

FERNANDA ROBERTA CARNIELO GARCIA

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE UM REATOR ANAERÓBIO
COMPARTIMENTADO NO TRATAMENTO DE SORO DE QUEIJO**

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciência de Alimentos, área de Tecnologia e Ciência de Alimentos junto ao Programa de Pós-graduação em Engenharia e Ciência de Alimentos do Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, Campus de São Jose do Rio Preto.

São José do Rio Preto

fevereiro de 2009

Garcia, Fernanda Roberta Carnielo.

Avaliação do desempenho de um reator anaeróbico compartimentado no tratamento de soro de queijo / Fernanda Roberta Carnielo Garcia. - São José do Rio Preto : [s.n.], 2009.

108 f. ; 30 cm.

Orientador: Vanildo Luiz Del Bianchi

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas

1. Tecnologia de alimentos. 2. Microbiologia. 3. Resíduos industriais. 4. Reatores anaeróbicos. I. Del Bianchi, Vanildo Luiz. II. Universidade Estadual Paulista, Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas. III. Título.

CDU - 579.67

FERNANDA ROBERTA CARNIELO GARCIA

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE UM REATOR ANAERÓBIO
COMPARTIMENTADO NO TRATAMENTO DE SORO DE QUEIJO**

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof. Dr. Vanildo Luiz Del Bianchi

2º. Examinador: Profª Drª Tânia Maria Alberte

3º. Examinador: Prof. Dr. Crispim Humberto Garcia Cruz

São José do Rio Preto

fevereiro de 2009

Em memória de meu pai Anésio.

Dedico este trabalho a minha mãe Lourdes, minha irmã Daniela, ao meu marido André e aos meus avós Luiz e Joana.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por nunca ter me deixado desistir.

Ao meu orientador, professor Vanildo, por ter me dito um “sim” depois de alguns “nãos” recebidos; por seus ensinamentos e, acima de tudo, por sua paciência e amizade.

Aos integrantes da banca examinadora de minha qualificação e desta dissertação (Prof^a Dr^a Tânia Maria Alberte e Prof. Dr. Crispim Humberto Garcia Cruz).

Aos colegas de laboratório, Gisele, Wesley, José Herelis, Gleyce, Fernanda Ferraz, Antonio “Nalbert” e Cezar, que muito contribuíram para este trabalho, tanto por me auxiliar nas tarefas cotidianas, quanto no companheirismo.

Aos colegas da pós graduação, Crislene, Daniele, Renata, Janaina, Fernanda Seixas, Fernanda Ernandes, Thais, Thaise, Thereza, Raquel, Adriana e Ana Paula Rizzati por dividir comigo as angústias e alegrias destes anos.

Aos técnicos dos laboratórios, Newton, Tânia, Jesuino, Luis e Ginaldo, e à Betinha por sempre me socorrer.

Às minhas amigas de pensão, Fernanda Sbrissa, Camila, Caroline, Juliana e Mariana pelos momentos de descontração.

Aos meus amigos que me cederam suas casas, Renata e Diego Carvalho, e Mônica e Rômulo Moraes.

À Alcoeste Destilaria Fernandópolis S/A que, em um gesto nobre, cedeu-me um dia semanal de meu trabalho para a realização deste trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão de bolsa de estudos.

e *“Aprender é a única coisa de que a mente nunca se cansa, nunca tem medo
nunca se arrepende.”*

(Leonardo da Vinci)

RESUMO

Este trabalho teve por objetivo avaliar o desempenho de um reator anaeróbio compartimentado no tratamento de soro de queijo. Para tanto, foi utilizado um reator de 4,9 L com cinco compartimentos, inoculados com lodo biológico granulado obtido de uma indústria da região. O reator foi operado com variados tempos de residência hidráulicos (1 a 4 dias) e concentrações de soro de queijo que variaram de 2500 a 11000 DQO mg L⁻¹. Foram efetuadas as análises de Acidez e Alcalinidade, Turbidez, pH, Demanda Química de Oxigênio (DQO), Sólidos Voláteis (SV) e Sólidos Totais (ST). A partir dos resultados obtidos, e devido às características do reator, foi possível compreender a dinâmica do processo anaeróbio, nas fases acidogênica e metanogênica, tanto na geração / desaparecimento da alcalinidade / acidez, como na redução da carga orgânica. Na primeira etapa da pesquisa, o soro de queijo da alimentação do reator foi diluído a uma DQO de 2500 mg L⁻¹, e o reator mantido em quatro tempos de residência hidráulicos (TRH), 4, 3, 2 e 1 dia. Com TRH 4 dias, a redução da DQO foi de 96,3%. Com TRH 3 dias, o reator apresentou um problema de queda no pH e, devido a isso, foi dividido em duas partes: a primeira na qual o reator apresentou uma redução de 97,3% e a outra na qual a redução foi de 89,4%. Com TRH 2 dias, a redução de DQO foi de 89,5%; e com TRH 1 dia a redução foi de 50,5%. A segunda etapa da pesquisa contou com um aumento da concentração de soro de queijo na alimentação do reator, DQO 6000 mg L⁻¹, e TRHs de 3, 2 e 1 dia. Com TRH 3 dias, a redução de DQO foi 80,7%, com TRH 2 dias 74,0% e com TRH 1 dia, a redução foi 33,5%. Na terceira etapa da pesquisa, a concentração do soro foi elevada para uma DQO de 11000 mg L⁻¹, sendo testado o TRH 3 dias e como a eficiência do reator na redução da DQO apresentou um baixo valor, 47,1%, nenhum outro TRH foi testado.

Palavras-chave: digestão anaeróbia, reator compartimentado, soro de queijo, redução de DQO.

ABSTRACT

This study aimed to evaluate the efficiency of an anaerobic baffled reactor treating cheese whey. For this, it was used a five-compartment reactor, 4.9 L, inoculated with granular sludge obtained from a biological industry in the region. The reactor was operated at different hydraulic residence times (HRT) from 1 to 4 days and the concentration of cheese whey was of 2500 to 11000 mg COD L⁻¹. The procedures included analyses of acidity and alkalinity, turbidity, pH, chemical oxygen demand (COD), volatile solids (VS) and total solids (TS). From the results shown and due to the characteristics of the reactor, it was possible to understand the dynamics of the anaerobic process at the acidogenic and methanogenic stages both in the generation / disappearance of alkalinity / acidity and in reducing the organic load. In the first stage of research, the cheese whey used for feeding the reactor was diluted to a 2500 mg L⁻¹ COD. The reactor was maintained at four hydraulic residence times (HRT) of 4, 3, 2 and 1 days. At a HRT of 4 days, the reduction in the COD was 96.3%. At a HRT of 3 days, the reactor had a problem - a decrease in pH and because of that, it was divided into two parts: in the first part the reactor showed a reduction of 97.3% and in the second one, the reduction was of 89.4%. At a HRT of 2 days, the reduction in the COD was of 89.5%; and at a HRT of 1 day, the reduction was of 50.5%. During the second stage of the survey, there was an increase of the concentration of cheese whey while feeding the reactor, COD 6000 mg L⁻¹, and at a HRT of 3, 2 and 1 day. At a HRT of 3 days, the reduction in the COD was of 80.7%; at a HRT of 2 days, it was 74.0% and at a HRT of 1 day, the reduction was of 33.5%. In the third stage of the study, the concentration of whey was increased to a COD of 11000 mg L⁻¹, being tested at a HRT of 3 days and since the efficiency of the reactor in the COD reduction showed a low value, 47.1%, no other HRT was tested.

Key words: anaerobic digestion, baffled reactor, cheese whey, DQO reduction.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema da digestão anaeróbia, mostrando as sequências metabólicas e grupos microbianos.....	27
Figura 2. Variações do reator compartimentado.....	38
Figura 3. Reator Anaeróbio Compartimentado utilizado neste estudo.....	42
Figura 4. Comportamento médio da redução de DQO nos quatro TRH com DQO 2500 mg L ⁻¹	51
Figura 5. Comportamento médio do pH nos quatro TRH com DQO 2500 mg L ⁻¹	56
Figura 6. Comportamento médio da acidez nos quatro TRH com DQO 2500 mg L ⁻¹	59
Figura 7. Comportamento médio da alcalinidade nos quatro TRH com DQO 2500 mg L ⁻¹	63
Figura 8. Redução média da turbidez na saída do reator, em relação à entrada com DQO 2500 mg L ⁻¹	66
Figura 9. Redução média de ST e SV na saída do reator nos diferentes TRH com DQO 2500 mg L ⁻¹	68
Figura 10. Comportamento médio da redução de DQO nos três TRH com DQO 5000 mg L ⁻¹	73

Figura 11. Comportamento médio do pH nos três TRH com DQO 5000 mg L ⁻¹	76
Figura 12. Comportamento médio da acidez nos três TRH com DQO 5000 mg L ⁻¹	79
Figura 13. Comportamento médio da alcalinidade nos três TRH com DQO 5000 mg L ⁻¹	82
Figura 14. Redução média da turbidez na saída do reator, em relação à entrada com DQO 5000 mg L ⁻¹	85
Figura 15. Redução média de ST e SV na saída do reator nos diferentes TRH com DQO 5000 mg L ⁻¹	87
Figura 16. Comportamento médio da redução de DQO no TRH 3 dias com DQO 10000 mg L ⁻¹	89
Figura 17. Comportamento médio do pH no TRH 3 dias com DQO 10000 mg L ⁻¹ ...	91
Figura 18. Comportamento médio da acidez no TRH 3 dias com DQO 10000 mg L ⁻¹	93
Figura 19. Comportamento médio da alcalinidade no TRH 3 dias com DQO 10000 mg L ⁻¹	94
Figura 20. Redução média de ST e SV na saída do reator no TRH 3 dias com DQO 10000 mg L ⁻¹	98

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Vantagens e desvantagens dos processos anaeróbios.....	24
Tabela 2. Parâmetros para a digestão anaeróbia mesofílica.....	32
Tabela 3. Vantagens do reator anaeróbio compartimentado.....	36
Tabela 4. Características do soro de queijo utilizado.....	41
Tabela 5. Resultados de DQO (mg L^{-1}) e % de redução ao longo dos compartimentos com TRH 4 dias com DQO inicial 2500 mg L^{-1}	46
Tabela 6. Resultados de DQO (mg L^{-1}) e % de redução ao longo dos compartimentos com TRH 3 dias com DQO inicial 2500 mg L^{-1} (Primeira Parte).....	47
Tabela 7. Resultados de DQO (mg L^{-1}) e % de redução ao longo dos compartimentos com TRH 3 dias com DQO inicial 2500 mg L^{-1} (Segunda Parte).....	47
Tabela 8. Resultados de DQO (mg L^{-1}) e % de redução ao longo dos compartimentos com TRH 2 dias com DQO inicial 2500 mg L^{-1}	49
Tabela 9. Resultados de DQO (mg L^{-1}) e % de redução ao longo dos compartimentos com TRH 1 dia com DQO inicial 2500 mg L^{-1}	50
Tabela 10. Valores de pH ao longo dos compartimentos com TRH 4 dias com DQO inicial 2500 mg L^{-1}	53
Tabela 11. Valores de pH ao longo dos compartimentos com TRH 3 dias com DQO inicial 2500 mg L^{-1}	53
Tabela 12. Valores de pH ao longo dos compartimentos com TRH 2 dias com DQO inicial 2500 mg L^{-1}	54

Tabela 13. Valores de pH ao longo dos compartimentos com TRH 1 dia com DQO inicial 2500 mg L ⁻¹	54
Tabela 14. Acidez ao longo dos compartimentos com TRH 4 dias com DQO inicial 2500 mg L ⁻¹	57
Tabela 15. Acidez ao longo dos compartimentos com TRH 3 dias com DQO inicial 2500 mg L ⁻¹	57
Tabela 16. Acidez ao longo dos compartimentos com TRH 2 dias com DQO inicial 2500 mg L ⁻¹	58
Tabela 17. Acidez ao longo dos compartimentos com TRH 1 dia com DQO inicial 2500 mg L ⁻¹	58
Tabela 18. Alcalinidade ao longo dos compartimentos com TRH 4 dias com DQO inicial 2500 mg L ⁻¹	60
Tabela 19. Alcalinidade ao longo dos compartimentos com TRH 3 dias com DQO inicial 2500 mg L ⁻¹	61
Tabela 20. Alcalinidade ao longo dos compartimentos com TRH 2 dias com DQO inicial 2500 mg L ⁻¹	61
Tabela 21. Alcalinidade ao longo dos compartimentos com TRH 1 dia com DQO inicial 2500 mg L ⁻¹	62
Tabela 22. Médias da relação acidez/alcalinidade para os quatro TRH com DQO inicial 2500 mg L ⁻¹	64
Tabela 23. Valores de turbidez ao longo dos compartimentos do RAC com DQO inicial 2500 mg L ⁻¹	65

Tabela 24. Sólidos Totais e Sólidos Voláteis da entrada e saída do reator e % de redução com DQO inicial 2500 mg L ⁻¹	67
Tabela 25. Resultados de DQO (mg L ⁻¹) e % de redução ao longo dos compartimentos com TRH 3 dias com DQO inicial 5000 mg L ⁻¹	69
Tabela 26. Resultados de DQO (mg L ⁻¹) e % de redução ao longo dos compartimentos com TRH 2 dias com DQO inicial 5000 mg L ⁻¹	70
Tabela 27. Resultados de DQO (mg L ⁻¹) e % de redução ao longo dos compartimentos com TRH 1 dia com DQO inicial 5000 mg L ⁻¹	72
Tabela 28. Valores de pH ao longo dos compartimentos com TRH 3 dias com DQO inicial 5000 mg L ⁻¹	74
Tabela 29. Valores de pH ao longo dos compartimentos com TRH 2 dias com DQO inicial 5000 mg L ⁻¹	75
Tabela 30. Valores de pH ao longo dos compartimentos com TRH 1 dia com DQO inicial 5000 mg L ⁻¹	75
Tabela 31. Acidez ao longo dos compartimentos com TRH 3 dias com DQO inicial 5000 mg L ⁻¹	77
Tabela 32. Acidez ao longo dos compartimentos com TRH 2 dias com DQO inicial 5000 mg L ⁻¹	78
Tabela 33. Acidez ao longo dos compartimentos com TRH 1 dia com DQO inicial 5000 mg L ⁻¹	78
Tabela 34. Alcalinidade ao longo dos compartimentos com TRH 3 dias com DQO inicial 5000 mg L ⁻¹	80

Tabela 35. Alcalinidade ao longo dos compartimentos com TRH 2 dias com DQO inicial 5000 mg L ⁻¹	80
Tabela 36. Alcalinidade ao longo dos compartimentos com TRH 1 dia com DQO inicial 5000 mg L ⁻¹	81
Tabela 37. Médias da relação acidez/alcalinidade para os três TRH com DQO inicial 5000 mg L ⁻¹	83
Tabela 38. Valores de turbidez ao longo dos compartimentos do RAC com DQO inicial 5000 mg L ⁻¹	84
Tabela 39. Sólidos Totais e Sólidos Voláteis da entrada e saída do reator e % de redução com DQO inicial 5000 mg L ⁻¹	86
Tabela 40. Resultados de DQO (mg L ⁻¹) e % de redução ao longo dos compartimentos com TRH 3 dias com DQO inicial 10000 mg L ⁻¹	88
Tabela 41. Valores de pH ao longo dos compartimentos com TRH 3 dias com DQO inicial 10000 mg L ⁻¹	90
Tabela 42. Acidez ao longo dos compartimentos com TRH 3 dias com DQO inicial 10000 mg L ⁻¹	92
Tabela 43. Alcalinidade ao longo dos compartimentos com TRH 3 dias com DQO inicial 10000 mg L ⁻¹	93
Tabela 44. Médias da relação acidez/alcalinidade para o TRH 3 dias com DQO inicial 10000 mg L ⁻¹	95
Tabela 45. Valores de turbidez ao longo dos compartimentos do RAC com DQO inicial 10000 mg L ⁻¹	96

