10,00	0,40	0,00	100	97	171	150
12,00	0,00	0,00	100	100	28	-30

07/11/00

T. de anál.	N-NO ₂ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ % rem.	N-NO _x % rem.	Redox (mV)	
					antes	depois
0,00	0,90	15,00	0	0	104	110
2,00	1,10	11,00	27	24	168	150
4,00	1,80	9,00	40	32	141	174
6,00	1,90	6,00	60	50	140	125
8,00	1,50	3,10	79	71	144	130
10,00	0,38	0,00	100	98	171	150
12,00	0,00	0,00	100	100	28	-30

Tabela C5 - Perfis realizados no RSBA_n, na fase 3 do trabalho, com o uso da relação DQO/N-NO₃⁻ igual a 2,0, com monitoramento do pR, N-NO₂⁻, N-NO₃⁻ e DQO_F

08/11/00

T. de anál.	N-NO ₂ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ % rem.	N-NO _x % rem.	Redox (mV)	
					antes	depois
0,00	0,48	17,88	0	0	209	220
2,00	1,12	15,13	15	11	152	183
4,00	1,42	13,81	23	17	164	186
6,00	1,42	11,80	34	28	166	188
8,00	1,36	10,84	39	33	170	186
10,00	0,73	11,06	38	36	161	150
12,00	0,70	7,11	60	57	158	149

10/11/00

T. de anál.	N-NO ₂ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ % rem.	N-NO _x % rem.	Redox (mV)	
					antes	depois
0,00	0,03	20,00	0	0	200	190
2,00	0,30	17,00	15	14	150	180
4,00	0,43	14,00	30	28	170	189
6,00	0,69	12,60	37	34	140	190
8,00	1,00	12,00	40	35	190	194
10,00	1,80	9,80	51	42	195	181
12,00	1,70	7,60	62	54	190	180

09/11/00

T. de anál.	N-NO ₂ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ % rem.	N-NO _x % rem.	Redox (mV)		DQOf (mg/l)
					antes	depois	
0,00	0,02	19,16	0	0	204	193	24
0,33	0,06	16,52	14	14	160	167	23
0,67	0,20	15,61	19	18	125	169	22
1,00	0,14	16,70	13	12	134	173	22
1,33	0,18	16,27	15	14	165	174	21
1,67	0,20	15,86	17	16	167	178	23
2,00	0,33	16,63	13	12	160	179	18
2,33	0,39	15,06	21	19	156	171	23
2,67	0,64	15,28	20	17	156	190	20
3,00	0,63	14,03	27	24	157	184	23
3,33	0,60	14,51	24	21	160	185	23
3,67	0,43	13,66	29	27	170	190	24
5,67	0,65	12,75	33	30	135	193	25
7,67	0,91	11,76	39	34	198	196	22
9,67	1,76	9,56	50	41	194	180	23
11,67	1,73	7,58	60	51	193	180	24

Tabela C6 - Perfis realizados no RSBA_n, na fase 3 do trabalho, com o uso da relação DQO/N-NO₃ igual a 5,0, com monitoramento do pR, N-NO₂, N-NO₃ e DQO_F

14/11/00

T. de anál.	N-NO ₂ (mg/l)	N-NO ₃ (mg/l)	N-NO ₃ % rem.	N-NO _x % rem.	Redox (mV)	
					antes	depois
0,00	0,93	18,83	0	0	200	179
2,00	2,78	13,92	26	15	177	180
4,00	3,86	10,70	43	26	167	188
6,00	4,17	7,11	62	43	150	183
8,00	3,15	4,91	74	59	149	182
10,00	1,62	2,23	88	80	146	183
12,00	0,08	0,92	95	95	104	116

16/11/00

T. de anál.	N-NO ₂ (mg/l)	N-NO ₃ (mg/l)	N-NO ₃ % rem.	N-NO _x % rem.	Redox (mV)	
					antes	depois
0,00	0,94	17,77	0	0	180	140
2,00	2,23	13,22	26	17	117	139
4,00	3,32	6,59	63	47	131	150
6,00	0,91	1,39	92	88	124	158
8,00	0,00	0,00	100	100	-125	0
10,00	0,00	0,00	100	100	-197	-40
12,00	0,00	0,00	100	100	-200	-59

17/11/00

T. de anál.	N-NO ₂ (mg/l)	N-NO ₃ (mg/l)	N-NO ₃ % rem.	N-NO _x % rem.	Redox (mV)		DQOf (mg/l)
					antes	depois	
0,00	1,35	17,14	0	0	153	100	51
0,33	2,25	11,80	31	24	79	100	63
0,67	2,12	9,01	47	40	105	119	43
1,00	1,93	7,77	55	48	93	128	35
1,33	1,94	6,37	63	55	100	135	34
1,67	2,58	6,92	60	49	103	136	37
2,00	2,25	7,18	58	49	109	135	37
2,33	3,03	7,07	59	45	110	134	36
2,67	2,99	6,63	61	48	119	133	35
3,00	1,76	3,22	81	73	115	149	32
3,33	1,65	2,78	84	76	129	151	29
3,67	1,26	2,05	88	82	126	148	30
5,67	0,31	0,95	94	93	124	145	30
7,67	0,03	0,00	100	100	-159	37	27
9,67	0,04	0,00	100	100	-192	3	28
11,67	0,03	0,00	100	100	-200	0	25

Tabela C7 - Perfis realizados no RSBA_n, na fase 3 do trabalho, com o uso da relação DQO/N-NO₃⁻ igual a 10,0, com monitoramento do pR, N-NO₂⁻, N-NO₃⁻ e DQO_F

19/11/00

T. de anál.	N-NO ₂ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ % rem.	N-NO _x % rem.	Redox (mV)	
					antes	depois
0,00	0,76	18,68	0	0	140	161
2,00	1,75	6,70	64	57	117	139
4,00	0,66	1,76	91	88	85	110
6,00	0,00	0,00	100	100	-251	-131
8,00	0,00	0,00	100	100	-254	-121
10,00	0,00	0,77	96	96	-267	-132
12,00	0,00	0,00	100	100	-272	-167

21/11/00

T. de anál.	N-NO ₂ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ % rem.	N-NO _x % rem.	Redox (mV)	
					antes	depois
0,00	0,60	18,20	0	0	148	110
2,00	0,81	3,90	79	75	90	90
4,00	0,00	0,00	100	100	-301	-250
6,00	0,00	0,00	100	100	-340	-292
8,00	0,00	0,00	100	100	-341	-280
10,00	0,00	0,00	100	100	-337	-291
12,00	0,00	0,00	100	100	-342	-260

20/11/00

T. de anál.	N-NO ₂ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ % rem.	N-NO _x % rem.	Redox (mV)		DQOf (mg/l)
					antes	depois	
0,00	0,64	17,25	0	0	150	106	146
0,33	1,16	14,62	15	12	73	84	135
0,67	1,29	10,88	37	32	83	17	110
1,00	1,36	9,08	47	42	89	101	97
1,33	1,41	8,10	53	47	88	104	88
1,67	1,09	4,14	76	71	92	102	78
2,00	0,84	3,74	78	74	88	92	67
2,33	1,15	3,70	79	73	86	94	67
2,67	0,39	1,54	91	89	60	81	56
3,00	0,00	0,00	100	100	-125	15	50
3,33	0,00	0,00	100	100	-252	-215	48
3,67	0,00	0,00	100	100	-296	-254	45
5,67	0,00	0,00	100	100	-343	-291	42
7,67	0,00	0,00	100	100	-341	-275	35
9,67	0,00	0,00	100	100	-336	-290	38
11,67	0,00	0,00	100	100	-341	-256	37