Tabela 46. Sólidos Totais e Sólidos Voláteis da entrada e saída do reator e % de redução com DQO inicial 10000 mg L⁻¹**97**

Tabela 46. Resultados relacionados à DQO para todos os tratamentos **100**

SUMÁRIO

RESUMO.....	viii
ABSTRACT	ix
LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABELAS	xii
1. INTRODUÇÃO	19
2. OBJETIVOS	20
3. REVISÃO DA LITERATURA	21
3.1. Soro de queijo	21
3.2. Digestão anaeróbia	22
3.2.1. Microbiologia da digestão anaeróbia	25
3.2.2. Fatores que interferem no processo da digestão anaeróbia	31
3.3. Reatores Anaeróbios	33
3.3.1. Partida um reator anaeróbio	34
3.4. Reator Anaeróbio Compartimentado	35
4. MATERIAL E METÓDOS	40
4.1. Desenvolvimento da pesquisa	40
4.2. Local da pesquisa	40
4.3. Água residuária	40
4.4. Inoculo	41
4.5. Reator	41
4.6. Análises físico-químicas.....	42
4.6.1. Demanda Química de Oxigenio (DQO)	42
4.6.2. Alcalinidade e Acidez	42
4.6.3. pH	43
4.6.4. Sólidos Totais (ST) e Sólidos Voláteis (SV)	43
4.6.5. Turbidez	43
4.7. Cálculo da eficiência da redução de DQO	43
4.8. Análise estatística	43
5. RESULTADOS E DISCUSSAO	45
5.1. Partida do reator	45
5.2. Primeira etapa – DQO 2500 mg L ⁻¹	45
5.2.1. Desempenho na Redução de DQO	45
5.2.2. pH, acidez e alcalinidade	52

5.2.3. Turbidez, Sólidos Totais e Sólidos Voláteis	64
5.3. Segunda etapa – DQO 5000 mg L ⁻¹	69
5.3.1. Desempenho na Redução de DQO	69
5.3.2. pH, acidez e alcalinidade	74
5.3.3. Turbidez, Sólidos Totais e Sólidos Voláteis	83
5.4. Terceira etapa – DQO 10000 mg L ⁻¹	88
5.4.1. Desempenho na Redução de DQO	88
5.4.2. pH, acidez e alcalinidade	89
5.4.3. Turbidez, Sólidos Totais e Sólidos Voláteis	95
5.5. Análise geral	98
6. CONCLUSÕES	101
7. SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS	102
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	103

1. INTRODUÇÃO

A digestão anaeróbia vem sendo utilizada com sucesso no tratamento de diferentes tipos de resíduos orgânicos. Muitos autores indicam-na como a principal tecnologia de tratamento de águas residuárias industriais e domésticas. Isso se deve às inúmeras vantagens que o tratamento anaeróbio de águas residuárias apresenta sobre o tratamento aeróbio.

O desenvolvimento da digestão anaeróbia, bem como sua popularização, só se tornou possível devido ao desenvolvimento de reatores de alta taxa. Este tipo de reator intensifica o contato do substrato com a biomassa e separa o tempo de residência hidráulico (TRH), que é o tempo que o substrato fica em contato com a biomassa, do tempo de residência celular (TRC), que é o tempo que a biomassa permanece no reator.

Entre os vários modelos de reatores anaeróbios de alta taxa, encontra-se o Reator Anaeróbio Compartimentado (RAC). Este reator é dividido em compartimentos, ou câmaras, através de chicanas. Cada compartimento possui duas partes: uma com fluxo descendente e outra com fluxo ascendente.

Muitos trabalhos têm sido feitos com a utilização do RAC, que apresentou ser muito eficiente na redução da carga orgânica de diversos tipos de águas residuárias, tais como: manipueira, resíduo de suinocultura, água residuária de destilaria e de fábrica de papel.

Na fabricação de queijos, a maior parte do leite utilizado é transformada em soro, que é muito rico em nutrientes, e, ultimamente, uma parcela do soro produzido vem sendo utilizada na preparação de diversos produtos da alimentação humana e animal.

Devido à sua alta concentração orgânica (DQO 50000 - 70000 mg L⁻¹), o soro de queijo não pode ser descartado sem ter passado antes por algum tipo de tratamento. Vários tipos de reatores, tanto aeróbios como anaeróbios, já foram testados para esta finalidade.

Como a digestão anaeróbia tem sido muito utilizada para o tratamento do soro de queijo e os reatores anaeróbios vêm apresentando excelentes resultados na redução da carga orgânica deste substrato, pretende-se avaliar neste trabalho, o desempenho de um Reator Anaeróbio Compartimento neste processo.

2. OBJETIVOS

Avaliar o desempenho de um reator anaeróbio compartimentado no tratamento do efluente proveniente da fabricação de queijo (soro de queijo), em relação à eficiência da redução de DQO operando em diferentes concentrações.

Compreender a dinâmica do processo anaeróbio, nas fases acidogênica e metanogênica, em relação à variação de pH, alcalinidade, acidez, turbidez, sólidos totais e sólidos voláteis em diferentes concentrações de DQO.

3. REVISÃO DA LITERATURA

3.1. Soro de queijo

O soro de queijo é a porção aquosa do leite que se separa do coágulo durante a fabricação de queijos ou da caseína, e que retém aproximadamente 55% dos nutrientes do leite (KOSIKOWSKI, 1979 apud SQUILASSI *et al.*, 2007).

Este subproduto contém aproximadamente 6,0 a 6,5% de sólidos totais, sendo cerca de 4,5 a 5,0% de lactose, 0,8 a 1,1% de proteína, 0,03 a 0,1% de gordura, 0,5 a 0,8% de matéria mineral e 0,2 a 0,9% de ácido lático (MORESI, 1994 apud RÉVILLION; BRANDELLI; AYUB, 2000).

A fabricação de queijo, seja por métodos tradicionais ou modernos, produz uma grande quantidade de soro (aproximadamente 83% do volume total de leite utilizado), e isso torna a disposição do soro um dos maiores problemas para as indústrias. Como o soro de queijo contém muitos nutrientes, como as proteínas do soro, lactose e minerais, não deve ser descartado como um resíduo, mas ser estocado e utilizado para a alimentação humana (SCOTT, 1998).

Dados da Associação Brasileira das Indústrias de Queijo – ABIQ demonstram que a produção anual de queijos no Brasil tem-se mantido em cerca de 350.000 toneladas nos últimos anos, gerando cerca de 3,5 milhões de toneladas de soro de queijo utilizado principalmente como alimento animal na sua forma bruta ou processado em pó para a produção de biscoitos e alimentos lácteos (PONSANO; CASTRO-GOMEZ, 1995 apud RÉVILLION; BRANDELLI; AYUB, 2000).

Devido aos problemas enfrentados pelas indústrias para efetuarem o tratamento do soro como água residuária industrial, adequando-o às exigências dos órgãos de inspeção e saúde pública, começaram a serem efetuados na década de 60, os testes de aproveitamento para o soro de queijo (KOSIKOWSKI, 1967; NELSON & BROWN, 1969 apud SQUILASSI *et al.*, 2007).

Mas, de acordo com Malaspina e colaboradores (1996), a maioria das fábricas de queijo de pequeno e médio porte não tem uma conveniência econômica ou dimensão de mercado que justifique a maioria das tecnologias disponíveis para a utilização do soro. Essas fábricas estão normalmente ligadas a fazendas de criação

de suínos, onde o soro de queijo é diretamente utilizado na alimentação dos animais.

O soro de queijo constitui uma importante fonte de contaminação ambiental, e, por isso, faz-se necessário o desenvolvimento de técnicas que permitam eliminar o efeito negativo de sua disposição (DOMINGUES; LIMA; TEIXEIRA, 2007).

Apesar da sua alta biodegradabilidade, o tratamento do soro de queijo através da digestão anaeróbia é bastante problemático, devido a sua baixa alcalinidade, sua alta concentração de DQO, a tendência de se acidificar rapidamente, a dificuldade de se obter granulação e a tendência em produzir materiais exopoliméricos viscosos de provável origem bacteriana (SUTHERLAND, 1985 apud MALASPINA *et al.*, 1996) que reduzem a estabilidade do lodo e podem causar uma lavagem da biomassa (GUIOT *et al.*, 1988 apud MALASPINA *et al.*, 1996).

O soro de queijo possui uma demanda química de oxigênio (DQO) de, aproximadamente, 60 a 80 g L⁻¹. A digestão anaeróbia do soro de queijo pode apresentar um impacto ambiental positivo desde que ocorra a combinação da estabilização da matéria orgânica com a utilização do efluente como fertilizador (PATEL; MADAMWAR, 1998).

Apesar de suas vantagens, a digestão anaeróbia não é muito utilizada nas indústrias de laticínios. Isso se deve ao fato de que as reações na digestão anaeróbia são lentas, o que requer maiores tempos de residência hidráulicos e os reatores anaeróbios convencionais não apresentam grandes desempenhos na estabilização da matéria orgânica (PATEL; DESAI; MADAMWAR, 1995).

3.2. Digestão anaeróbia

A digestão anaeróbia é um processo de degradação da matéria orgânica que acontece através da ação de microrganismos anaeróbios. Neste processo, moléculas mais energéticas são transformadas em substâncias mais simples como dióxido de carbono, água, metano, entre outras.

Uma maior utilização de métodos biológicos para o tratamento de águas residuárias domésticas e industriais vem ocorrendo devido aos seus baixos custos comparados aos métodos químicos. Entretanto, os processos aeróbios,

principalmente os reatores de lodo ativado, são mais utilizados que os processos anaeróbios devido a falsas idéias de que o tratamento anaeróbio não é eficiente para tratar águas residuárias de baixa carga ($< 1000 \text{ mg DQO L}^{-1}$), que não suportam compostos inibitórios nas águas residuárias, que não operam em baixas temperaturas ($< 35^\circ\text{C}$) e que apresentam pouco desempenho de remoção (LANGENHOFF; INTRACHANDRA; STUCKEY, 2000).

Segundo os mesmos autores, o tratamento aeróbio produz grandes quantidades de lodo ativado que tem que ser degradado anaerobicamente antes de ser disposto e consome quantidades substanciais de energia. A digestão anaeróbia de águas residuárias de baixa carga orgânica produz uma menor quantidade de lodo biológico do que o sistema aeróbio, resultando então em menos lodo a ser disposto. Entretanto, o tratamento deste tipo de água residuária resulta em uma menor produção de gás e um menor contato entre a biomassa e o substrato e baixa remoção de DQO.

No processo de conversão da matéria orgânica na ausência de oxigênio são utilizados aceptores de elétrons inorgânicos como NO_3^- (redução de nitrato), SO_4^{2-} (redução de sulfato), ou CO_2 (formador de metano). A formação de metano não pode ocorrer onde oxigênio, nitrato ou sulfato encontram-se prontamente disponíveis no ambiente (CHERNICHARO, 1997).

Segundo McHugh, Collins e O'Flaherty (2006), a digestão anaeróbia vem sendo utilizada no tratamento de águas residuárias orgânicas a aproximadamente um século, e está sendo reconhecida como a maior tecnologia de tratamento para águas residuárias urbanas e industriais.

Em todo o mundo e principalmente na América Latina, vem ocorrendo ultimamente um grande desenvolvimento da digestão anaeróbia, pois esta apresenta vantagens em relação ao tratamento aeróbio, podendo-se destacar o escasso volume de lodo gerado, a estabilização da matéria orgânica e a geração de energia através do biogás (PAULA JÚNIOR, 1996).

Na Tabela 1, são apresentadas as principais vantagens e desvantagens dos processos anaeróbios.

TABELA 1. Vantagens e desvantagens dos processos anaeróbios

Vantagens	Desvantagens
- baixa produção de sólidos	- as bactérias anaeróbias são susceptíveis à inibição por um grande número de compostos
- baixo consumo de energia	- a partida do processo pode ser lenta na falta de lodo adaptado
- baixa demanda de área	- bioquímica e microbiologia complexas
- baixos custos de implantação	- maus odores podem ser gerados
- produção de metano	- os efluentes podem apresentar aspecto desagradável
- possibilidade de preservação da biomassa, sem alimentação do reator por vários meses	- insatisfatória remoção de nitrogênio, fósforo e patogênicos
- tolerância a elevadas cargas orgânicas	
- aplicabilidade em pequena e grande escala	
- baixo consumo de nutrientes	

Fonte: Adaptado de Chernicharo (1997)

Apesar de o tratamento anaeróbio conseguir reduzir aproximadamente 90% da demanda química de oxigênio (DQO), um dos fatores que limitam sua utilização é a DQO do efluente que é ainda mais alta do que pode ser descartado de acordo com os padrões de descarte de resíduos da maioria dos países industrializados (BARKER *et al.*, 1999).

Segundo Foresti e colaboradores (1999), nos sistemas de tratamento anaeróbio, a digestão da matéria orgânica é otimizada, pois o sistema de tratamento mantém uma grande quantidade de bactérias ativas em um contato intenso com a matéria orgânica.

Na aplicação do processo anaeróbio, os produtos de maior interesse são aqueles resultantes da reação anaeróbia completa, isto é, produtos estáveis (como os gases metano, hidrogênio e dióxido de carbono), pois não sofrem alterações se lançados ao meio ambiente (RAMIRES, 2005).

Segundo a mesma autora, 90 a 95% de toda a matéria orgânica metabolizada é transformada em metano, e o restante, 5 a 10%, é transformado em massa bacteriana.

De acordo com Bodík e colaboradores (2003), até na década de 80, o

tratamento de águas residuárias era realizado, quase que totalmente, através de reatores aeróbios. Ao final desta década, vários estudos envolvendo os processos anaeróbios começaram a ser feitos e os reatores anaeróbios começaram a ser utilizados para o tratamento de águas residuárias. Entretanto, a tecnologia anaeróbia para o tratamento de águas residuária só se impulsionou a partir do desenvolvimento e utilização dos reatores anaeróbios de alta taxa (BARBER; STUCKEY, 1999).

O Brasil está na frente de vários países na utilização e aceitação dos reatores anaeróbios, principalmente os reatores de manta de lodo, e isso se deve, principalmente, ao fato de que as condições climáticas do país favorecem a utilização da tecnologia da digestão anaeróbia (CHERNICHARO, 1997; AQUINO, 2005).

3.2.1. **Microbiologia da Digestão Anaeróbia**

Segundo Santana e Oliveira (2005), dentre os progressos científicos e tecnológicos que mais contribuíram para o desenvolvimento do tratamento anaeróbio de águas residuárias, destaca-se a notável evolução do conhecimento dos processos microbiológicos, interagindo com os avanços obtidos pelas várias configurações de reatores estudadas.

Em um biodigestor, as bactérias são interdependentes. Neste, as bactérias formadoras de ácidos tornam o meio do biodigestor livre de oxigênio, produzem alimento básico para as metanogênicas e enzimas que degradam proteínas e aminoácidos, ocorrendo formação de sais de amônia, que é a única fonte de nitrogênio utilizada pelas metanogênicas. Estas convertem os produtos finais das primeiras em gases que escapam do sistema. Se isto não ocorresse, o biodigestor seria tão ácido que destruiria as próprias bactérias geradoras de ácidos. As metanogênicas e as bactérias redutoras de sulfato também removem hidrogênio do meio, fazendo com que ocorra a conversão de ácidos, como propiônico, butírico e de acetato (MASSEY & POHLAND, 1978; GHOSH & KLASS, 1978; BRYANT, 1979; VILLEN *et al.*, 1981; GHOSH, 1981; SOUZA, 1984 apud BARANA, 2000).