Tabela C8 - Perfis realizados no RSBA_n, na fase 3 do trabalho, com o uso da relação DQO/N-NO₃⁻ igual a 14,0, com monitoramento de todos os parâmetros

22/11/00

T. de anál.	N-NO ₂ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ % rem.	N-NO _x % rem.	Redox (mV)	
					antes	depois
0,00	1,02	17,88	0	0	96	65
2,00	0,05	2,60	85	86	-171	-71
4,00	0,00	1,80	90	90	-394	-360
6,00	0,00	0,00	100	100	-429	-400
8,00	0,00	0,00	100	100	-430	-404
10,00	0,00	0,00	100	100	-437	-415
12,00	0,00	0,00	100	100	-434	-408

Tabela C8 - Perfis realizados no RSBA, na fase 3 do trabalho, com o uso da relação DQO/N-NO₃ igual a 14,0, com monitoramento de todos os parâmetros (cont.)

23/11/00

Tempo	N-NO ₂ ⁻	N-NO ₃ ⁻	N-NO ₃ ⁻	N-NO _x	Redox (mV)		DQOf	pH	Ác.Vol.	Alcal.	N-am	NTK	P	C	L
	(mg/l)	(mg/l)	% rem.	% rem.	antes	depois					(mg/l)	(mg/l)			
0,00	1,58	17,14	0	0	55	47	279	7,3	31	236	11,1	30,1	152	39	3
0,33	1,54	9,96	42	39	45	35	227	7,3	18	246			136	22	3
0,67	1,34	7,14	58	55	37	12	201	7,3	18	246			130	26	2
1,00	1,63	7,58	56	51	27	-14	198	7,3	18	239			125	17	2
1,33	0,99	4,18	76	72	-113	-58	181	7,3	20	240			128	14	4
1,67	0,04	3,15	82	83	-311	-315	174	7,3	18	245			126	11	3
2,00	0,00	2,97	83	84	-368	-357	159	7,3	19	252	15,3	25,1	119	10	3
2,33	0,00	0,00	100	100	-379	-372	156	7,2	17	271			122	9	4
2,67	0,00	0,00	100	100	-417	-410	150	7,3	19	269			104	8	4
3,00	0,00	0,00	100	100	-431	-418	147	7,3	19	266			102	6	3
3,33	0,00	0,00	100	100	-434	-418	146	7,2	18	271			104	8	4
3,67	0,00	0,00	100	100	-435	-415	132	7,3	21	306	16,1	23,5	103	10	4
5,67	0,00	0,00	100	100	-439	-417	109	7,3	18	316	17,4	22,4	96	10	2
7,67	0,00	0,00	100	100	-440	-419	88	7,2	18	273	19,4	21,3	100	8	3
9,67	0,00	0,00	100	100	-438	-422	76	7,2	16	253	18,7	22,4	108	9	3
11,67	0,00	0,00	100	100	-436	-423	71	7,2	17	243	19,7	22,4	96	10	3

Tabela C9 - Valores de sólidos totais para o substrato e RSBAe medidos durante a fase 3 do trabalho

Relação DQO/N-NO ₃	Ciclo	Data	SUBSTRATO						RSBAe					
			ST	STF	STV	SST	SSTF	SSTV	ST	STF	STV	SST	SSTF	SSTV
0	1	06/11/00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2	07/11/00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	3	08/11/00	1162	442	720	69	9	60	761	420	340	72	38	34
	4	09/11/00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5	10/11/00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	9	14/11/00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	11	16/11/00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	12	17/11/00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	14	19/11/00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	15	20/11/00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	16	21/11/00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14	17	22/11/00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	18	23/11/00	700	176	524	131	4	178	568	228	340	70	13	56

Tabela C10 - Valores de sólidos totais para RSBA_n e liquor misto do RSBA_e, medidos durante a fase 3 do trabalho

Relação DQO/N-NO ₃	Ciclo	Data	RSBA _n						LIQUOR (RSBA _e)					
			ST	STF	STV	SST	SSTF	SSTV	ST	STF	STV	SST	SSTF	SSTV
0	1	06/11/00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2	07/11/00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	3	08/11/00	735	473	262	72	19	53	6827	2257	4570	3471	260	3211
	4	09/11/00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5	10/11/00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	9	14/11/00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	11	16/11/00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	12	17/11/00	682	410	272	78	13	65	-	-	-	-	-	-
10	14	19/11/00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	15	20/11/00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	16	21/11/00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14	17	22/11/00	770	614	156	62	13	49	-	-	-	-	-	-
	18	23/11/00	970	614	356	175	35	140	18260	2320	15940	3306	291	3015

Tabela C11 - Valores de DQO bruta, DQO filtrada, proteínas, carboidratos e lipídeos medidos para a fonte de carbono durante a fase 3 do trabalho

Relação DQO/N-NO ₃	Ciclo	Data	Fonte de carbono				
			DQO _B	DQO _F	P	C	L
0	1	06/11/00	-	-	-	-	-
	2	07/11/00	-	-	-	-	-
2	3	08/11/00	577	371	274	71	26
	4	09/11/00	-	-	-	-	-
	5	10/11/00	-	-	-	-	-
5	9	14/11/00	-	-	-	-	-
	11	16/11/00	465	347	275	135	32
	12	17/11/00	479	369	294	152	57
10	14	19/11/00	498	368	-	-	-
	15	20/11/00	504	355	284	163	62
	16	21/11/00	-	-	-	-	-
14	17	22/11/00	-	-	-	-	-
	18	23/11/00	550	372	269	200	29

Figura C1- Curvas de decaimento de nitrato de primeira ordem ajustadas para os perfis das Fase 3 do trabalho

ANEXO D

**Dados obtidos na fase 4 do trabalho usando como fonte de carbono
substrato composto por 15% de proteínas 70% de carboidratos
e 15% de lipídeos**

Tabela D1 - Valores do pH, ácidos voláteis (AV), alcalinidade total (AT), alcalinidade parcial (AP), alcalinidade intermediária (AI) e alcalinidade à bicarbonato (AB) encontrados para o substrato, RSBAe e RSBAn na fase 4 do trabalho

Relação	Ciclos	Data	SUBSTRATO						RSBAe						RSBAn						
			pH	AV	AT	AP	AI	AB	pH	AV	AT	AP	AI	AB	pH	AV	AT	AP	AI	AB	AI/AP
2	1	24/11/00	7,7						7,5						7,0						
	2	25/11/00	7,7						7,4						7,0						
	3	26/11/00	7,7	21	141	113	27	125	7,6	14	59	49	10	49	7,0	11	144	101	44	137	0,4
5	4	27/11/00	7,8						7,5						7,0						
	5	28/11/00	7,7						7,6						7,0						
	6	29/11/00	7,8	19	166	115	51	152	7,5	12	60	51	9	51	7,0	12	201	167	34	193	0,2
10	7	30/11/00	7,7						7,5						7,0						
	8	01/12/00	7,7	17	167	121	46	155	7,3	11	54	37	17	46	7,0	13	220	156	63	210	0,4
	9	02/12/00	7,6						7,4						7,0						
14	10	03/12/00	7,6						7,4						6,9						
	19	12/12/00	7,9	28	168	120	48	148	7,9	9	87	69	18	81	6,9	13	216	178	38	207	0,2
	20	13/12/00	7,8	20	151	131	20	137	7,7	9	73	54	20	66	6,9	9	243	211	32	236	0,2

Tabela D2 - Valores da Demanda Química de Oxigênio bruta (DQOB) e filtrada (DQOF) do substrato, RSBAe e RSBA_n; eficiência de remoção de DQOB (E_B) e filtrada (E_F) no RSBAe e no RSBA_n e o potencial redox (pR) antes e depois da mistura no RSBA_n, na fase 4 do trabalho

Relação	Ciclo	Data	SUBSTRATO		RSBAe				F.C(no reator)		RSBA _n					
			DQO _B	DQO _F	DQO _B	DQO _F	$E_B\%$	$E_F\%$	DQO _B	DQO _F	DQO _B	DQO _F	$E_B\%$	$E_F\%$	pR _A	pR _D
2	1	24/11/00	520	395	19	15	-	-	-	-	27	27	-	-	-369	70
	2	25/11/00	523	393	19	16	96	96	60	41	29	28	-	-	-371	45
	3	26/11/00	487	382	18	13	97	97	59	39	23	22	71	62	-317	78
5	4	27/11/00	520	380	19	19	96	95	197	123	22	24	71	54	-180	50
	5	28/11/00	551	372	18	18	97	95	198	119	21	23	90	84	-174	42
	6	29/11/00	508	391	22	20	96	95	-	-	25	25	88	82	-197	76
10	7	30/11/00	496	398	24	19	95	95	368	235	30	28	-	-	-187	52
	8	01/12/00	462	382	16	16	97	96	371	232	28	16	93	94	-239	5
	9	02/12/00	480	381	18	17	96	96	-	-	29	18	93	93	-238	10
14	10	03/12/00	510	437	21	21	96	95	-	-	38	31	-	-	-265	0
	19	12/12/00	507	409	19	23	-	-	567	367	38	39	-	-	-427	13
	20	13/12/00	488	385	22	27	96	93	464	295	54	44	91	89	-425	35

Tabela D3 - Valores de nitrogênio total (N-NTK), nitrogênio amoniacal (N-amon), nitrito (N-NO₂⁻), nitrato (N-NO₃⁻) encontrados para o substrato, RSBAe e RSBA_n, na fase 4 do trabalho

Relação	Ciclo	Data	SUBSTRATO				RSBAe				RSBA _n			
			N-NTK	N-amon	N-NO ₂ ⁻	N-NO ₃ ⁻	N-NTK	N-amon	N-NO ₂ ⁻	N-NO ₃ ⁻	N-NTK	N-amon	N-NO ₂ ⁻	N-NO ₃ ⁻
2	1	24/11/00	-	-	0,0	5,6	-	-	0,0	27,0	-	-	0,0	0,0
	2	25/11/00	-	-	0,0	6,0	-	-	0,1	25,8	-	-	0,0	0,0
	3	26/11/00	34,4	0,5	0,0	5,9	0,0	0,0	0,0	28,2	2,9	2,2	0,0	0,0
5	4	27/11/00	-	-	0,0	6,0	-	-	0,0	26,0	-	-	0,0	1,0
	5	28/11/00	-	-	0,0	6,4	-	-	0,0	27,0	-	-	0,0	1,1
	6	29/11/00	33,9	0,3	0,0	5,9	0,0	0,0	0,0	24,9	1,6	1,0	0,0	0,0
10	7	30/11/00	-	-	0,0	5,9	-	-	0,0	25,6	-	-	0,0	0,0
	8	01/12/00	37,2	0,5	0,0	5,2	0,4	0,4	0,3	27,5	0,5	0,5	0,0	0,0
	9	02/12/00	-	-	0,0	5,5	-	-	0,2	28,0	-	-	0,0	0,0
14	10	03/12/00	-	-	0,0	5,5	-	-	0,0	25,9	-	-	0,0	0,0
	19	12/12/00	33,9	0,5	0,0	6,2	0,0	0,0	0,0	22,3	1,6	1,6	0,0	0,0
	20	13/12/00	34,4	1,8	0,0	5,8	0,0	0,0	0,0	23,1	0,5	0,3	0,1	0,0

Tabela D4 - Perfis realizados no RSBA_n, na fase 4 do trabalho, com o uso da relação DQO/N-NO₃⁻ igual a 2,0, com monitoramento do pR, N-NO₂⁻, N-NO₃⁻ e DQO_F

24/11/00

T. de anál.	N-NO ₂ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ % rem.	N-NO _x % rem.	Redox (mV)	
					antes	depois
0,00	0,39	15,00	0	0	50	70
2,00	1,50	12,30	18	10	91	120
4,00	1,90	8,90	41	30	99	120
6,00	1,90	5,90	61	49	-60	31
8,00	1,60	4,00	73	64	-140	-140
10,00	0,69	1,00	93	89	-220	-190
12,00	0,00	0,00	100	100	-240	-220

25/11/00

T. de anál.	N-NO ₂ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ % rem.	N-NO _x % rem.	Redox (mV)	
					antes	depois
0,00	0,57	14,84	0	0	45	62
2,00	0,97	8,17	45	41	92	115
4,00	1,21	4,14	72	65	101	130
6,00	0,03	0,00	100	100	-85	20
8,00	0,00	0,00	100	100	-190	-160
10,00	0,00	0,00	100	100	-270	-200
12,00	0,00	0,00	100	100	-276	-250

26/11/00

T. de anál.	N-NO ₂ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ % rem.	N-NO _x % rem.	Redox (mV)		DQO _F (mg/l)
					antes	depois	
0,00	0,34	15,61	0	0	78	81	29
0,33	0,45	14,76	5	5	12	45	29
0,67	0,77	15,94	0	0	7	40	29
1,00	1,00	14,07	10	6	13	41	27
1,33	1,48	12,60	19	12	23	48	26
1,67	1,50	12,60	19	12	35	54	28
2,00	1,51	11,87	24	16	38	52	28
2,33	1,51	11,06	29	21	41	54	25
2,67	1,60	11,39	27	19	40	53	29
3,00	1,73	9,56	39	29	43	58	23
3,33	1,80	9,45	39	29	48	59	25
3,67	1,81	8,54	45	35	53	60	26
5,67	1,95	6,12	61	49	62	63	21
7,67	1,71	3,66	77	66	61	58	23
9,67	0,74	1,28	92	87	56	49	19
11,67	0,04	0,00	100	100	-51	-11	18

Tabela D5 - Perfis realizados no RSBA_n, na fase 4do trabalho, com o uso da relação DQO/N-NO₃⁻ igual a 5,0, com monitoramento do pR,
N-NO₂⁻, N-NO₃⁻ e DQO_F

27/11/00

T. de anál.	N-NO ₂ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ % rem.	N-NO _x % rem.	Redox (mV)	
					antes	depois
0,00	1,20	22,00	0	0	50	43
2,00	2,50	9,00	59	50	-31	-10
4,00	2,50	4,00	82	72	61	35
6,00	0,60	0,00	100	97	0	-10
8,00	0,00	0,00	100	100	-50	-2
10,00	0,00	0,00	100	100	-102	-70
12,00	0,00	0,00	100	100	-120	-39