O metabolismo bacteriano é o mecanismo mais importante para remoção de

material orgânico nos sistemas de tratamento biológico, ou seja, é a utilização do material orgânico como fonte de energia ou fonte de material para a síntese de material celular. Quando o material orgânico é utilizado como fonte de energia, ele é transformado em produtos estáveis num processo chamado catabolismo. Agora, quando o material orgânico é transformado e incorporado na massa celular, o processo é denominado anabolismo. O anabolismo é um processo que consome energia e somente é viável se o catabolismo estiver ocorrendo simultaneamente e fornecendo a energia necessária para a síntese do material celular (FERNANDES, 2007).

A digestão anaeróbia pode ser considerada um sistema ecológico extremamente balanceado, onde cada microrganismo tem uma função especial (CHERNICHARO, 1997). A Figura 1 apresenta um esquema da digestão anaeróbia.

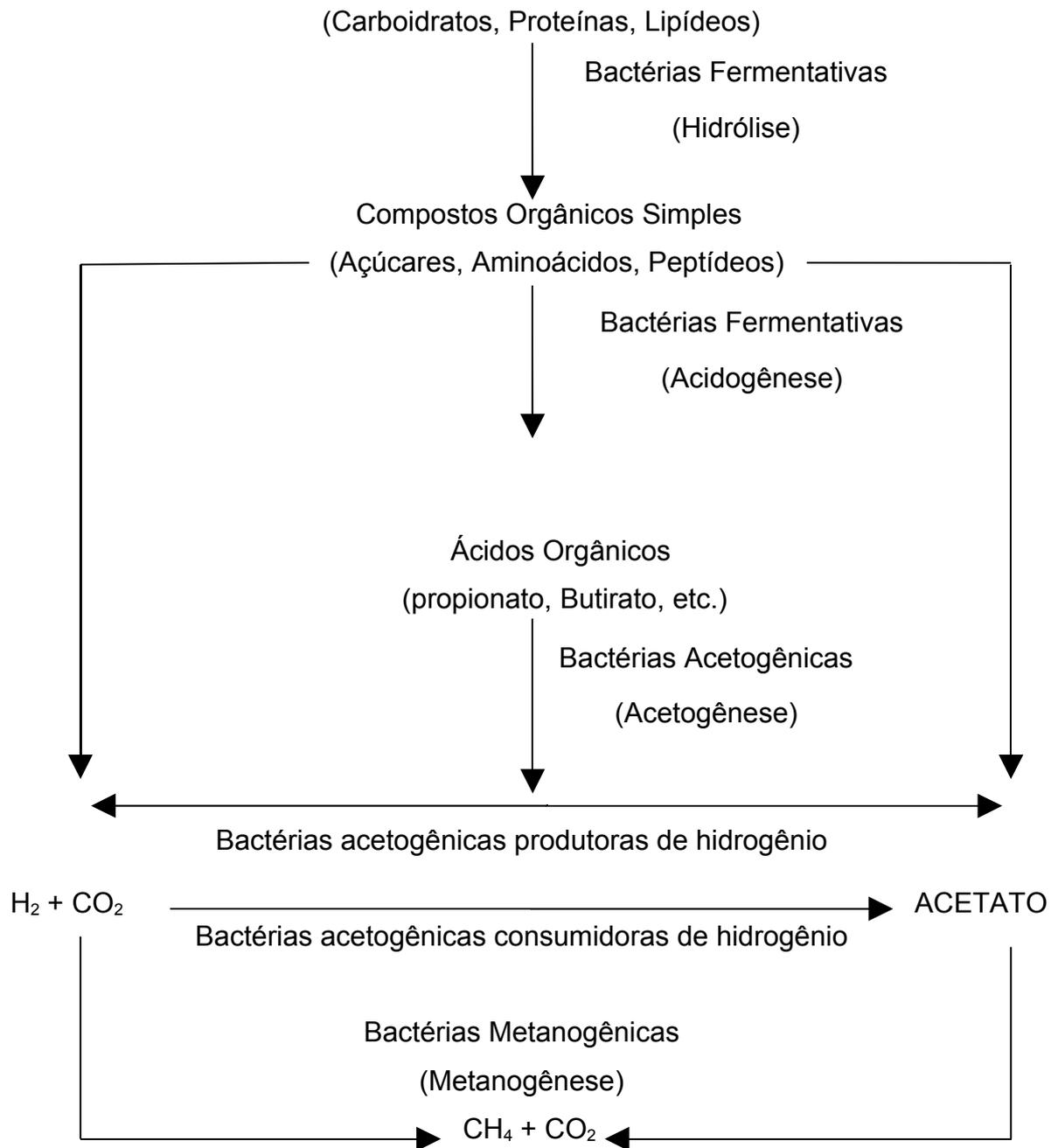


FIGURA 1. Esquema da digestão anaeróbia, mostrando as sequências metabólicas e grupos microbianos, adaptado de Chernicharo (1997).

O processo da digestão anaeróbia pode ser dividido em quatro fases.

a) Hidrólise

A hidrólise é a etapa em que a matéria orgânica complexa (polímeros) é transformada em compostos menores, ou seja, de menor peso molecular através de exoenzimas liberadas pelas bactérias fermentativas.

Nesta fase não há a estabilização da matéria orgânica, apenas acontece a conversão do material complexo a uma forma solúvel que possa ser utilizada pelas bactérias (RAMIRES, 2005).

b) Acidogênese

Nesta fase, os produtos originários da fase de hidrólise são metabolizados no interior das células das bactérias fermentativas e excretados como substâncias mais simples como ácidos graxos voláteis de cadeia curta, alcoóis, ácido láctico e compostos minerais como CO_2 , H_2 , NH_3 e H_2S (CHERNICHARO, 1997; FORESTI *et al.*, 1999).

Chernicharo (1997) cita, como exemplos de bactérias fermentativas, gêneros como *Clostridium* e *Bacteroids*.

c) Acetogênese

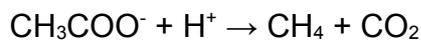
Na fase de acetogênese ocorre a conversão dos produtos oriundos da fase acidogênica em compostos que dão origem aos substratos necessários para a produção de metano, tais como acetato (CH_3COO^-), H_2 e CO_2 (FORESTI *et al.*, 1999).

As bactérias acetogênicas são divididas em dois grupos, bactérias acetogênicas produtoras de hidrogênio (redutoras de prótons) e bactérias acetogênicas consumidoras de hidrogênio (homoacetogênicas). Estas bactérias são associadas às metanogênicas de forma sintrófica e mantém um balanço energético favorável no processo da digestão anaeróbia (RAMIRES, 2005).

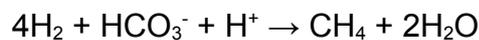
d) Metanogênese

A última etapa da degradação de compostos orgânicos em metano e CO₂ pela via anaeróbia é feita pelas bactérias metanogênicas (CHERNICHARO, 1997). De acordo com Foresti e colaboradores (1999), o metano é produzido a partir da redução do acetato pelas bactérias acetotróficas (ou acetoclásticas), ou a partir da redução de dióxido de carbono através das bactérias hidrogenotróficas de acordo com as reações catabólicas:

- Metanogênese acetotrófica ou acetoclástica:



- Metanogênese hidrogenotrófica:



As metanogênicas acetotróficas produzem cerca de 60 a 70% de todo metano gerado. *Methanosarcina* e *Methanosaeta* são os principais gêneros de metanogênicas acetotróficas. Os principais gêneros de metanogênicas hidrogenotróficas são: *Methanobacterium*, *Methanospirillum* e *Methanobrevibacter* (SOUBES, 1994 apud CHERNICHARO, 1997).

Na degradação pela via anaeróbia de substratos que sejam ricos em sulfato, pode ocorrer uma quinta fase denominada sulfetogênese.

De acordo com Chernicharo (1997), é nesta fase que sulfato, sulfito e outros compostos sulfurados são reduzidos a sulfeto pela ação de bactérias anaeróbias estritas, denominadas bactérias redutoras de sulfato (ou bactérias sulfurredutoras).

Segundo Silva (1999), o crescimento de bactérias redutoras de sulfato é limitado por vários fatores em ambientes anaeróbios, sendo o principal a disponibilidade de sulfato dissolvido. O sulfato é reduzido a sulfeto através de uma forma assimilativa quando o sulfeto de hidrogênio (H₂S) formado é imediatamente convertido para enxofre orgânico como aminoácidos, ou de uma forma dissimilativa quando o H₂S é excretado para o meio.

As bactérias redutoras de sulfato podem crescer utilizando vários compostos orgânicos como fonte de energia para o metabolismo, sendo que a maioria das espécies oxida estes compostos para CO₂ e também, durante o crescimento, assimilam compostos intermediários como precursores para os compostos

monoméricos e poliméricos do novo material celular (SILVA, 1999).

A redução biológica de sulfato em reatores anaeróbios é considerada indesejável, pois o sulfato oxida material orgânico que deixa de ser transformado em metano e no processo forma-se gás sulfídrico. Que, além de ser corrosivo, confere odor desagradável tanto à fase líquida como ao biogás, além de poder ser tóxico ao processo de metanogênese (FORESTI *et al.*, 1999).

3.2.2. Fatores que interferem no processo da digestão anaeróbia

Segundo Ramires (2005), são vários os fatores que podem afetar a digestão anaeróbia, podendo intensificar ou inibir parâmetros como a velocidade de crescimento e declínio, a produção de gás, a utilização de substrato, a partida do reator, entre outros.

As necessidades das populações microbianas que atuam nos processos biológicos de tratamento de águas residuárias são normalmente estabelecidas a partir da composição química das células microbianas. Devido à falta de conhecimento da composição química exata, os requisitos de nutrientes são determinados baseando-se na composição empírica das células microbianas (CHERNICAHRO, 1997).

As condições nutricionais e as condições físicas podem proporcionar a seleção dos organismos mais adaptados ao ambiente, os quais, por sua vez, podem variar rápida e freqüentemente às mudanças no suprimento de nutrientes ou em função das condições físicas. Alguns nutrientes, como nitrogênio, enxofre, fósforo, ferro, cobalto, níquel, molibdênio, selênio, riboflavina e vitamina B₁₂, são necessários ao crescimento das bactérias metanogênicas (CHERNICARRO, 1997). Dentre estes, merecem ser destacados o nitrogênio, o fósforo e o enxofre.

O pH, a alcalinidade e a concentração de ácidos voláteis são os fatores mais importantes em sistemas anaeróbios por estarem intimamente relacionados entre si (RAMIRES, 2005). O controle de pH tem como objetivo principal a eliminação do risco de inibição das bactérias metanogênicas pelos baixos valores de pH, evitando assim a falha do processo (CHERNICARRO, 1997).

A ocorrência de mudanças bruscas de pH pode afetar o processo de forma

negativa, sendo que a recuperação dependerá de vários fatores, que relacionam-se ao tipo de dano causado às bactérias (permanente ou temporário) (CHERNICHARO, 1997).

De acordo com Ramires (2005), quando o processo funciona nas condições de normalidade, o pH se mantém próximo da neutralidade, mas se algum fator é alterado, o pH sofre um declínio e precisa ser corrigido para que se evite a diminuição da atividade biológica do sistema. É evidente que se deve corrigir a causa do declínio do pH dos reatores através da análise dos outros parâmetros como carga orgânica, variações na alimentação e temperatura.

A verificação da alcalinidade no monitoramento de reatores anaeróbios é mais importante que a verificação do pH. Isso porque o pH possui uma escala logarítmica, ou seja, um pequeno abaixamento do pH implica no consumo de elevada quantidade de alcalinidade diminuindo a capacidade de tamponamento do meio (CHERNICHARO, 1997).

As sobrecargas orgânicas, tóxica e hidráulica (aumento repentino na vazão de despejos em níveis que resultem na lavagem das bactérias metanogênicas) proporcionam o acúmulo de ácidos graxos voláteis nos digestores (SOUZA, 1982 apud RAMIRES, 2005).

A influência da temperatura é bastante importante nos sistemas biológicos, pois as velocidades das reações bioquímicas são afetadas diretamente por ela. Nos processos anaeróbios, essa influência requer atenção especial, pois as bactérias anaeróbias são muito sensíveis a variações de temperatura e, às vezes, uma pequena variação pode interromper a produção de metano, acarretando no acúmulo de ácidos voláteis (BITTON, 1994 apud SILVA, 2005).

A formação de metano através dos microrganismos pode ocorrer em uma ampla faixa de temperatura (0 a 97°C), porém apenas dois níveis ótimos de temperatura têm sido associados à digestão anaeróbia: um na faixa mesofílica (30 a 35°C) e o outro na faixa termófila (50 a 55°C). A maior parte dos digestores anaeróbios tem sido projetada na faixa mesófila, pois a experiência da operação dos digestores na faixa de temperatura termófila não tem sido totalmente satisfatória, havendo ainda muito questionamento, tais como se os benefícios advindos superam as desvantagens, incluindo o suplemento de energia necessário para aquecer os digestores, a má qualidade do sobrenadante e a instabilidade do processo (CHERNICHARO, 1997).

A digestão anaeróbia também é influenciada pela presença de compostos tóxicos. Em excesso, qualquer nutriente ou elemento em solução no reator pode causar sintomas de toxidez na massa microbiana. Porém, devido à complexidade do processo, é muito difícil definir uma concentração exata destes elementos para que sejam nocivos (FERNANDES, 2004 apud RAMIRES, 2005).

Na Tabela 2 são citados alguns parâmetros da digestão anaeróbia.

TABELA 2. Parâmetros para a digestão anaeróbia mesofílica

Temperatura	Ótima	35°C
	Valor usual para	29,4 a 35,0°C
pH	operação Ótimo	7,0 a 7,2
Redução de Sólidos	Limite usual Sólidos voláteis	6,7 a 7,4 50 a 75%
Concentração de ácidos voláteis (expressa ac. acético)	Sólidos suspensos Operação normal	35 a 50% 50 a 250 mg L ⁻¹
Alcalinidade (expressa CaCO ₃)	Máximo	Aprox. 2000 mg L ⁻¹
Produção de gás	Operação normal Por kg de ácidos voláteis adicionado Por kg de ácidos	1000 a 5000 mg L ⁻¹ 0,37 a 0,75 m ³ 0,75 a 1,12 m ³
Composição do gás	voláteis consumido CH ₄	55 a 75%
	CO ₂	25 a 45%
	H ₂ S	Traço
	H ₂	Traço
	N ₂	Traço

Fonte: REYNOLDS & RICHARDS (1996) apud RAMIRES (2005)

3.3.Reatores anaeróbios

Os processos anaeróbios são duplamente economizadores de energia elétrica: em primeiro lugar, porque não exigem equipamentos de aeração artificial

como nos processos aeróbios e os equipamentos mecânicos complementares são poucos e raramente utilizados; em segundo lugar, a produção de biogás pode ser eventualmente aproveitada na indústria, se estudos de viabilidade técnica e econômica forem bem conduzidos (KOETZ; FARIA; NUNES, 1995).

Desde que a biotecnologia anaeróbia para tratamento de águas residuárias começou a ser estudada, muitos desenvolvimentos foram feitos nos modelos e na operação dos reatores com o objetivo de melhorar a eficiência e a confiabilidade desta tecnologia (UYANIK; SALLIS; ANDERSON, 2002).