28/11/00

T. de anál.	N-NO ₂ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ % rem.	N-NO _x % rem.	Redox (mV)	
					antes	depois
0,00	1,81	14,58	0	0	42	44
2,00	2,97	8,79	40	28	-20	-8
4,00	3,69	7,18	51	34	50	48
6,00	2,22	3,04	79	68	57	48
8,00	0,00	0,00	100	100	-39	-2
10,00	0,00	0,00	100	100	-90	-70
12,00	0,00	0,00	100	100	-114	-39

29/11/00

T. de anál.	N-NO ₂ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ % rem.	N-NO _x % rem.	Redox (mV)		DQOf (mg/l)
					antes	depois	
0,00	0,96	23,52	0	0	76	60	72
0,33	1,40	12,93	45	41	51	40	54
0,67	1,04	14,29	39	37	-19	-3	57
1,00	1,72	13,59	42	37	-27	-9	41
1,33	1,86	10,77	54	48	-17	0	33
1,67	2,12	9,41	60	53	-5	10	29
2,00	2,30	8,13	65	57	-5	12	26
2,33	2,16	7,58	68	60	5	23	23
2,67	2,39	6,96	70	62	21	33	26
3,00	2,52	4,87	79	70	22	45	25
3,33	2,53	4,87	79	70	30	53	23
3,67	2,53	4,14	82	73	40	57	23
5,67	0,55	0,00	100	98	24	28	23
7,67	0,00	0,00	100	100	-73	-50	20
9,67	0,00	0,00	100	100	-91	-44	17
11,67	0,00	0,00	100	100	-96	-59	19

Tabela D6 - Perfis realizados no RSBA_n, na fase 4 do trabalho, com o uso da relação DQO/N-NO₃⁻ igual a 10,0, com monitoramento do pR,
N-NO₂⁻, N-NO₃⁻ e DQO_F

30/11/00

T. de anál.	N-NO ₂ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ % rem.	N-NO _x % rem.	Redox (mV)	
					antes	depois
0,00	1,32	13,55	0	0	52	45
2,00	1,75	2,75	80	70	-35	-19
4,00	0,00	0,00	100	100	-140	-115
6,00	0,00	0,00	100	100	-145	-104
8,00	0,00	0,00	100	100	-157	-120
10,00	0,00	0,00	100	100	-160	-130
12,00	0,00	0,00	100	100	-166	-119

02/12/00

T. de anál.	N-NO ₂ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ % rem.	N-NO _x % rem.	Redox (mV)	
					antes	depois
0,00	1,40	16,00	0	0	15	35
2,00	0,00	0,00	100	100	-120	-25
4,00	0,00	0,00	100	100	-145	-120
6,00	0,00	0,00	100	100	-146	-114
8,00	0,00	0,00	100	100	-159	-135
10,00	0,00	0,00	100	100	-170	-132
12,00	0,00	0,00	100	100	-189	-140

01/12/00

T. de anál.	N-NO ₂ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ % rem.	N-NO _x % rem.	Redox (mV)		DQO _F (mg/l)
					antes	depois	
0,00	1,45	15,64	0	0	5	20	148
0,33	1,91	13,81	12	8	-32	-17	140
0,67	3,34	13,33	15	2	-52	-33	121
1,00	3,29	8,32	47	32	-53	-37	85
1,33	1,33	2,27	85	79	-61	-44	65
1,67	1,34	2,16	86	80	-102	-68	56
2,00	0,00	0,00	100	100	-118	-86	44
2,33	0,00	0,00	100	100	-160	-140	46
2,67	0,00	0,00	100	100	-182	-124	36
3,00	0,00	0,00	100	100	-178	-120	33
3,33	0,00	0,00	100	100	-175	-122	36
3,67	0,00	0,00	100	100	-168	-82	39
5,67	0,00	0,00	100	100	-155	-106	33
7,67	0,00	0,00	100	100	-168	-115	35
9,67	0,00	0,00	100	100	-180	-117	30
11,67	0,00	0,00	100	100	-176	-135	30

Tabela D7 - Perfis realizados no RSBA_n, na fase 4 do trabalho, com o uso da relação DQO/N-NO₃⁻ igual a 14,0, com monitoramento de todos os parâmetros

03/12/00						
T. de anál.	N-NO ₂ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ % rem.	N-NO _x % rem.	Redox (mV)	
					antes	depois
0,00	1,34	10,88	0	0	0	8
2,00	0,00	0,00	100	100	-260	-230
4,00	0,00	0,00	100	100	-250	-203
6,00	0,00	0,00	100	100	-249	-194
8,00	0,00	0,00	100	100	-239	-195
10,00	0,00	0,00	100	100	-241	-200
12,00	0,00	0,00	100	100	-250	-215

12/12/00							
T. de anál.	N-NO ₂ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ % rem.	N-NO _x % rem.	Redox (mV)		DQOf (mg/l)
					antes	depois	
0,00	1,82	11,14	0	0	13	13	224
0,33	2,47	10,48	33	24	-43	-46	173
0,67	3,46	10,15	35	20	-167	-156	169
1,00	4,05	7,40	53	33	-171	-164	130
1,33	1,45	2,49	84	77	-210	-190	98
1,67	0,00	0,00	100	100	-310	-295	81
2,00	0,00	0,00	100	100	-330	-323	75
2,33	0,00	0,00	100	100	-375	-335	64
2,67	0,00	0,00	93	94	-380	-341	50
3,00	0,00	0,00	100	100	-387	-347	47
3,33	0,00	0,00	100	100	-423	-390	47
3,67	0,00	0,00	100	100	-429	-379	46
5,67	0,00	0,00	100	100	-430	-380	41
7,67	0,00	0,00	100	100	-434	-381	43
9,67	0,00	0,00	100	100	-428	-379	33
11,67	0,00	0,00	100	100	-429	-380	38

Tabela D7 - Perfis realizados no RSBA_n, na fase 4 do trabalho, com o uso da relação DQO/N-NO₃ igual a 14,0, com monitoramento de todos os parâmetros (cont.)

13/12/00 14															
T. de	N-NO ₂	N-NO ₃	N-NO ₃	N-NO _x	Redox (mV)		DQOf	pH	Ác.Vol.	Alcal.	N-am	NTK	P	C	L
anál.	(mg/l)	(mg/l)	% rem.	% rem.	antes	depois	(mg/l)				(mg/l)	(mg/l)			
0,00	2,52	13,08	0	0	35	23	176	7,0	11	193	2,5	7,7	28	38	5
0,33	2,95	12,86	2	0	-94	-88	175	7,0	11	193			28	30	2
0,67	3,54	9,67	26	15	-178	-158	139	7,0	11	195			23	8	3
1,00	3,77	7,80	40	26	-206	-179	116	7,0	15	192			23	7	3
1,33	3,56	5,60	57	41	-205	-180	105	7,0	22	188			23	5	5
1,67	0,63	1,69	87	85	-254	-200	72	7,0	18	194			49	7	3
2,00	0,00	0,00	100	100	-330	-290	65	7,0	11	199	2,0	4,4	50	8	5
2,33	0,00	0,00	100	100	-363	-322	64	7,0	15	216			49	7	5
2,67	0,00	0,00	100	100	-370	-323	59	7,0	14	236			42	5	5
3,00	0,00	0,00	100	100	-376	-327	50	7,0	14	220			57	3	5
3,33	0,00	0,00	100	100	-382	-333	52	7,0	19	204			52	3	3
3,67	0,00	0,00	100	100	-380	-337	49	7,0	22	199	2,0	3,3	22	2	4
5,67	0,00	0,00	100	100	-425	-353	43	6,9	13	204	2,0	2,7	22	4	4
7,67	0,00	0,00	100	100	-423	-360	50	7,0	14	193	2,0	1,1	21	8	3
9,67	0,00	0,00	100	100	-424	-348	49	6,9	15	191	1,1	0,5	24	6	4
11,67	0,00	0,00	100	100	-423	-350	54	6,9	14	191	0,5	0,0	23	5	4