Os primeiros reatores anaeróbios consistiam em reatores de mistura sem reciclo de sólidos biológicos, onde o tempo de residência celular (TRC) era o mesmo que o tempo de residência hidráulico (TRH). Quando começou-se a entender melhor os processos biológicos, foram desenvolvidas unidades onde os valores de TRC eram muito maiores aos de TRH, através de decantadores secundários e de sistema de recirculação do lodo biológico. No final da década de 60, foram desenvolvidas novas configurações de reatores anaeróbios cuja principal característica era a capacidade de reter, em seu interior, a biomassa aderida em suporte fixo ou nos interstícios do material de recheio. Os filtros anaeróbios com escoamento ascendente originaram unidades semelhantes de fluxo ascendente, desenvolvidas para se evitar os inconvenientes de possíveis entupimentos do leito. Outras unidades, como os reatores de leito fluidizado e os reatores anaeróbios de manta de lodo e fluxo ascendente, aumentaram as opções tecnológicas de uso de processos anaeróbios. O primeiro por eliminar problemas de entupimento e o segundo por permitir o desenvolvimento de lodo auto-imobilizado na forma de grânulos (ZAIAT, 1996).

O desenvolvimento de novas configurações de reatores anaeróbios passa pelo melhor aproveitamento do volume útil reacional, com a conseqüente diminuição do volume total e pela melhoria do desempenho, estabilidade e facilidade de operação (ZAIAT, 1996).

Considerando que grande parte dos microrganismos anaeróbios, particularmente as bactérias metanogênicas, tem uma lenta taxa de crescimento, para que um reator tenha um bom desempenho seu modelo deve promover um alto tempo de retenção de células bacterianas com uma pequena perda destas células (FAISAL; UNNO, 2001).

O sucesso da aplicação da tecnologia anaeróbia no tratamento de águas residuárias industriais é extremamente dependente do desenvolvimento e utilização dos biorreatores alta taxa (BARBER; STUCKEY, 1999; WANG; HUANG; ZHAO, 2004).

Estes sistemas modernos de tratamento de águas residuárias possuem duas características principais que tornam seu desempenho superior: um dispositivo que possibilita a retenção de uma grande massa de lodo no sistema de tratamento e a intensificação do contato entre o material orgânico a ser tratado e o lodo presente no reator (FERNANDES, 2007).

Os biorreatores de alta taxa podem ser classificados em três grupos dependendo do mecanismo utilizado para a retenção da biomassa: leito fixo, crescimento suspenso e híbrido (BARBER; STUCKEY, 1999; WANG; HUANG; ZHAO, 2004).

Dos reatores anaeróbios existentes, 67% são reatores anaeróbios de manta de lodo (UASB – crescimento suspenso), 12% são tanques de agitação contínua, filtros anaeróbios 7%, outros 14% (HABETS, 1996; LETTINGA *et al.*, 1980; YOUNG, McCARTY, 1969 apud BARBER; STUCKEY, 1999).

3.3.1. Partida de um reator anaeróbio

A partida de um reator é o início do processo que envolve a inoculação do sistema, a aclimação do lodo ao resíduo e as condições de concentração orgânica e vazão específicas para esta fase de adaptação (BARANA, 2000).

Existem duas maneiras de se iniciar a biodigestão: com ou sem a adição de inóculo rico em bactérias metanogênicas (NOGUEIRA, 1986 apud ALMEIDA, 2005). De acordo com Barana (2000), quando se inicia a biodigestão com a adição de inóculo, o tempo de partida é reduzido e o período de estabilização do reator com produção normal de biogás é mais rápido. Quando não se utiliza o inóculo, o reator é alimentado com o substrato a ser tratado até que se obtenha massa microbiana desejável. A partida de um reator deve ser feita com tempo de residência hidráulico elevado, diminuindo-o gradativamente, para que não ocorra o acúmulo dos ácidos graxos voláteis.

A operação de reatores anaeróbios com uma alta carga orgânica pode induzir instabilidade no sistema, acúmulo de ácidos graxos voláteis e baixo pH (SALLIS; UYANIK, 2003).

3.4. Reator Anaeróbio Compartimentado

O reator anaeróbio compartimentado é um dos muitos modelos de reatores de alta taxa que é capaz de separar o tempo de retenção hidráulico (TRH) do tempo de retenção de sólidos (TRS). Isso permite que os microrganismos anaeróbios permaneçam dentro do reator e melhorem a eficiência do mesmo (SHE *et al.*, 2006).

O Reator Anaeróbio Compartimentado (RAC), cujo nome em inglês é *Anaerobic Baffled Reactor (ABR)*, que quer dizer reator anaeróbio de chicanas, tem este nome porque é dividido em compartimentos, ou câmaras, por chicanas. Estas fazem com que a água residuária passe acima e abaixo delas desde a entrada até a saída (McCARTY; BACHMANN, 1992 apud BARBER; STUCKEY, 1999).

O Reator Anaeróbio Compartimentado (RAC) foi desenvolvido por McCarty e colaboradores (BARBER; STUCKEY, 1999; SHE *et al.*, 2006). Ao estudar um reator com discos rotatórios, perceberam que a maior parte da biomassa ficava suspensa e ao remover os discos deram origem ao RAC.

Segundo Uyanik, Sallis e Anderson (2002), nos últimos anos vêm ocorrendo um crescimento nas pesquisas de reatores anaeróbios compartimentados em escala laboratorial porque estes apresentam numerosas vantagens sobre outros reatores anaeróbios convencionais. As vantagens do RAC são apresentadas na Tabela 3.

TABELA 3. Vantagens do reator anaeróbio compartimentado

Vantagens	
Construção	1 Desenho simples 2 Não possui partes móveis 3 Não possui mistura mecânica

	4 Construção de baixo custo
	6 Entupimento reduzido
	7 Expansão da manta de lodo reduzida
	8 Baixos custos de operação
Biomassa	1 Sem necessidade de meios para fixar a biomassa
	2 Baixa geração de lodo
	3 Altos tempos de retenção de sólidos
	4 Não requer separação de gás ou lodo
Operação	1 Baixo tempo de residência hidráulico
	2 Extremamente estável a choques hidráulicos
	3 Possível operação intermitente
	4 Proteção aos materiais tóxicos no afluente
	5 Longos tempos de operação sem eliminação de lodo
	6 Alta estabilidade a choques orgânicos

Fonte: Barber e Stuckey (1999)

As bactérias dentro do reator se movimentam suavemente para cima e para baixo devido às características do fluxo e à produção de gás (BARBER; STUCKEY, 1999).

A principal característica dos reatores anaeróbios compartimentados é a sua capacidade de separar as fases acidogênicas e metanogênicas longitudinalmente no reator, permitindo que diferentes grupos de bactérias se desenvolvam sob condições mais favoráveis. Dessa forma, o reator se comporta como um sistema de duas fases sem problemas de controle e custos altos (WEILAND; ROZZI, 1991 apud BARBER; STUCKEY, 1999; JEYSEELAN; MATSUO, 1995; BHATTACHARYA *et al.*, 1996 apud SHE *et al.*, 2006). Além disso, o RAC combina as vantagens de um filtro anaeróbio, que tem uma alta estabilidade e alta confiabilidade, e um processo de lodo anaeróbio de fluxo ascendente cuja massa microbiológica não precisa de um meio suporte (BOOPATHY, 1998). Segundo Nachaiyasit e Stuckey (1997), a estrutura do RAC faz com que a maioria da biomassa não seja exposta a baixos pHs durante o choque de cargas e melhora a estabilidade do reator. Existem algumas variações nos modelos do RAC que são apresentadas na Figura 2.

O grau de mistura que acontece dentro do reator tem bastante influência sobre o contato entre o substrato e a biomassa bacteriana, e assim controla a capacidade de transferência de massa do reator (BARBER; STUCKEY, 1999).

Em cada compartimento de um único RAC, vários tipos de microrganismos podem se desenvolver. A ecologia microbiana dentro de cada compartimento

dependerá do tipo e da quantidade de substrato presente, assim como de parâmetros externos tais como pH e temperatura. Na zona de acidificação do RAC (primeiro (s) compartimento (s)), ocorre o crescimento de bactérias capazes de crescer em altos níveis de substrato fazendo com que ocorra a diminuição do pH. As bactérias que se desenvolvem melhor em pH mais alto estarão presentes nos compartimentos finais do reator (BARBER; STUCKEY, 1999; UYIANIK; SALLIS; ANDERSON, 2002).

Quanto às metanogênicas, Uyianik, Sallis e Anderson (2002) analisaram a biomassa de um RAC e verificaram que nos compartimentos iniciais os microrganismos encontrados foram os que utilizam como substrato H_2/CO_2 e formato, tais como *Methanobrevibacter*, *Methanococcus*, e nos compartimentos finais populações que utilizam acetato, tais como *Methanosaeta* e *Mathanosarcina*.

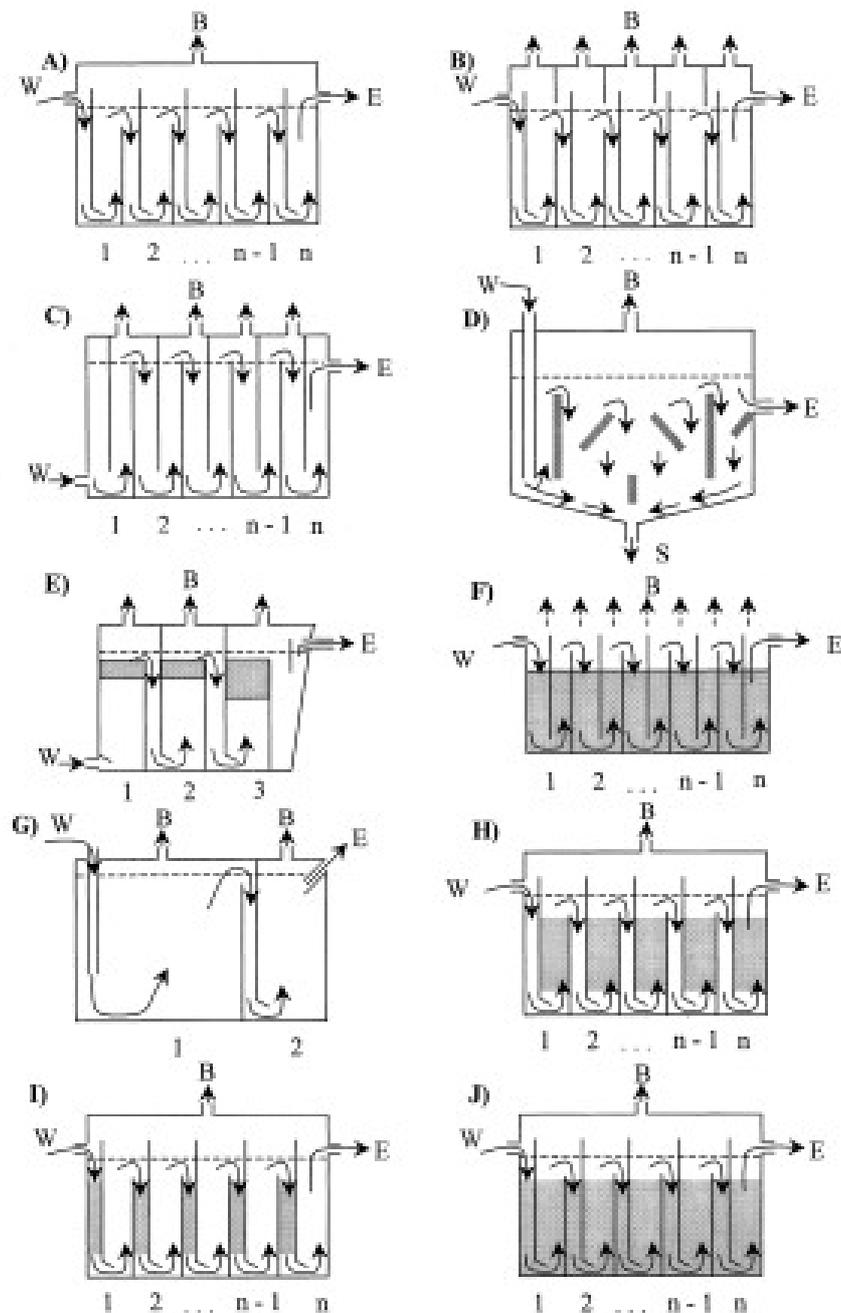


FIGURA 2. Variações do reator compartimentado. (A) Espaço único para gás, (B) espaço individual para gás, (C) vertical, (D) horizontal, (E) híbrido com zona de assentamento, (F) topo aberto, (G) primeiro compartimento mais largo, (H – J) vários arranjos de empacotamento, (H) empacotamento nas partes de fluxo ascendente, (I) empacotamento nas partes de fluxo descendente, (J) empacotamento no reator inteiro. Legenda: W = água residuária, B = biogás, E = efluente, S = sólidos.

Fonte: BARBER; STUCKEY, 1999.

Boopathy (1998) estudou quatro reatores anaeróbios compartimentados no tratamento de resíduos de suinocultura, com dois, três, quatro e cinco compartimentos, respectivamente, e descobriu que quanto mais compartimentos maior é a redução de sólidos, DQO e nitrogênio.

Nachaiyasit e Stuckey (1997) utilizando um RAC com TRH de 20 horas e 4 g L⁻¹, conseguiu obter 98% de redução de DQO no tratamento de um substrato sintético à base de carboidrato e proteína. Perceberam, também, que com o aumento da concentração da alimentação para 8 g L⁻¹ não ocorreu diminuição na redução de DQO, e que só com um aumento da concentração orgânica para 15 g L⁻¹ a redução caiu para 90%.

Lagenhoff e Stuckey (2000), utilizando um RAC com oito compartimentos tratando água residuária contendo leite com concentração inicial de 500 mg L⁻¹ com TRH de 10 horas obtiveram uma remoção de DQO de 90%.

She e colaboradores (2006), estudando um reator de quatro compartimentos tratando um substrato contendo sacarose com uma alimentação de 2,15 a 6,29 kg DQO m³ dia⁻¹ com TRH de 20 horas, obtiveram uma redução de 91 – 93% de DQO.

Kuşçu e Sponza (2005), estudando um reator anaeróbio de três compartimentos no tratamento de uma água residuária que continha *p*-nitrofenol com TRH de 10,38 dias e com uma DQO de alimentação de 3000 mg L⁻¹, obtiveram uma redução de DQO entre 90 e 99%.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Desenvolvimento da pesquisa

O pH do soro de queijo, na alimentação do reator, sofreu correção durante toda a pesquisa através da adição de bicarbonato de sódio ou carbonato de sódio. Isto foi realizado, pois o soro de queijo possui um baixo pH, aproximadamente 4,5, e, segundo Speece citado por Barana (2000) para o desenvolvimento das arqueas metanogênicas, o reator precisa operar com o pH entre 6,5 e 7,0.

As amostras foram coletadas na saída de cada compartimento, na entrada e na saída do reator.

As DQO de alimentação do reator e seus respectivos TRH foram:

- DQO 2500 mg L⁻¹, TRH 4, 3, 2 e 1 dia;
- DQO 5000 mg L⁻¹, TRH 3, 2 e 1 dia;
- DQO 10000 mg L⁻¹, TRH 3 dias.

4.2. Local da pesquisa

A pesquisa foi realizada no Laboratório de Bioprocessos do Departamento de Engenharia e Tecnologia de Alimentos, IBILCE/UNESP.

4.3. Água residuária

A água residuária utilizada para o estudo (soro de queijo) foi obtida do laboratório de Tecnologia de Leite e Derivados do Departamento de Engenharia e Tecnologia de Alimentos, IBILCE/UNESP. Foi utilizado soro de dois tipos de queijo, queijo tipo prato e requeijão, e suas características que foram determinadas através de ensaios estão descritas na Tabela 4.