Tabela D8 - Valores de sólidos totais para o substrato e RSBAe medidos durante a fase 4 do trabalho

Relação DQO/N-NO ₃	Ciclo	Data	SUBSTRATO						RSBAe					
			ST	STF	STV	SST	SSTF	SSTV	ST	STF	STV	SST	SSTF	SSTV
2	1	24/11/00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2	25/11/00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	3	26/11/00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	4	27/11/00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5	28/11/00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	6	29/11/00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	7	30/11/00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	8	01/12/00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	9	02/12/00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14	10	03/12/00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	19	12/12/00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	20	13/12/00	830	222	608	73	30	43	584	388	196	27	8	19

Tabela D9 - Valores de sólidos totais para RSBAn e liquor misto do RSBAe, medidos durante a fase 4 do trabalho

Relação DQO/N-NO ₃	Ciclo	Data	RSBAn						LIQUOR					
			ST	STF	STV	SST	SSTF	SSTV	ST	STF	STV	SST	SSTF	SSTV
2	1	24/11/00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2	25/11/00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	3	26/11/00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	4	27/11/00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5	28/11/00	420	200	220	46	39	8	-	-	-	-	-	-
	6	29/11/00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	7	30/11/00	854	526	328	98	45	53	-	-	-	-	-	-
	8	01/12/00	682	410	272	78	13	65	-	-	-	-	-	-
	9	02/12/00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14	10	03/12/00	902	886	16	117	110	7	-	-	-	-	-	-
	19	12/12/00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	20	13/12/00	864	688	176	75	39	35	3666	564	3102	3205	96	3109

Tabela D10 - Valores de DQO bruta, DQO filtrada, proteínas, carboidratos e lipídeos medidos para a fonte de carbono e os valores e lipídeos medidos para o RSBAn, durante a fase 4 do trabalho de proteínas, carboidratos

Relação DQO/N-NO ₃	Ciclo	Data	Fonte de carbono					RSBAn		
			DQO _B	DQO _F	P	C	L	P	C	L
2	1	24/11/00	-	-	-	-	-	-	-	-
	2	25/11/00	-	-	-	-	-	-	-	-
	3	26/11/00	418	282	-	-	-	-	-	-
5	4	27/11/00	562	350	284	414	58	-	-	-
	5	28/11/00	566	339	-	-	-	14	2,4	1,4
	6	29/11/00	-	-	-	-	-	-	-	-
10	7	30/11/00	525	335	-	-	-	-	-	-
	8	01/12/00	530	331	-	-	-	-	-	-
	9	02/12/00	-	-	-	-	-	-	-	-
14	10	03/12/00	-	-	-	-	-	21	11	2
	19	12/12/00	579	374	361	447	102	-	-	-
	20	13/12/00	473	301	200	305	43	30	12	3

Figura D1- Curvas de decaimento de nitrato de primeira ordem ajustadas para os perfis das Fase 4 do trabalho

ANEXO E

**Dados obtidos na fase 5 do trabalho usando como fonte de carbono
substrato composto por 15% de proteínas 15% de carboidratos
e 70% de lipídeos**

Tabela E1 - Valores do pH, ácidos voláteis (AV), alcalinidade total (AT), alcalinidade parcial (AP), alcalinidade intermediária (AI) e alcalinidade à bicarbonato (AB) encontrados para o substrato, RSBAe e RSBA n na fase 5 do trabalho

Relação	Ciclos	Data	SUBSTRATO						RSBAe						RSBA n						
			pH	AV	AT	AP	AI	AB	pH	AV	AT	AP	AI	AB	pH	AV	AT	AP	AI	AB	AI/AP
2	1	15/01/01	7,5	-	-	-	-	-	7,5	-	-	-	-	-	6,9	-	-	-	-	-	-
	2	16/01/01	7,9	-	-	-	-	-	7,7	-	-	-	-	-	7,0	-	-	-	-	-	-
	3	17/01/01	7,9	24	144	114	30	128	7,9	12	78	64	14	70	7,2	12	161	129	32	153	0,3
5	6	20/01/01	7,8	-	-	-	-	-	7,6	-	-	-	-	-	6,9	-	-	-	-	-	-
	8	22/01/01	8,0	-	-	-	-	-	7,7	-	-	-	-	-	7,0	-	-	-	-	-	-
	9	23/01/01	7,6	23	158	125	33	141	7,5	11	68	56	13	60	6,9	12	132	101	31	123	0,3
10	10	24/01/01	7,5	-	-	-	-	-	7,7	-	-	-	-	-	7,4	-	-	-	-	-	-
	11	25/01/01	7,4	22	156	110	46	140	7,6	11	78	63	15	71	7,0	11	174	125	49	166	0,4
	12	26/01/01	7,3	-	-	-	-	-	7,5	-	-	-	-	-	7,2	-	-	-	-	-	-
14	13	27/01/01	7,4	-	-	-	-	-	7,6	-	-	-	-	-	7,4	-	-	-	-	-	-
	14	28/01/01	7,6	24	145	107	107	128	7,5	12	68	53	53	60	6,9	9	184	149	149	178	0,2
	15	29/01/01	7,6	-	-	-	-	-	7,5	-	-	-	-	-	7,0	-	-	-	-	-	-

Tabela E2 - Valores da Demanda Química de Oxigênio bruta (DQOB) e filtrada (DQOF) do substrato, RSBAe e RSBA_n; eficiência de remoção de DQOB (E_B) e filtrada (E_F) no RSBAe e no RSBA_n e o potencial redox (pR) antes e depois da mistura no RSBA_n na fase 5 do trabalho

Relação	Ciclo	Data	SUBSTRATO		RSBAe				F.C.(no reator)		RSBA _n					
			DQO _B	DQO _F	DQO _B	DQO _F	E _B %	E _F %	DQO _B	DQO _F	DQO _B	DQO _F	E _B %	E _F %	pR _A	pR _D
2	1	15/01/01	492,5	379	19	18,5	-	-	34	11	50,5	45,5	-	-	-451	46
	2	16/01/01	523	390	21	23	-	-	59	21	32	29	94	92	-400	102
	3	17/01/01	530	399	24	21	95	95	60	20	29	28	-	-	-145	108
5	6	20/01/01	497	421	23	20	-	-	180	113	22	21	-	-	206	219
	8	22/01/01	556	408	27	24	95	94	79	50	60	45	-	-	-348	42
	9	23/01/01	507	452	21	18	96	96	121	37	51	29	90	93	-350	47
10	10	24/01/01	539	398	15	14	95	94	279	104	30	26	-	-	-229	109
	11	25/01/01	547	427	17	17	97	96	281	104	33	31	94	92	-310	98
	12	26/01/01	540	410	15	16	97	96	-	-	31	30	94	92	-300	80
14	13	27/01/01	584	436	23	22	96	95	475	178	58	44	89	90	-399	70
	14	28/01/01	561	419	27	22	95	95	517	166	73	57	86	86	-467	67
	15	29/01/01	540	410	29	25	95	94	-	-	65	52	89	88	-470	70

Tabela E3 - Valores de nitrogênio total (N-NTK), nitrogênio amoniacal (N-amon), nitrito (N-NO₂⁻), nitrato (N-NO₃⁻) encontrados para o substrato, RSBAe e RSBA_n, na fase 5 do trabalho

Relação	Ciclo	Data	SUBSTRATO				RSBAe				RSBA _n			
			N-NTK	N-amon	N-NO ₂ ⁻	N-NO ₃ ⁻	N-NTK	N-amon	N-NO ₂ ⁻	N-NO ₃ ⁻	N-NTK	N-amon	N-NO ₂ ⁻	N-NO ₃ ⁻
2	1	15/01/01	-	-	0,0	5,0	-	-	0,0	23,1	-	-	0,1	0,0
	2	16/01/01	-	-	0,0	5,5	-	-	0,0	24,9	-	-	0,0	0,5
	3	17/01/01	28,4	0,4	0,0	5,3	0,0	0,0	0,0	25,2	0,0	0,0	0,0	1,0
5	6	20/01/01	-	-	0,0	4,9	-	-	0,0	22,1	-	-	0,0	2,3
	8	22/01/01	-	-	0,0	4,5	-	-	0,0	21,2	-	-	0,0	0,0
	9	23/01/01	35,0	0,7	0,0	4,9	0,0	0,0	0,0	22,8	0,0	0,0	0,0	0,0
10	10	24/01/01	-	-	0,0	6,0	-	-	0,0	25,4	-	-	0,0	0,0
	11	25/01/01	34,4	0,5	0,0	6,0	0,0	0,0	0,0	28,3	1,6	0,0	0,0	1,5
	12	26/01/01	-	-	0,0	5,5	-	-	0,0	27,0	-	-	0,0	0,0
14	13	27/01/01	-	-	0,0	4,8	-	-	0,0	23,4	-	-	0,0	0,0
	14	28/01/01	-	-	0,0	5,5	-	-	0,0	22,3	-	-	0,0	0,0
	15	29/01/01	35,5	0,8	0,0	5,0	1,6	0,0	0,0	22,0	2,2	1,5	0,0	0,0

Tabela E4 - Perfis realizados no RSBA_n, na fase 5 do trabalho, com o uso da relação DQO/N-NO₃⁻ igual a 2,0, com monitoramento do pR, N-NO₂⁻, N-NO₃⁻ e DQO_F

15/01/01

T. de anál.	N-NO ₂ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ % rem.	N-NO _x % rem.	Redox (mV)	
					antes	depois
0,00	2,19	7,62	0	0	46	38
2,00	0,13	0,00	100	99	-39	-15
4,00	0,00	0,00	100	100	-204	-141
6,00	0,00	0,00	100	100	-300	-166
8,00	0,00	0,00	100	100	-314	-174
10,00	0,00	0,00	100	100	-341	-191
12,00	0,00	0,00	100	100	-379	-200

17/01/01

T. de anál.	N-NO ₂ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ % rem.	N-NO _x % rem.	Redox (mV)	
					antes	depois
0,00	0,31	15,28	0	0	108	91
2,00	0,76	7,58	50	46	75	74
4,00	0,00	0,81	95	95	-122	-80
6,00	0,00	0,00	100	100	-210	-150
8,00	0,00	0,00	100	100	-200	-140
10,00	0,00	0,00	100	100	-210	-150
12,00	0,00	0,00	100	100	-210	-152

16/01/01

T. de anál.	N-NO ₂ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ % rem.	N-NO _x % rem.	Redox (mV)		DQOf (mg/l)
					antes	depois	
0,00	2,01	14,73	0	0	102	75	29
0,33	1,51	10,92	26	26	27	50	29
0,67	0,60	7,69	48	50	26	42	30
1,00	0,80	10,15	31	35	32	44	28
1,33	0,87	6,34	57	57	37	43	29
1,67	0,77	5,86	60	60	44	49	28
2,00	0,89	4,95	66	65	39	46	28
2,33	0,76	3,04	79	77	25	34	29
2,67	0,77	2,38	84	81	37	44	29
3,00	0,66	1,25	92	89	18	40	28
3,33	0,37	0,51	97	95	-25	31	29
3,67	0,00	0,00	100	100	-33	23	28
5,67	0,00	0,00	100	100	-130	-43	28
7,67	0,00	0,00	100	100	-143	-52	29
9,67	0,00	0,00	100	100	-141	-44	30
11,67	0,00	0,00	100	100	-131	-45	29

Tabela E5 - Perfis realizados no RSBA_n, na fase 5 do trabalho, com o uso da relação DQO/N-NO₃⁻ igual a 5,0, com monitoramento do pR, N-NO₂⁻, N-NO₃⁻ e DQO_F

20/01/01

T. de anál.	N-NO ₂ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ % rem.	N-NO _x % rem.	Redox (mV)	
					antes	depois
0,00	0,15	20,00	0	0	219	208
2,00	0,64	19,27	0	0	143	155
4,00	0,79	14,54	0	0	161	171
6,00	1,28	14,62	0	0	160	175
8,00	1,04	12,53	0	0	160	172
10,00	1,09	11,69	0	0	158	169
12,00	0,88	10,84	0	0	160	140

22/01/01

T. de anál.	N-NO ₂ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ % rem.	N-NO _x % rem.	Redox (mV)	
					antes	depois
0,00	0,65	11,14	0	0	42	34
2,00	0,33	0,00	100	97	-106	-76
4,00	0,00	0,00	100	100	-280	-211
6,00	0,00	0,00	100	100	-322	-233
8,00	0,00	0,00	100	100	-355	-240
10,00	0,00	0,00	100	100	-369	-255
12,00	0,00	0,00	100	100	-374	-290

23/01/01

T. de anál.	N-NO ₂ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ % rem.	N-NO _x % rem.	Redox (mV)		DQO _F (mg/l)
					antes	depois	
0,00	1,69	7,95	0	0	47	28	35
0,33	1,40	7,69	3	6	-10	-7	27
0,67	1,74	5,75	28	22	-26	-20	29
1,00	1,74	5,02	37	30	-48	-35	35
1,33	0,15	0,00	100	98	-60	-45	29
1,67	0,14	0,00	100	99	-71	-55	36
2,00	0,08	0,00	100	99	-99	-71	27
2,33	0,00	0,00	100	100	-144	-110	30
2,67	0,00	0,00	100	100	-204	-155	33
3,00	0,00	0,00	100	100	-243	-181	30
3,33	0,00	0,00	100	100	-277	-230	26
3,67	0,00	0,00	100	100	-308	-262	30
5,67	0,00	0,00	100	100	-330	-290	34
7,67	0,00	0,00	100	100	-381	-245	34
9,67	0,00	0,00	100	100	-389	-220	32
11,67	0,00	0,00	100	100	-400	-240	31

Tabela E6 - Perfis realizados no RSBA_n, na fase 5 do trabalho, com o uso da relação DQO/N-NO₃⁻ igual a 10,0, com monitoramento do pR, N-NO₂⁻, N-NO₃⁻ e DQO_F

24/01/01

T. de anál.	N-NO ₂ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ % rem.	N-NO _x % rem.	Redox (mV)	
					antes	depois
0,00	0,92	14,91	0	0	109	81
2,00	1,49	5,20	65	58	38	41
4,00	0,00	0,00	100	100	-121	-83
6,00	0,00	0,00	100	100	-208	-146
8,00	0,00	0,00	100	100	-197	-138
10,00	0,00	0,00	100	100	-210	-146
12,00	0,00	0,00	100	100	-210	-150