TABELA 4. Características do soro de queijo utilizado

Parâmetros	Valores	
	Queijo tipo Prato	Requeijão
pH	4,0 – 6,5	4,5 – 6,5
DQO (mg L ⁻¹)	50.000 – 80.000	50.000 – 90.000
Acidez (mg CaCO ₃ L ⁻¹)	500 – 2.000	500 – 2.000
Alcalinidade (mg CaCO ₃ L ⁻¹)	1500	1.100 – 2.000
Sólidos Totais (g L ⁻¹)	55,35	65,86
Sólidos Voláteis (g L ⁻¹)	51,02	60,32

Depois de coletado, o soro de queijo foi encaminhado ao Laboratório de Bioprocessos, onde foi armazenado em lotes de 500, 1000 e 2000 mL e congelado a -18°C. Para alimentação do reator, o soro de queijo foi descongelado e diluído em concentrações pré-definidas, através da utilização dos dois tipos de soro de queijo, ou seja, 50% de cada um.

4.4. Inóculo

O reator foi inoculado com lodo granulado oriundo do tratamento anaeróbio da Indústria de Refrigerantes Arco-Íris de São José do Rio Preto-SP. A quantidade de lodo utilizada correspondeu a 40% do volume do reator de lodo.

4.5. Reator Anaeróbio Compartimentado

O Reator Anaeróbio Compartimentado (Figura 3) utilizado foi construído de vidro (4mm de espessura), com volume útil de 4,9L (10cm x 14cm x 35cm), igualmente dividido em cinco compartimentos.

As partes dos compartimentos de fluxo descendente são menores que as de fluxo ascendente para estimular a retenção de células nas partes de fluxo ascendente. As bordas das chicanas são inclinadas em um ângulo de 45° para forçar a direção do fluxo para o centro do compartimento, melhorando a mistura e o contato entre o substrato e a biomassa (BACHMANN *et al.*, 1983 apud BARBER;

STUCKEY, 1999; UYANIK; SALLIS; ANDERSON, 2002; SALLIS; UYANIK, 2003).

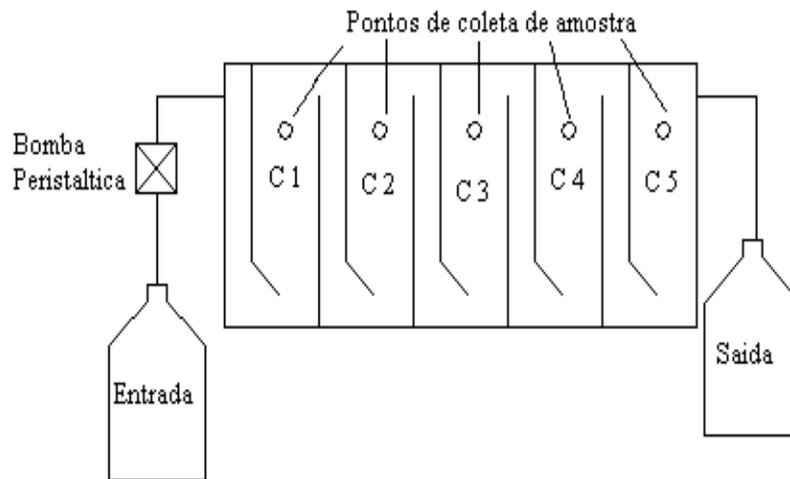


FIGURA 3. Reator Anaeróbio Compartimentado utilizado neste estudo

4.6. Análises físico-químicas

4.6.1. Demanda Química de Oxigênio (DQO)

Para realização das análises de DQO, foi utilizado o método colorimétrico de refluxo fechado, utilizando um digestor e espectrofotômetro 620 nm, aparelho da Hach Co., segundo metodologia da APHA (1995).

4.6.2. Alcalinidade e Acidez

Foram realizadas através do método titulométrico descrito em APHA (1995).

4.6.3. pH

Para esta determinação, foi utilizado um pHmetro PM 608 da marca Analion Indústria e Comércio Ltda, seguindo a metodologia descrita em APHA (1995).

4.6.4. Sólidos Totais (ST) e Sólidos Voláteis (SV)

Foram determinadas as quantidades de ST e SV segundo metodologia descrita em APHA (1995).

4.6.5. Turbidez

Para a determinação da turbidez foi utilizado um aparelho espectrofotômetro da Hach Co.

4.7. Cálculo da eficiência da redução de DQO

$$\% \text{ de redução} = \frac{\text{DQO entrada} - \text{DQO ponto de coleta}}{\text{DQO entrada}} \times 100$$

4.8. Análise estatística

Para análise dos resultados de DQO o delineamento experimental adotado foi o inteiramente casualizado, sendo os tratamentos compostos por número diferente de repetições. Os dados foram avaliados através do programa ESTAT – Sistema para Análises Estatísticas versão 2.0, abrangendo análise de comparação de médias pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Partida do reator

Segundo Barber e Stuckey (1999), na partida de um reator o efluente deve ser mantido em baixas concentrações e TRH alto para que a velocidade do fluxo no reator, a quantidade de efluente e a produção de gás não causem interferência no desenvolvimento de flocos ou grânulos.

Para que o período de partida do reator fosse diminuído, o lodo biológico foi adaptado ao substrato antes de ser inserido no reator, durante, aproximadamente, 30 dias. Essa adaptação ocorreu em um galão utilizando soro diluído com DQO de aproximadamente 2000 mg L⁻¹.

Durante a adaptação do lodo biológico, os microrganismos existentes no outro substrato (água residuária de indústria de bebidas refrigerantes) foram se adaptando gradativamente ao novo substrato (soro de queijo).

5.2. Primeira etapa – DQO 2500 mg L⁻¹

Na primeira etapa da pesquisa, a DQO da alimentação do reator foi 2.500 mg L⁻¹, aproximadamente, e os tempos de residência hidráulicos (TRH) foram de 4, 3, 2 e 1 dia.

5.2.1. Desempenho na Redução de DQO

A demanda química de oxigênio (DQO) acaba sendo o método mais empregado para se avaliar a eficiência dos tratamentos. Nos valores deste método constam não só a matéria orgânica facilmente degradável, mas também a matéria orgânica de difícil degradação.

No início do experimento, o reator foi mantido a um TRH de 4 dias. Com este TRH, a concentração orgânica volumétrica que o reator recebeu foi de aproximadamente 625 mg DQO L⁻¹ d⁻¹. Os resultados de DQO para TRH 4 dias são

apresentados na Tabela 5.

TABELA 5. Resultados de DQO (mg L^{-1}) e % de redução ao longo dos compartimentos com TRH 4 dias com DQO inicial 2500 mg L^{-1}

Entrada DQO	C 1		C 2		C 3		C 4		C 5		Saída	
	DQO	%	DQO	%	DQO	%	DQO	%	DQO	%	DQO	%
2355	2045	13,2	1818	22,8	1145	51,4	343	85,4	190	91,9	43	98,2
1745	1665	4,6	1065	39,0	395	77,4	210	88,0	157	91,0	45	97,4
1383	1368	1,1	1088	21,3	248	82,1	161	88,4	116	91,6	83	94,0
2243	2040	9,1	1575	29,8	505	77,5	277	87,7	261	88,4	159	92,9
2768	2050	25,9	1428	48,4	405	85,4	141	94,9	99	96,4	77	97,2
2403	1813	24,6	895	62,8	169	93,0	142	94,1	87	96,4	50	97,9
2580	1073	58,4	653	74,7	220	91,5	156	94,0	139	94,6	102	96,0
1585	1010	36,6	580	63,4	78	95,1	75	95,3	74	95,6	54	96,6
Médias												
2132	1633	21,7	1138	45,3	396	81,7	188	91,0	140	93,2	77	96,3

C1, C2, C3, C4, C5 = número do compartimento

É possível observar que a redução de DQO foi, de maneira geral, maior que 90% na saída do reator.

No início da pesquisa, a redução no primeiro compartimento não alcançava 10%, mas com a adaptação do lodo ao reator, a redução começou a aumentar, chegando a um valor máximo de 58,4%. Porém, como no início a redução foi pequena, a média deste compartimento ficou em 21,7%. É válido ressaltar que esta degradação ocorreu em aproximadamente 19 horas.

O mesmo comportamento ocorreu no segundo compartimento (após 38 horas, aproximadamente), onde a redução foi aumentando do início para o final desta etapa do experimento. A média da redução da DQO foi de 45,3%.

Depois de 58 horas, na saída do terceiro compartimento, a redução de DQO foi de 81,7%, em média; no quarto compartimento (depois de 77 horas) a redução média foi de 91,0%. Por fim, no quinto compartimento (perto de completar os 4 dias), a redução foi de 93,2%. A média de redução da DQO na saída do reator foi 96,3%.

De modo geral, pode-se afirmar que a maior parte da matéria orgânica (75,6%) foi degradada até o terceiro compartimento.

Resultado inferior foi obtido por Cordeiro (2006), que trabalhando com um RAC no tratamento da manipueira, para concentrações de DQO variando de 1000 a 5000 mg L^{-1} , relatou eficiência de 91% para TRH de cerca de 5 dias.

O passo seguinte consistiu em diminuir o TRH para 3 dias. Os valores de

DQO e suas respectivas porcentagens de redução estão apresentados nas Tabelas 6 e 7.

TABELA 6. Resultados de DQO (mg L^{-1}) e % de redução ao longo dos compartimentos com TRH 3 dias com DQO inicial 2500 mg L^{-1} (Primeira Parte)

Entrada DQO	C 1		C 2		C 3		C 4		C 5		Saída	
	DQO	%	DQO	%	DQO	%	DQO	%	DQO	%	DQO	%
2510	1283	48,9	715	71,5	148	94,1	115	95,4	104	95,9	52	97,9
2148	1183	44,9	575	73,2	119	94,5	110	94,9	95	95,6	83	96,1
1843	795	56,9	402	78,2	75	95,9	68	96,3	53	97,1	48	97,4
2498	1403	43,8	582	76,7	142	94,3	98	96,1	93	96,3	64	97,4
2010	1493	25,7	618	69,3	106	94,7	53	96,4	65	96,8	46	97,7
Médias												
2202	1231	44,0	578	73,8	118	94,7	89	95,8	82	96,3	77	97,3

C1, C2, C3, C4 e C5 = número do compartimento

TABELA 7. Resultados de DQO (mg L^{-1}) e % de redução ao longo dos compartimentos com TRH 3 dias com DQO inicial 2500 mg L^{-1} (Segunda Parte)

Entrada DQO	C 1		C 2		C 3		C 4		C 5		Saída	
	DQO	%	DQO	%	DQO	%	DQO	%	DQO	%	DQO	%
2548	1813	28,8	1443	43,4	908	64,4	702	72,4	422	83,4	392	84,6
3095	1935	37,5	1315	57,5	955	69,1	745	75,9	367	88,1	280	90,5
2628	1918	27,0	1355	48,4	867	67,0	764	70,9	539	79,5	220	91,6
2358	1620	31,3	1403	40,5	919	61,0	721	69,4	400	83,0	232	90,2
2358	1620	31,3	1403	40,5	919	61,0	721	69,4	400	83,0	232	90,2
Médias												
2597	1781	31,2	1384	46,1	914	64,5	731	71,6	426	83,4	271	89,4

Com a diminuição do TRH e mantendo uma mesma concentração de soro de queijo, ocorreu um aumento na carga orgânica volumétrica a ser tratada pelo reator. Com TRH 3 dias, este valor foi de $833 \text{ mg DQO L}^{-1} \text{ d}^{-1}$, aproximadamente.

Observou-se que os resultados apresentados na Tabela 6 dividem esta etapa da pesquisa com TRH 3 dias em dois: o primeiro quando o reator apresentou uma redução de DQO de 97,3%, em média, e o segundo quando ocorreu uma queda na redução de DQO para 89,4%. Isso ocorreu porque foi realizado um teste de utilização de carbonato de sódio para a correção do pH ao invés da utilização de bicarbonato de sódio. Segundo Chernicharo (1997), vários produtos podem ser utilizados para controlar o pH dos processos anaeróbios, dentre estes o carbonato de sódio (Na_2CO_3) e o bicarbonato de sódio (NaHCO_3).

Durante o teste, foi observado que a massa microbiana não se adaptou à mudança do produto, ocorrendo queda brusca na redução da DQO, diminuição do pH em todos os compartimentos, aumento da acidez e diminuição da alcalinidade.

Devido aos resultados obtidos no teste, a correção do pH na entrada do reator voltou a ser feita através da utilização de bicarbonato de sódio. Observou-se que o reator foi se recuperando, mas a redução de DQO não atingiu os mesmos resultados que vinha apresentando, ficando, a partir de então, 89,4%, em média.

Na primeira parte com TRH 3 dias, a redução de DQO foi, em média, após 14 horas, 44,0% no primeiro compartimento, 73,8% no segundo compartimento após 29 horas; 94,7% no terceiro compartimento após 43 horas; 95,8% no quarto compartimento após 58 horas; 96,3% no quinto compartimento e na saída 97,3%.

Já, na segunda parte desta etapa da pesquisa, foi possível observar que o reator não se recuperou e a redução de DQO foi inferior em todos os compartimentos, em relação à primeira parte.

No primeiro compartimento, a redução de DQO foi, em média, 31,2%; no segundo compartimento foi de 46,1%; no terceiro compartimento foi de 64,5%; no quarto compartimento foi de 71,6%; no quinto compartimento foi de 83,5% e na saída do reator a redução foi de 89,4%.

Assim, notou-se que, na primeira parte, o reator apresentou uma alta redução de DQO, maior do que a redução média obtida com TRH 4 dias (95,5%), e, que a maior parte da DQO foi reduzida já no segundo compartimento, redução de 73,8%. Na segunda parte, essa redução só foi alcançada no quarto compartimento, o que comprova a queda no desempenho do reator após a utilização do carbonato de sódio.

O próximo passo foi testar o reator com TRH 2 dias, e os resultados obtidos para essa condição se encontram na Tabela 8.

TABELA 8. Resultados de DQO (mg L^{-1}) e % de redução ao longo dos compartimentos com TRH 2 dias com DQO inicial 2500 mg L^{-1}

Entrada DQO	C 1		C 2		C 3		C 4		C 5		Saída	
	DQO	%	DQO	%	DQO	%	DQO	%	DQO	%	DQO	%
2943	2070	29,7	1735	41,0	1300	55,8	1163	60,5	750	74,5	458	84,4
2890	1970	31,8	1540	46,7	1110	61,6	843	70,8	590	79,6	135	95,3
2113	1335	36,8	988	53,2	625	70,4	418	80,2	250	88,2	167	92,1
3865	2213	42,7	1310	66,1	825	78,7	600	84,5	395	89,8	238	93,8
3335	2940	11,8	2460	26,2	1345	59,7	1101	67,0	740	77,8	468	86,0

1845	1435	22,2	1225	33,6	895	51,5	752	59,2	541	70,7	254	86,2
2310	1713	25,8	1390	39,8	965	58,2	691	70,1	509	78,0	299	87,1
2905	1705	41,3	1123	61,3	870	70,1	654	77,5	450	84,5	282	90,3
2845	2110	25,8	1680	40,9	1180	58,5	670	76,4	343	87,9	276	90,3
Médias												
2783	1943	29,8	1495	45,4	1013	62,7	766	71,8	508	81,2	286	89,5

C1, C2, C3, C4 e C5 = número do compartimento

Com TRH 2 dias, a carga orgânica volumétrica foi de 1250 mg DQO L⁻¹ d⁻¹, ou seja, a carga orgânica volumétrica dobrou em relação ao TRH 4 dias.

De acordo com a Tabela 7, foi possível observar que houve uma queda na redução da DQO em relação à primeira parte do experimento com TRH 3 dias, pois, em relação à segunda parte, os resultados obtidos foram bem próximos. Os valores de redução da saída do reator ficaram próximos a 90%.

A redução da DQO no primeiro compartimento (após 9,5 horas) foi de aproximadamente 30,0%. No segundo compartimento (após 19 horas), a redução média foi de 45,4%; no terceiro compartimento (após 29 horas) a redução foi em média 62,7%; no quarto compartimento (após 38 horas) a redução média foi de 71,8%; no quinto compartimento (perto de se completar dois dias) a redução foi, em média, de 81,2% e na saída do reator a redução média foi de 89,5%.

Observou-se que 70% da redução de DQO foi obtida no quarto compartimento, o que também ocorreu na segunda parte do experimento com TRH 3 dias.

Devido ao bom desempenho apresentado com TRH 2 dias, o reator foi submetido a uma nova diminuição no TRH, foi testado, então, o TRH 1 dia.

Na Tabela 9 são apresentados os resultados da redução de DQO com TRH de 1 dia.

TABELA 9. Resultados de DQO (mg L⁻¹) e % de redução ao longo dos compartimentos com TRH 1 dia com DQO inicial 2500 mg L⁻¹

Entrada DQO	C 1		C 2		C 3		C 4		C 5		Saída	
	DQO	%	DQO	%								
2725	2375	12,8	1915	29,7	1820	33,2	1930	29,2	1460	46,4	1380	49,4
2558	1888	26,2	1513	40,9	1320	48,4	1220	52,3	1048	59,0	1333	47,9
2255	2093	7,2	1930	14,4	1860	17,5	1555	31,0	1215	46,1	1085	51,9
2963	2235	24,6	1808	39,0	1548	47,8	1458	50,8	1215	59,0	1135	61,7
3028	2893	4,5	2345	22,6	2098	30,7	2025	33,1	1850	38,9	1595	47,3
3335	3115	6,6	2550	23,5	2360	29,2	2160	35,2	2048	38,6	1945	41,7
2348	2030	13,5	1945	17,2	1805	23,1	1570	46,4	1240	47,2	1095	53,4

Médias												
2745	2376	13,6	2001	26,8	1830	32,8	1703	39,7	1439	47,9	1367	50,5
C1, C2, C3, C4 e C5 = número do compartimento												

Com TRH 1 dia, a carga orgânica volumétrica foi de 2500 mg DQO L⁻¹ d⁻¹. Observou-se que o reator não apresentou uma boa redução da DQO, a média de redução na saída do reator foi de 50,5%, valor muito baixo, se comparado aos outros TRH já testados.

No primeiro compartimento, após 4,8 horas, a redução foi em média 13,6%; no segundo compartimento, após 9,6 horas, a redução foi de 26,8%; o dobro do primeiro compartimento. No terceiro compartimento, após 14,4 horas, a redução média foi de 32,8%; no quarto compartimento, após 19,2 horas, a redução foi de 35,4%; no quinto compartimento, próximo de 24 horas, a redução foi de 47,9%; na saída do reator a redução foi de 50,5%, em média.

Na Figura 4, é apresentado o comportamento das reduções médias da DQO nos quatro TRH.

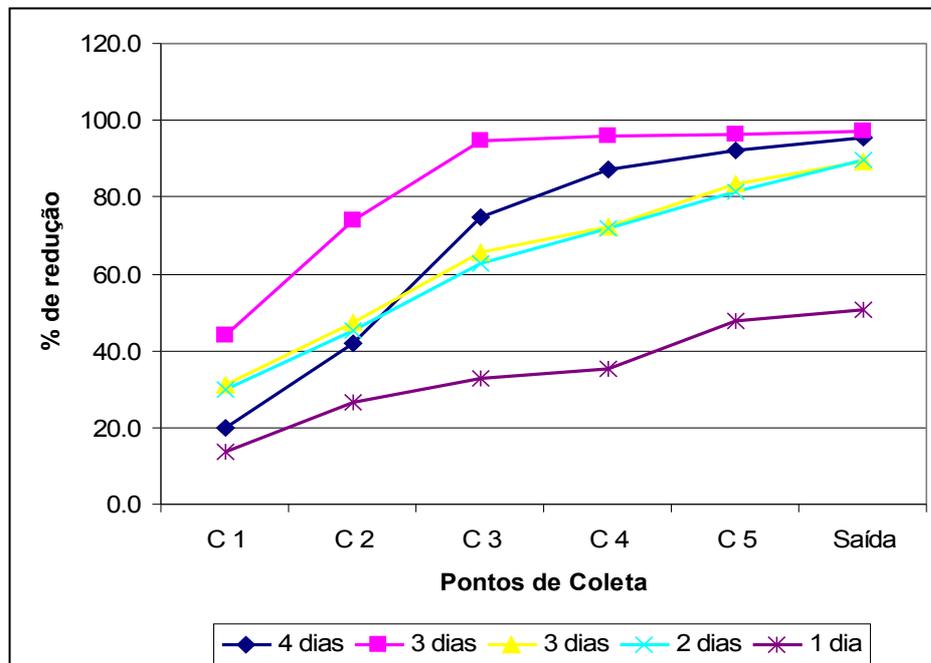


FIGURA 4. Comportamento médio da redução de DQO nos quatro TRH com DQO 2500 mg L⁻¹

Pode ser observado que com a diminuição do TRH ocorreu também a diminuição da redução da DQO.

Analisando os resultados estaticamente, foi possível observar que entre as reduções de DQO do TRH 4 dias e as duas partes do TRH 3 dias e o TRH 2 dias não houve diferença significativa ao nível de 5%, já a redução de DQO do TRH 4 dias é diferente significativamente da redução do TRH 1 dia. A primeira parte do TRH 3 dias apresentou diferença significativa em relação aos resultados obtidos da segunda parte do TRH 3 dias, do TRH 2 dias e do TRH 1 dia. A segunda parte do TRH 3 dias não apresentou diferença significativa em relação ao TRH 2 dias e apresentou diferença em relação ao TRH 1 dia. O TRH 2 dias apresentou diferença significativa em relação ao TRH 1 dia.

Nachaiyasit e Stuckey (1997b), utilizando um RAC no tratamento de água residuária sintética composta por carboidrato e proteína, também observaram que com a diminuição do TRH ocorreu diminuição na redução de DQO, principalmente quando o TRH foi bastante reduzido, como é o caso desta etapa da pesquisa: com alimentação de 4 g L^{-1} para um TRH de 20 horas a redução da DQO foi de 98%, com TRH de 10 horas a redução caiu para 90% e com TRH de 5 horas a redução de DQO foi de apenas 52%.

Grover, Maruwaha e Kennedy (1999), estudando o tratamento de água residuária de fábricas de papel com DQO de 4000 mg L^{-1} , observaram o contrário desta etapa da pesquisa, pois em seus estudos, verificaram que quase não houve diferença na redução da DQO em função da diminuição do TRH: com 5 dias a redução foi de 69,4%, 69,7 % com 4 dias, 69,2% com 3 dias e 67,6% com 2 dias.

Observando a Figura 4, pode-se verificar que de maneira geral, a maior parte da DQO foi reduzida no terceiro compartimento. Diferentemente deste resultado, Saritpongteeraka e Chaiprapat (2008), durante o estudo do tratamento de água residuária do processamento de borracha em um RAC de quatro compartimentos, observaram que a maior parte da DQO foi reduzida já no primeiro compartimento, enquanto os outros compartimentos reduziram pequenas quantidades de DQO. Isto demonstra que o desempenho de um RAC na redução da matéria orgânica pode variar com alguns fatores, como o tipo e a DQO do substrato utilizado, a quantidade de compartimentos do reator.

5.2.2. pH, acidez e alcalinidade

Os valores de pH são apresentados nas Tabelas 10, 11, 12 e 13.

TABELA 10. Valores de pH ao longo dos compartimentos com TRH 4 dias com DQO inicial 2500 mg L⁻¹

Entrada	C1	C2	pH C3	C4	C5	Saída
4,2	5,0	5,3	5,9	6,4	6,8	7,3
3,9	4,5	4,6	5,3	6,3	7,3	7,4
5,6	5,5	6,1	6,7	6,7	7,6	7,8
6,5	6,4	6,5	6,7	6,7	7,2	7,9
6,7	6,7	7,0	7,7	7,5	7,9	7,9
6,1	5,7	6,5	6,8	7,0	7,5	8,2
4,9	5,6	6,5	7,2	7,3	8,0	7,9
5,5	6,3	6,9	6,9	7,1	7,6	7,7
5,5	6,5	6,7	7,0	7,0	7,4	7,6

C1, C2, C2, C4 e C5 = número do compartimento

TABELA 11. Valores de pH ao longo dos compartimentos com TRH 3 dias com DQO inicial 2500 mg L⁻¹

pH

Entrada	C1	C2	C3	C4	C5	Saída
6,3	7,7	7,3	7,6	7,5	7,8	8,0
7,2	7,5	8,0	8,0	8,0	8,0	8,4
6,1	7,2	7,6	7,7	7,6	8,1	8,6
6,7	6,8	7,2	7,4	7,4	7,8	8,3
4,5	5,2	6,9	7,4	7,5	8,0	8,3
5,8	6,8	7,0	7,0	7,0	7,5	7,5
7,0	7,3	7,4	7,7	7,4	8,1	7,7
6,4	6,6	6,8	6,9	7,0	7,2	8,1
6,7	6,7	6,9	7,0	6,9	7,2	7,7

C1, C2, C2, C4 e C5 = número do compartimento

TABELA 12. Valores de pH ao longo dos compartimentos com TRH 2 dias com DQO inicial 2500 mg L⁻¹

Entrada	C1	C2	pH C3	C4	C5	Saída
5,9	6,6	6,9	7,2	7,3	7,9	7,8
6,7	7,8	8,4	8,5	8,4	8,6	8,6
6,2	6,5	6,7	7,0	7,2	7,6	8,1
6,8	6,1	6,4	6,7	6,8	7,3	7,6
5,9	6,3	6,6	6,9	7,1	7,4	7,6
6,3	6,7	6,9	6,9	6,9	7,1	7,8
5,9	6,3	6,5	6,9	6,7	7,4	8,3
7,6	6,2	6,8	7,0	6,9	7,6	7,9
7,5	4,8	5,1	6,2	6,5	7,0	7,8

C1, C2, C2, C4 e C5 = número do compartimento

TABELA 13. Valores de pH ao longo dos compartimentos com TRH 1 dia com DQO inicial 2500 mg L⁻¹

Entrada	C1	C2	pH C3	C4	C5	Saída
7,9	6,7	7,5	7,3	7,3	7,5	7,6
6,2	5,6	6,0	6,6	6,7	7,3	7,6
8,0	6,5	6,9	7,0	7,1	7,5	7,7
5,9	5,6	6,3	7,1	7,1	8,0	7,2
4,6	4,7	5,3	5,4	5,5	5,6	6,4
6,1	6,3	6,4	6,5	6,5	6,1	6,6
4,1	4,4	4,8	5,4	6,2	6,8	6,8
6,5	6,4	6,6	6,6	6,1	6,1	5,8

C1, C2, C2, C4 e C5 = número do compartimento

Para que não ocorresse a acidificação do reator, o pH da alimentação do reator (entrada) foi corrigido para um valor que ficasse próximo da neutralidade com a utilização de bicarbonato de sódio (NaHCO_3). Esta acidificação acontece devido à intensificação da produção de ácidos graxos voláteis. Se as bactérias acetogênicas e arqueas metanogênicas não forem capazes de metabolizar todo ácido excessivo, ele vai se acumulando nos compartimentos, ocasionando os baixos valores de pH, comprometendo a atividade dos microrganismos que não suportam pHs baixos.

Mesmo com a correção do pH inicial, foi notado que após algum tempo o pH da entrada caía. Tal feito ocorre porque o soro de queijo possui uma tendência de se acidificar rapidamente (SUTHERLAND, 1985 apud MALASPINA *et al.*, 1996). Então, começou-se a ser feito um monitoramento diário do pH para tentar mantê-lo em condições favoráveis ao reator.

Os valores de pH apresentaram certa estabilidade, o que demonstra que não ocorreram perturbações nas condições ambientais que pudessem causar o acúmulo de ácidos graxos voláteis, acarretando abaixamento nos valores de pH.

Pode ser observado que os valores de pH aumentaram ao longo dos compartimentos do reator, que mantiveram essa tendência mesmo quando o TRH foi diminuído.

Com os TRH 2 e 1 dia, ocorreu, em algumas análises, uma queda de pH da entrada para o primeiro compartimento, porém, nos outros compartimentos, ocorreu a recuperação deste valor. Essa queda pode ocorrer devido à presença de grande quantidade de ácidos orgânicos que são gerados pelo primeiro grupo de bactérias que realizam a digestão anaeróbia e que não podem ser degradados pelos microrganismos anaeróbios, o que acarreta acúmulo dos mesmos, promovendo, assim, a acidificação desta parte do reator (UYANIK; SALLIS; ANDERSON, 2002).

Nos trabalhos de Nachaiyasit & Stuckey (1997) e Uyanik *et al* (2002) também ocorreram quedas nos valores de pH ao longo dos compartimentos do RAC, devido ao acúmulo dos ácidos graxos. Mas, como também ocorreu nesta etapa do experimento, após certo tempo, o sistema se mostrou mais estável e o pH dos últimos compartimentos voltou a aumentar.

A Figura 5 apresenta uma comparação entre o comportamento médio dos valores de pH para os quatro TRH testados.

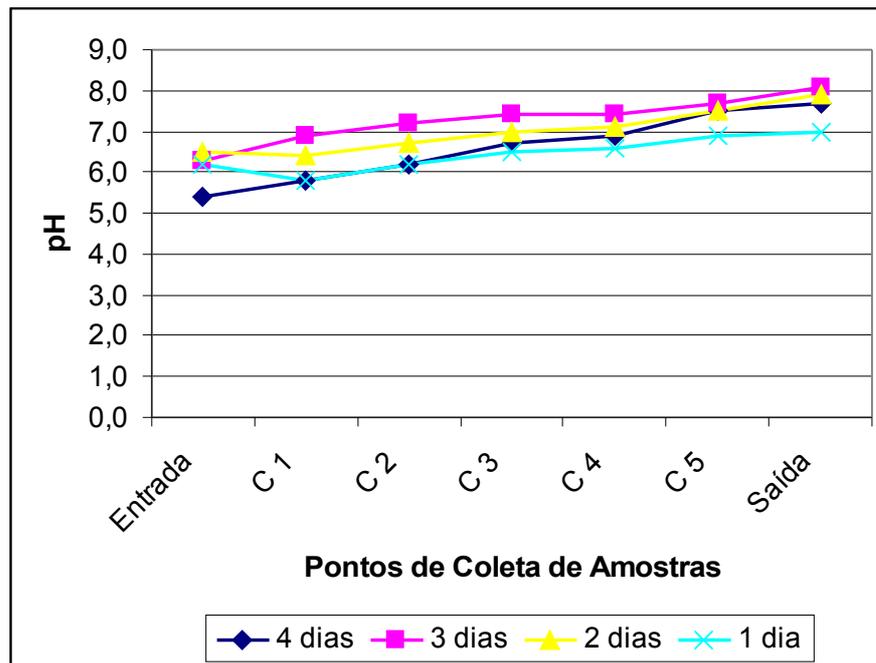


FIGURA 5. Comportamento médio do pH nos quatro TRH com DQO 2500 mg L⁻¹

Observa-se que o pH foi aumentando gradativamente através dos compartimentos do reator, mantendo esta tendência mesmo com a diminuição do TRH. Como foi citado anteriormente, com o TRH 1 dia, o pH diminuiu da entrada para o primeiro compartimento, mas depois ocorreu recuperação do mesmo.