26/01/01

T. de anál.	N-NO ₂ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ % rem.	N-NO _x % rem.	Redox (mV)	
					antes	depois
0,00	0,30	14,91	0	0	13	10
2,00	0,30	5,20	65	64	-320	-310
4,00	0,00	0,00	100	100	-420	-380
6,00	0,00	0,00	100	100	-430	-380
8,00	0,00	0,00	100	100	-420	-370
10,00	0,00	0,00	100	100	-420	-360
12,00	0,00	0,00	100	100	-420	-360

25/01/01

T. de anál.	N-NO ₂ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ % rem.	N-NO _x % rem.	Redox (mV)		DQO _F (mg/l)
					antes	depois	
0,00	0,26	12,89	0	0	13	13	79
0,33	0,27	10,95	0	0	-43	-46	69
0,67	0,27	11,83	0	0	-167	-156	69
1,00	0,31	7,14	10	23	-171	-164	62
1,33	0,32	7,95	0	14	-210	-190	54
1,67	0,35	6,92	13	25	-310	-295	52
2,00	0,33	4,98	37	45	-330	-323	52
2,33	0,29	3,33	58	62	-375	-335	48
2,67	0,15	1,90	76	79	-380	-341	44
3,00	0,00	0,00	100	100	-387	-347	41
3,33	0,00	0,00	100	100	-423	-390	40
3,67	0,00	0,00	100	100	-429	-379	41
5,67	0,00	0,00	100	100	-430	-380	40
7,67	0,00	0,00	100	100	-434	-381	42
9,67	0,00	0,00	100	100	-428	-379	33
11,67	0,00	0,00	100	100	-429	-380	33

Tabela E7 - Perfis realizados no RSBA_n, na fase 5 do trabalho, com o uso da relação DQO/N-NO₃⁻ igual a 14,0, com monitoramento de todos os parâmetros

27/01/01

T. de anál.	N-NO ₂ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ % rem.	N-NO _x % rem.	Redox (mV)	
					antes	depois
0,00	1,04	10,44	0	0	70	46
2,00	0,17	0,00	100	99	-162	-135
4,00	0,00	0,00	100	100	-390	-336
6,00	0,00	0,00	100	100	-400	-341
8,00	0,00	0,00	100	100	-459	-355
10,00	0,00	0,00	100	100	-462	-361
12,00	0,00	0,00	100	100	-470	-371

29/01/01

T. de anál.	N-NO ₂ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ % rem.	N-NO _x % rem.	Redox (mV)	
					antes	depois
0,00	1,10	11,20	0	0	70	52
2,00	0,17	0,00	100	99	-165	-145
4,00	0,00	0,00	100	100	-391	-340
6,00	0,00	0,00	100	100	-398	-360
8,00	0,00	0,00	100	100	-450	-390
10,00	0,00	0,00	100	100	-460	-369
12,00	0,00	0,00	100	100	-480	-380

Tabela E7 - Perfis realizados no RSBA_n, na fase 5 do trabalho, com o uso da relação DQO/N-NO₃⁻ igual a 14,0, com monitoramento de todos os parâmetros (cont.)

28/01/01

T. de anál.	NTK (mg/l)	N-am (mg/l)	N-NO ₂ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ % rem.	N-NO _x % rem.	Redox (mV)		DQOf (mg/l)	DQOb (mg/l)	pH	Ác.Vol.	Alcal.	P (mg/l)	C (mg/l)	L (mg/l)
							antes	depois								
0,00	2,7	0,5	1,02	11,39	0	0	67	28	128	273	7,2	14	147	63	6	8
0,33			1,13	9,34	18	16	-36	-25	136	286	7,2	13	144	68	11	7
0,67			1,74	7,99	30	22	-66	-55	113	242	7,2	14	150	62	11	5
1,00			1,62	5,17	55	45	-107	-90	99	265	7,2	13	169	54	10	4
1,33			1,16	2,93	74	67	-139	-112	85	236	7,2	12	168	52	4	7
1,67			0,05	1,76	85	85	-268	-225	88	239	7,2	12	195	54	5	8
2,00	2,2	0,5	0,00	0,00	100	100	-405	-344	82	257	7,2	10	172	56	4	7
2,33			0,00	0,00	100	100	-426	-364	78	263	7,2	11	186	56	4	9
2,67			0,00	0,00	100	100	-467	-394	75	275	7,2	11	160	54	4	10
3,00			0,00	0,00	100	100	-470	-403	83	231	7,1	10	182	55	5	10
3,33			0,00	0,00	100	100	-470	-388	78	245	7,1	11	171	51	6	7
3,67	2,2	1,0	0,00	0,00	100	100	-472	-383	84	188	7,1	11	181	60	6	10
5,67	1,6	0,8	0,00	0,00	100	100	-479	-394	87	158	7,1	12	178	60	7	9
7,67	1,6	0,8	0,00	0,00	100	100	-478	-384	88	137	7,1	12	168	52	6	9
9,67	1,6	1,0	0,00	0,00	100	100	-477	-387	79	124	7,1	11	181	50	6	7
11,67	0,0	0,0	0,00	0,00	100	100	-467	-398	73	126	7,1	12	176	48	4	5

Tabela E8 - Valores de sólidos totais para o substrato e RSBAe medidos durante a fase 5 do trabalho

[illegible]

Tabela E9 - Valores de sólidos totais para RSEAn e liquor misto do RSBAe, medidos durante a fase 5 do trabalho

[illegible]

Tabela E10 - Valores de DQO bruta, DQO filtrada, proteínas, carboidratos e lipídeos medidos para a fonte de carbono durante a fase 5 do trabalho

Relação DQO/N-NO ₃	Ciclos	Data	Fonte de carbono				
			DQO _T	DQO _s	P	C	L
2	1	15/01/01	567	190	-	-	-
	2	16/01/01	980	350	144	160	650
	3	17/01/01	1000	333	-	-	-
5	6	20/01/01	1200	750	-	-	-
	8	22/01/01	526	335	-	-	-
	9	23/01/01	804	245	140	150	502
10	10	24/01/01	930	345	-	-	-
	11	25/01/01	935	345	145	167	490
	12	26/01/01	-	-	-	-	-
14	13	27/01/01	1130	424	-	-	-
	14	28/01/01	1230	395	140	170	850
	15	29/01/01	-	-	-	-	-

Figur E1- Curvas de decaimento de nitrato de primeira ordem ajustadas para os perfis das Fase 5 do trabalho

ANEXO F

**Dados obtidos na fase 6 do trabalho usando
como fonte de carbono
etanol**

Tabela F1 - Valores dos parâmetros monitorados na fase 6, com uso da relação DQO/N-NO₃⁻ igual a 14

Data	SUBSTRATO			RSBAe					RSBAn				
	pH	DQO _B	DQO _F	pH	DQO _B	DQO _F	EDQO _B	EDQO _F	pH	DQO _B	DQO _F	RD _A	RD _D
01/02/01	7,6	541	412	7,4	27	26	-	-	7,0	57	48	-452	77
02/02/01	7,5	520	398	7,4	32	28	94	93	7,1	50	47	-450	80