Em relação à acidez, seus valores para cada TRH são apresentados nas Tabelas 14, 15, 16 e 17, e na Figura 6.

TABELA 14. Acidez ao longo dos compartimentos com TRH 4 dias com DQO inicial
2500 mg L⁻¹

Entrada	Acidez em termos de mg CaCO ₃ L ⁻¹					Saída
	C1	C2	C3	C4	C5	
435	350	250	270	245	240	225
1025	780	695	400	250	160	165
285	350	235	260	275	235	155
100	190	190	185	220	160	115
160	210	215	160	200	170	115
225	330	250	250	205	185	95
405	350	230	150	175	100	95
180	140	145	140	160	110	85
155	125	105	115	155	130	120

C1, C2, C2, C4 e C5 = número do compartimento

TABELA 15. Acidez ao longo dos compartimentos com TRH 3 dias com DQO inicial
2500 mg L⁻¹

Entrada	Acidez em termos de mg CaCO ₃ L ⁻¹					Saída
	C1	C2	C3	C4	C5	
130	180	155	180	150	145	90
65	105	115	110	105	125	40
205	160	135	165	155	140	45
75	155	150	165	125	115	75
700	395	140	180	150	175	100
280	165	145	155	120	125	75
180	130	105	85	100	85	45
80	125	110	95	105	85	75
120	160	140	135	155	120	100

C1, C2, C2, C4 e C5 = número do compartimento

TABELA 16. Acidez ao longo dos compartimentos com TRH 2 dias com DQO inicial
2500 mg L⁻¹

Entrada	Acidez em termos de mg CaCO ₃ L ⁻¹					Saída
	C1	C2	C3	C4	C5	
195	130	105	95	105	80	95
135	125	75	75	55	40	20
155	125	130	115	130	110	35

145	190	155	135	130	90	85
115	130	120	115	100	95	85
40	20	10	50	40	30	0
155	155	130	125	105	90	25
40	165	120	135	135	115	75
360	470	270	115	120	95	65

C1, C2, C2, C4 e C5 = número do compartimento

TABELA 17. Acidez ao longo dos compartimentos com TRH 1 dia com DQO inicial
2500 mg L⁻¹

Entrada	Acidez em termos de mg CaCO ₃ L ⁻¹					Saída
	C1	C2	C3	C4	C5	
65	160	130	130	145	85	60
130	335	200	175	170	120	70
60	210	155	130	140	90	70
220	540	335	200	160	100	90
710	465	255	200	215	155	70
210	240	210	165	195	150	75
225	425	405	220	160	130	100
190	250	190	160	210	125	125
65	160	130	130	145	85	60

C1, C2, C2, C4 e C5 = número do compartimento

De uma forma geral, a acidez diminuiu da entrada para a saída do reator. Porém, essa diminuição nem sempre ocorreu de forma constante através dos compartimentos. Em algumas análises, a acidez de um compartimento foi maior que a do compartimento anterior, o que seria justificado pelo pela geração de ácidos que ainda pode ter ocorrido nos respectivos compartimentos.

Da mesma forma que a acidez diminuiu ao longo dos compartimentos nesta etapa da pesquisa, Wang, Huang e Zhao (2004) e She e colaboradores (2006) verificaram que a concentração dos ácidos graxos voláteis diminuiu ao longo dos compartimentos de um RAC.

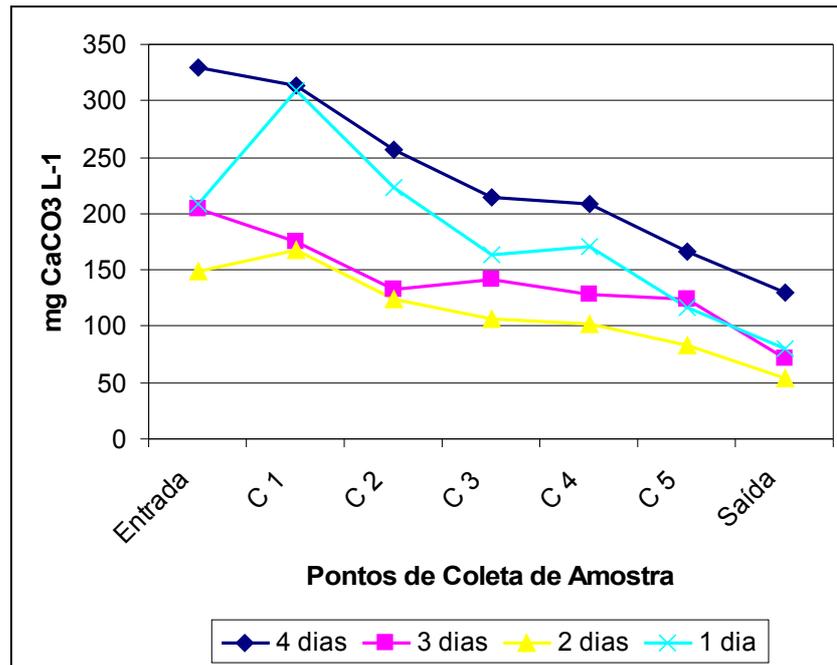


FIGURA 6. Comportamento médio da acidez nos quatro TRH com DQO 2500 mg L⁻¹

De acordo com a Figura 6, é possível observar que com o maior TRH, 4 dias, ocorreu a redução da acidez de forma mais gradativa, ou seja, a acidez foi diminuindo de compartimento para compartimento. Com o TRH 3 dias, a redução foi de forma gradativa até o segundo compartimento, no terceiro ocorreu um pequeno aumento da acidez, e, daí para a saída do reator a acidez foi diminuindo gradativamente. Com TRH 2 dias, ocorreu aumento da acidez do primeiro para o segundo compartimento, e que depois do segundo compartimento até a saída, a acidez foi diminuindo a cada compartimento. A redução da acidez oscilou muito com TRH 1 dia: a acidez apresentou um aumento considerável da entrada para o primeiro compartimento, depois caiu gradativamente até o terceiro compartimento, depois teve um aumento no quarto compartimento, caindo, a partir deste ponto até a saída do reator. Com TRH 4 dias, a acidez na saída do reator foi a maior encontrada, 130 mg CaCO₃ L⁻¹; para TRH 3 dias, a saída do reator apresentou acidez 72 mg CaCO₃ L⁻¹; para o TRH 2 dias o valor encontrado foi 54 mg CaCO₃ L⁻¹ e para o TRH 1 dia, a acidez foi 80 mg CaCO₃ L⁻¹.

Quanto à alcalinidade, seus resultados estão apresentados nas Tabelas 18, 19, 20 e 21, e na Figura 7.

TABELA 18. Alcalinidade ao longo dos compartimentos com TRH 4 dias com DQO inicial 2500 mg L⁻¹

Entrada	Alcalinidade em termos de mg CaCO ₃ L ⁻¹					Saída
	C1	C2	C3	C4	C5	
410	425	490	555	610	655	735
475	520	515	560	595	625	640
760	740	755	705	735	720	710
620	830	675	615	620	590	615
1015	1175	1115	990	900	830	675
760	915	980	1045	1060	1030	1025
520	725	760	745	745	770	870
540	610	665	700	735	795	845
602	725	690	685	725	685	690

C1, C2, C2, C4 e C5 = número do compartimento

TABELA 19. Alcalinidade ao longo dos compartimentos com TRH 3 dias com DQO inicial 2500 mg L⁻¹

Entrada	Alcalinidade em termos de mg CaCO ₃ L ⁻¹					Saída
	C1	C2	C3	C4	C5	
870	560	1090	1000	990	860	710
925	1210	1250	1225	1225	1155	1010
865	1075	1015	1090	1185	1200	1175
800	925	950	1025	1045	1085	1105
350	600	710	975	1005	1095	1085
950	1220	1120	930	875	905	900
1000	1580	1340	1160	1060	945	855
1335	1345	1130	1170	1250	1325	850
610	890	915	810	705	745	735

C1, C2, C2, C4 e C5 = número do compartimento

TABELA 20. Alcalinidade ao longo dos compartimentos com TRH 2 dias com DQO inicial 2500 mg L⁻¹

Entrada	Alcalinidade em termos de mg CaCO ₃ L ⁻¹					Saída
	C1	C2	C3	C4	C5	
870	1375	1565	1855	2020	1925	1280
710	910	880	875	1005	1060	1160
490	655	620	660	680	775	860
1040	1085	1045	1030	1045	1010	1100
570	1730	1885	1915	1925	1840	1490
1360	1930	1820	1595	1400	1305	1195
925	1145	1225	1305	1375	1520	1735
755	1020	1240	1260	1325	1345	1365
250	465	555	685	800	905	920

C1, C2, C2, C4 e C5 = número do compartimento

TABELA 21. Alcalinidade ao longo dos compartimentos com TRH 1 dia com DQO inicial 2500 mg L⁻¹

Entrada	Alcalinidade em termos de mg CaCO ₃ L ⁻¹					Saída
	C1	C2	C3	C4	C5	
500	795	1020	1075	1115	1040	1085
375	490	550	685	750	850	985
835	1005	1110	1100	1095	995	835
580	675	770	890	1010	1030	1070
350	585	695	730	715	755	700
1100	1270	1370	1390	1185	1025	890
185	260	375	495	585	625	775
1045	1115	1135	1065	835	670	525
500	795	1020	1075	1115	1040	1085

C1, C2, C2, C4 e C5 = número do compartimento

Os resultados da alcalinidade apresentaram comportamento semelhante aos da acidez. Ocorreu um aumento na alcalinidade da entrada para a saída do reator, porém, este aumento não aconteceu de forma gradativa através dos compartimentos, como a maioria dos autores relata. Ao contrário disso, She e colaboradores (2006) verificaram que os valores da alcalinidade aumentaram passo a passo nos compartimentos do reator.

A alcalinidade no processo anaeróbio também pode ser gerada pelas

transformações de substâncias nitrogenadas presentes no efluente ou ser produzida a partir dos ácidos graxos voláteis (CHERNICHARO, 1997).

De acordo com os resultados, nota-se que os valores da alcalinidade foram aumentando com a diminuição do TRH. Isso ocorre porque com a diminuição do TRH pode ter ocorrido um aumento dos ácidos graxos voláteis, já que segundo Hirata (1999) citado por Barana (2000) a alcalinidade de um sistema é a capacidade que ele possui de neutralizar ácidos. Quando a alcalinidade está elevada não significa que o pH está elevado, mas sim que o sistema possui uma elevada concentração de radicais alcalinos e, portanto, possui um elevado poder tamponante.

Com TRH de 4 dias, os valores da alcalinidade da saída do reator foram, em média, 600 mg L^{-1} , com os TRH de 3 e 2 dias, estes valores ficaram, em sua maioria, próximos de 1000 mg L^{-1} , e com TRH 1 dia os valores da alcalinidade na saída do reator caíram um pouco, ficando próximos a 850 mg L^{-1} . Valores maiores que este foram encontrados por Vossoughi, Shakeri e Alemzadeh (2003), que observaram que a alcalinidade na saída do reator variou de 1380 a 1950 mg L^{-1} .

Na Figura 7 é possível comparar o comportamento médio dos valores da alcalinidade para os quatro TRH.

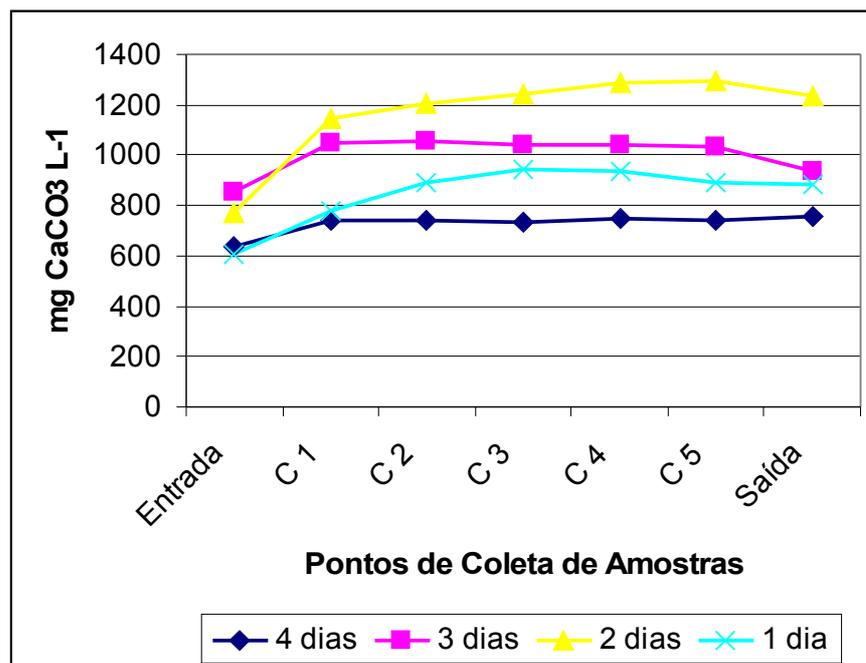


FIGURA 7. Comportamento médio da alcalinidade nos quatro TRH com DQO 2500 mg L^{-1}

Outro fator analisado para averiguar a estabilidade do reator é a relação acidez/alcalinidade. Segundo Silva (1977) citado por Barana (2000) se esta relação apresentar valores entre 0,1 e 0,3 o sistema está estável, ou seja, a acidogênese e metanogênese estão ocorrendo de forma harmônica. Se estes valores forem iguais ou maiores que 0,4, diz-se que o sistema está instável e valores acima de 0,8 tem-se que o sistema encontra-se sob colapso.

A Tabela 22 apresenta os valores médios da relação acidez/alcalinidade desta etapa do experimento.

TABELA 22. Médias da relação acidez/alcalinidade para os quatro TRH com DQO inicial 2500 mg L⁻¹

TRH	C 1	C 2	C 3	C 4	C 5	Saída
4 dias	0,5	0,4	0,3	0,3	0,2	0,2
3 dias	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
2 dias	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1

C1, C2, C3, C4 e C5 = número do compartimento

Analisando a relação acidez/alcalinidade, pode-se observar que resultados acima de 0,4 foram encontrados para os TRH 4 e 1 dia e nos dois primeiros compartimentos, mas depois o reator foi se estabilizando. Para os TRH 3 e 2 dias, a relação acidez/alcalinidade ficou sempre entre 0,1 e 0,3 em todos os compartimentos.

Durante o andamento da pesquisa, quando foi percebido que os valores não estavam dentro da faixa segura, aplicou-se a imediata correção do pH da alimentação do reator.

5.2.3. Turbidez, Sólidos Totais e Sólidos Voláteis

A Tabela 23 apresenta os valores de turbidez para os TRH 4, 3, 2 e 1 dia com uma alimentação que variou de DQO de 2000 a 3000 mg L⁻¹. A turbidez da água é causada por materiais suspensos e coloidais, tais como lodo, argila, minúsculos

materiais orgânicos e inorgânicos, plânctons e outros organismos microscópicos (APHA, 1995).

Devido a um problema com o espectrofotômetro, as análises começaram a ser feitas com atraso, e assim, para o TRH 4 dias foram realizadas apenas duas análises.