Data	SUBSTRATO				RSBAe				RSBAn			
	N-NTK	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₂ ⁻	N-NO ₃ ⁻	N-NTK	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₂ ⁻	N-NO ₃ ⁻	N-NTK	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₂ ⁻	N-NO ₃ ⁻
01/02/01	-	-	0,0	4,5	-	-	0,2	22,5	-	-	0,1	1,0
02/02/01	-	-	0,0	4,6	-	-	0,0	23,0	-	-	0,0	1,0

Data	RSBAn					
	ST	STF	STV	SST	SSTF	SSTV
01/02/01	780	414	366	174	6	168
02/02/01	-	-	-	-	-	-

Data	Produção de gás (%)		
	N	CH ₄	CO ₂
01/02/01	97,26	1,17	1,57
02/02/01	97,2	1,1	1,7

Tabela F2 - Perfis realizados no RSBA_n, na fase 6 do trabalho, com o uso da relação DQO/N-NO₃⁻ igual a 14,0

N-NO₂⁻, N-NO₃⁻, DQOF e pR

01/02/01								02/02/01							
T. de anál.	N-NO ₂ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ % rem.	N-NO _x % rem.	REDOX (mV)		DQOf (mg/l)	T. de anál.	N-NO ₂ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ (mg/l)	N-NO ₃ ⁻ % rem.	N-NO _x % rem.	REDOX (mV)		DQOf (mg/l)
					antes	depois							antes	depois	
0,00	1,24	10,00	0	0	77	70	248	0,00	1,30	12,00	0	0	80	71	258
0,33	1,25	7,33	27	24	2	30	244	0,33	1,20	8,00	33	31	3	35	245
0,67	1,50	6,56	34	28	-10	10	250	0,67	1,40	7,10	41	36	-21	15	251
1,00	1,73	6,56	34	26	-41	2	242	1,00	1,60	6,90	43	36	-52	3	241
1,33	1,19	3,22	68	61	-55	-8	240	1,33	1,20	3,00	75	68	-60	-12	241
1,67	0,76	1,47	85	80	-98	-39	239	1,67	0,80	1,52	87	83	-98	-41	235
2,00	0,74	1,47	85	80	-117	-33	236	2,00	0,75	1,50	88	83	-115	-30	234
2,33	0,00	0,00	100	100	-174	-66	232	2,33	0,00	0,00	100	100	-175	-62	230
2,67	0,00	0,00	100	100	-255	-223	223	2,67	0,00	0,00	100	100	-265	-213	220
3,00	0,00	0,00	100	100	-311	-249	227	3,00	0,00	0,00	100	100	-321	-235	221
3,33	0,00	0,00	100	100	-367	-298	200	3,33	0,00	0,00	100	100	-365	-299	199
3,67	0,00	0,00	100	100	-370	-271	228	3,67	0,00	0,00	100	100	-375	-281	198
5,67	0,00	0,00	100	100	-369	-282	221	5,67	0,00	0,00	100	100	-365	-280	196
7,67	0,00	0,00	100	100	-399	-299	215	7,67	0,00	0,00	100	100	-401	-302	199
9,67	0,00	0,00	100	100	-468	-350	194	9,67	0,00	0,00	100	100	-470	-352	195
11,67	0,00	0,00	100	100	-468	-385	186	11,67	0,00	0,00	100	100	-472	-386	189

Figura F1- Curva de decaimento de nitrato de primeira ordem ajustada para os perfis da Fase 6 do trabalho

ANEXO G

Dados obtidos na fase 7 do trabalho usando
como fonte de carbono
metanol

Tabela G1 - Valores dos parâmetros monitorados na fase 7, com uso da relação DQO/N-NO₃⁻ igual a 14

Data	SUBSTRATO			RSBAe					RSBAn				
	pH	DQO _B	DQO _F	pH	DQO _B	DQO _F	EDQO _B	EDQO _F	pH	DQO _B	DQO _F	RD _A	RD _D
05/02/01	7,6	487	364	7,4	30	26	-	-	7,0	57	47	-467	70
06/02/01	7,5	495	360	7,4	35	28	93	92	7,1	50	45	-458	85

Data	SUBSTRATO				RSBAe				RSBAn			
	N-NTK	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₂ ⁻	N-NO ₃ ⁻	N-NTK	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₂ ⁻	N-NO ₃ ⁻	N-NTK	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₂ ⁻	N-NO ₃ ⁻
05/02/01	-	-	0,0	5,5	-	-	0,0	29,9	-	-	0,0	1,1
06/02/01	-	-	0,0	4,9	-	-	0,0	28,0	-	-	0,0	1,0

Data	RSBAn					
	ST	STF	STV	SST	SSTF	SSTV
05/02/01	750	378	372	168	5	163
06/02/01	-	-	-	-	-	-

Data	Produção de gás (%)		
	N	CH ₄	CO ₂
05/02/01	97,94	0,99	1,07
06/02/01	97,93	1	1,07

Tabela G2 - Perfis realizados no RSBA_n, na fase 7 do trabalho, com o uso da relação DQO/N-NO₃ igual a 14,0, com monitoramento parâmetros de todos os

05/02/01							
T. de anál.	NO2 (mg/l)	NO3 (mg/l)	NO3 % rem.	NOX % rem.	REDOX (mV)		DQOf (mg/l)
					antes	depois	
0,00	1,46	12,60	0	0	70	67	244
0,33	2,03	9,34	26	19	0	38	248
0,67	2,27	8,79	30	21	-9	27	239
1,00	2,10	7,99	37	28	-23	5	230
1,33	1,95	5,57	56	46	-32	6	237
1,67	0,82	1,58	88	83	-49	9	232
2,00	1,03	1,76	86	80	-50	0	230
2,33	0,12	0,66	95	94	-87	-19	229
2,67	0,00	0,62	95	96	-198	-140	226
3,00	0,00	0,00	100	100	-274	-159	230
3,33	0,00	0,00	100	100	-302	-201	230
3,67	0,00	0,00	100	100	-317	-203	223
5,67	0,00	0,59	95	96	-365	-250	222
7,67	0,00	0,00	100	100	-390	-256	215
9,67	0,00	0,00	100	100	-395	-280	210
11,67	0,00	0,00	100	100	-412	-305	201

05/02/01							
T. de anál.	NO2 (mg/l)	NO3 (mg/l)	NO3 % rem.	NOX % rem.	REDOX (mV)		DQOf (mg/l)
					antes	depois	
0,00	2,00	13,50	0	0	85	70	251
0,33	2,04	9,80	27	24	5	42	249
0,67	2,30	8,90	34	28	-11	29	238
1,00	2,00	8,10	40	35	-32	9	231
1,33	1,96	6,00	56	49	-33	8	236
1,67	0,90	1,60	88	84	-50	8	230
2,00	0,90	1,70	87	83	-60	1	230
2,33	0,10	0,50	96	96	-85	-22	228
2,67	0,00	0,50	96	97	-195	-141	224
3,00	0,00	0,00	100	100	-286	-158	225
3,33	0,00	0,00	100	100	-299	-210	225
3,67	0,00	0,00	100	100	-320	-205	221
5,67	0,00	0,59	96	96	-356	-245	220
7,67	0,00	0,00	100	100	-395	-265	210
9,67	0,00	0,00	100	100	-395	-289	205
11,67	0,00	0,00	100	100	-420	-312	200

Figura G1- Curva de decaimento de nitrato de primeira ordem ajustada para os perfis da Fase 7 do trabalho