TABELA 23. Valores de turbidez ao longo dos compartimentos do RAC com DQO inicial 2500 mg L⁻¹

TRH (dias)	Entrada	C1	Turbidez (FTU*)			C5	Saída
			C2	C3	C4		
4	426	118	103	97	92	54	35
4	161	70	70	55	52	76	26
3	208	118	112	92	124	70	23
3	179	96	96	83	67	42	19
3	141	104	97	72	64	44	29
3	237	151	111	77	64	64	26
3	148	92	76	87	77	50	27
3	260	249	216	184	178	123	205
3	236	221	161	182	178	228	139
3	181	123	151	137	133	159	118
3	202	123	82	101	108	106	61
2	186	95	68	50	61	58	63
2	163	102	63	49	73	177	127
2	150	53	33	32	62	80	68
2	176	61	32	40	45	175	78
2	242	114	98	112	55	49	52
2	129	108	65	40	36	60	60
2	110	53	39	74	68	66	52
2	121	76	33	34	54	90	56
1	140	123	75	48	48	133	72
1	132	120	74	63	61	101	87
1	214	122	61	52	52	64	94
1	199	300	146	106	96	107	103
1	145	246	148	126	134	121	92

C1, C2, C2, C4 e C5 = número do compartimento

* FTU = *Formazin Turbidity Units*

De acordo com os resultados apresentados, foi possível observar que a turbidez variou muito na entrada do reator. Isso se deve à diferença na concentração

de sólidos dos diferentes lotes de soro.

Ocorreram oscilações nos valores da turbidez entre os compartimentos do reator, independente do TRH. Em algumas análises, a turbidez foi diminuindo gradativamente através dos compartimentos, mas na maioria delas este comportamento não foi observado. Mazzola, Roston e Valentim (2005) também observaram esta variação nos valores da turbidez quando estudaram o tratamento de esgoto doméstico em um RAC. De acordo com os valores de turbidez encontrados para cada TRH, tem-se que, de modo geral, o RAC utilizado, tratando soro de queijo com esta concentração, é eficiente na redução do material particulado, pois, os valores da turbidez do efluente (saída) são menores que os do afluente (entrada).

Como pode ser observado na Figura 8, com a diminuição do TRH foi possível observar que a porcentagem de redução de turbidez, da entrada para a saída do reator, também diminuiu. Em média, com TRH 4 dias a redução foi de 88%, com TRH 3 dias a redução foi de 66%, com TRH 2 dias a redução foi 55% e com TRH 1 dia a redução foi 45%.

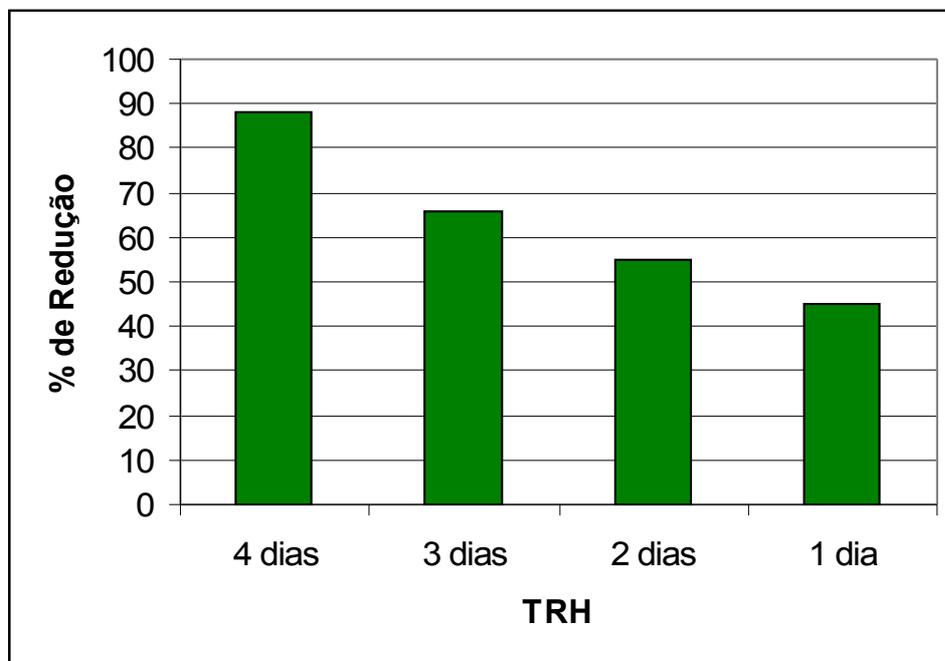


FIGURA 8. Redução média da turbidez na saída do reator, em relação à entrada com DQO 2500 mg L⁻¹

Na Tabela 24 são apresentados os valores de sólidos totais (ST) e sólidos voláteis (SV) da entrada e saída do reator, bem como a porcentagem de redução dos mesmos. Para a realização desta análise foi utilizada uma balança analítica, por isso, se justifica a utilização dos algarismos significativos.

TABELA 24. Sólidos Totais e Sólidos Voláteis da entrada e saída do reator e % de redução com DQO inicial 2500 mg L⁻¹

TRH (dias)	Sólidos Totais (g L ⁻¹)			Sólidos Voláteis (g L ⁻¹)		
	Entrada	Saída	% Redução	Entrada	Saída	% Redução
4	1,467	0,836	43,0	1,103	0,411	62,7
4	1,863	0,540	71,0	1,630	0,406	75,1
4	1,349	0,542	59,8	0,923	0,299	67,6
4	2,536	0,575	77,3	1,766	0,270	84,7
4	1,638	0,716	56,3	1,184	0,324	72,6
3	2,700	1,304	51,7	1,852	0,572	69,1
3	1,926	1,009	47,6	1,510	0,492	67,4
3	2,205	1,449	34,3	1,722	0,962	44,1
3	2,175	1,239	43,0	1,787	0,590	67,0
3	3,465	1,770	48,9	1,783	0,364	79,6
3	4,310	2,167	49,7	2,971	1,041	65,0
2	3,342	2,364	29,3	1,807	0,551	69,5
2	5,039	1,924	61,8	2,175	0,538	75,3
2	2,863	1,904	33,5	2,076	1,051	49,4
2	3,112	1,636	47,4	1,960	1,512	22,9
2	2,249	1,633	27,4	1,696	0,801	52,8
1	2,723	1,883	30,8	2,245	1,122	50,0
1	3,266	1,622	50,3	2,184	0,983	55,0
1	3,372	2,157	36,0	2,758	1,361	50,7

O TRH apresentou influência sobre a redução de sólidos totais (ST) e sólidos voláteis (SV), como pode ser visto na Figura 9.

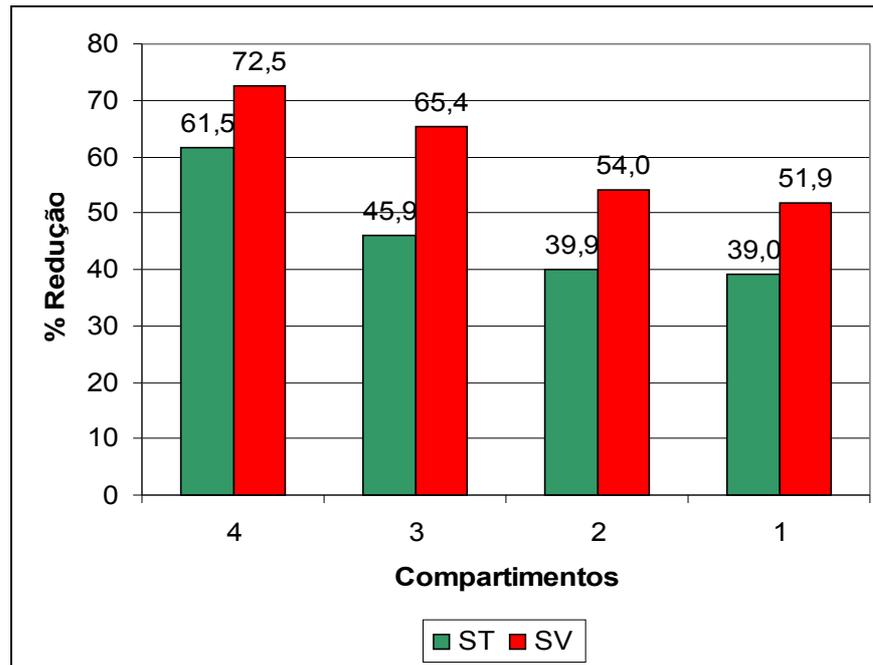


FIGURA 9. Redução média de ST e SV na saída do reator, nos diferentes TRH com DQO 2500 mg L⁻¹

Com a diminuição do TRH, ocorreu também uma diminuição na redução de sólidos, tanto voláteis quanto totais.

A redução de sólidos totais com TRH de 4 dias foi em média 61,5%, com TRH de 3 dias a redução caiu para 45,9%, em média, com TRH de 2 dias a redução foi em média de 39,9% e com TRH 1 dia a redução foi 39,0%.

A redução de sólidos voláteis com TRH de 4 dias foi de 72,5%, em média, com TRH de 3 dias a redução foi de 65,4%, com TRH de 2 dias a redução foi de 54,0% e com TRH 1 dia a redução foi 51,9%.

Da mesma forma, no tratamento de soro de queijo em um reator de dois estágios, Ghaly (1996) observou que com o aumento do TRH ocorreu uma diminuição na concentração de sólidos na saída do reator. Barana (2000) utilizando biodigestores de fases acidogênica e matanogênica verificou que a maior redução de sólidos totais e voláteis ocorreu com a menor carga orgânica diária.

5.3. Segunda etapa – DQO 5000 mg L⁻¹

Na segunda etapa da pesquisa, a DQO na entrada do reator foi aumentada para 5000 mg L⁻¹, aproximadamente, ou seja, o dobro da DQO da primeira etapa da pesquisa. Os tempos de residência hidráulicos (TRH) testados foram 3, 2 e 1 dia. O TRH 4 dias não foi testado, pois, na primeira etapa não houve diferença significativa entre este e o TRH 3 dias.

5.3.1. Desempenho na Redução de DQO

Com TRH 3 dias e DQO 5000 mg L⁻¹, a carga orgânica volumétrica do reator foi 1667 mg DQO L⁻¹ d⁻¹, aproximadamente. Os resultados de DQO obtidos ao longo dos compartimentos do reator, assim como a redução de DQO são apresentados na Tabela 25.

TABELA 25. Resultados de DQO (mg L⁻¹) e % de redução ao longo dos compartimentos com TRH 3 dias com DQO inicial 5000 mg L⁻¹

Entrada	C 1		C 2		C 3		C 4		C 5		Saída	
DQO	DQO	%	DQO	%								
5785	5265	9,0	4825	16,6	3575	38,2	2370	59,0	1395	75,9	1043	82,0
7650	4735	38,1	3970	48,1	2990	60,9	2450	68,0	1615	78,9	1120	85,4
5595	5075	9,3	3635	35,0	2740	51,0	2235	60,1	1475	73,6	1190	78,7
5050	4900	3,0	3455	31,6	2525	50,0	1950	61,4	1355	73,2	1085	78,5
6760	4225	37,5	3600	46,7	2605	61,5	2130	68,5	1550	77,1	1345	80,1
5630	5390	4,3	3930	30,2	2875	48,9	2210	60,7	1470	73,9	1158	79,4
Médias												
6078	4932	16,9	3902	34,7	2885	51,8	2224	63,0	1477	75,4	1157	80,7

C1, C2, C3, C4 e C5 = número do compartimento

A redução da DQO no primeiro compartimento, após 14 horas, variou um pouco, de 4,3% a 38,1%, ficando, em média, 16,9%. No segundo compartimento, após 29 horas, a redução da DQO foi, em média, 34,7%; no terceiro compartimento, após 43 horas, a redução da DQO foi de 51,8%, em média; depois de 58 horas, no quarto compartimento, a média de redução da DQO foi 63%; no quinto

compartimento, próximo ao TRH 72 horas, a redução da DQO foi de 75,4%, em média; e na saída do reator, a redução da DQO foi de 80,7%, em média. De acordo com a Tabela 25, foi possível observar, ainda, que apesar dos resultados das análises para redução da DQO variar para cada compartimento, no quarto compartimento, as análises apresentaram resultados bem próximos, e no terceiro compartimento, metade da DQO de entrada havia sido reduzida.

Ao comparar estes resultados com os resultados obtidos nas duas partes da primeira etapa com TRH 3 dias e DQO 2500 mg L⁻¹, é possível observar que com o aumento da carga orgânica e mesmo TRH, houve uma diminuição na redução da DQO em todos os compartimentos. Da mesma forma, Nachaiyasit e Stuckey (1997), utilizando um RAC no tratamento de uma água residuária sintética a base de carboidrato e proteína, observaram que com o aumento da carga orgânica houve uma diminuição na redução da DQO.

Depois, o reator foi submetido a uma diminuição do TRH, de 3 para 2 dias, o que resulta em uma carga orgânica volumétrica de 2500 mg DQO L⁻¹ d⁻¹, mesma carga orgânica volumétrica do TRH 1 dia da primeira etapa. Os resultados de DQO obtidos e suas porcentagens de redução em cada compartimento do reator são apresentados na Tabela 26.

TABELA 26. Resultados de DQO (mg L⁻¹) e % de redução ao longo dos compartimentos com TRH 2 dias com DQO inicial 5000 mg L⁻¹

Entrada DQO	C 1		C 2		C 3		C 4		C 5		Saída	
	DQO	%	DQO	%								
6460	4570	29,3	5110	20,9	3770	41,6	2820	56,3	2520	61,0	2360	63,5
4585	4260	7,1	4020	12,3	3445	24,9	1555	66,1	1095	76,1	720	84,3
4825	3870	19,8	3770	21,9	3590	25,6	3110	35,5	2505	48,1	1405	70,9
8455	5405	36,1	3865	54,3	3410	59,7	3085	63,5	2550	69,8	2300	72,8
5265	3430	34,9	3250	38,3	2935	44,3	2380	54,8	1920	63,5	1405	73,3
6310	3140	50,2	4280	32,2	3050	51,7	1935	69,3	1550	75,4	1395	77,9
6450	6360	1,4	5835	9,5	4770	26,0	3000	53,5	1990	69,1	1565	75,7
Médias												
6050	4434	25,4	4304	27,1	3567	39,1	2555	57,0	2019	66,1	1593	74,0

C1, C2, C3, C4 e C5 = número do compartimento

Foi possível observar que houve muita variação nos valores obtidos para cada compartimento entre as análises realizadas. No primeiro compartimento, a redução da DQO variou de 1,4% até 36,1%, sendo a média 25,4% depois de 9,6 horas. No segundo compartimento, apesar de apresentar muita variação entre as análises, após 19 horas, a média de redução da DQO foi 27,1%. No terceiro

compartimento, após 29 horas, a redução foi, em média, 39,1%; no quarto compartimento, após 38 horas, a redução da DQO foi 57,0%, em média; no quinto compartimento, a redução média foi de 66,1% e na saída do reator, a redução foi 74,0%, em média. Pode ser observado que somente no quarto compartimento é que ocorreu a redução de metade da DQO da entrada.

Em relação ao TRH 3 dias desta etapa, a redução da DQO na saída do reator foi menor (74,0% contra 80,7%), porém, devido às grandes variações na redução que ocorreram entre as diversas análises realizadas, a redução média no primeiro compartimento foi maior para o TRH 2 dias do que o TRH 3 dias; depois do segundo compartimento até a saída, as reduções médias do TRH 2 dias foram sempre menores que o TRH 3 dias.

Quando comparado com o TRH 2 dias da primeira etapa da pesquisa, com DQO de entrada 2500 mg L⁻¹, foi possível observar que a redução da DQO foi menor em todos os compartimentos. Na primeira etapa, no terceiro compartimento 62,7% da DQO já havia sido reduzida, nesta segunda etapa, no terceiro compartimento, a redução foi de apenas 39,1%, e somente no quinto compartimento que ocorreu 66,1% da DQO.

Comparando os resultados com o TRH 1 dia, que possui a mesma carga orgânica volumétrica (Tabela 47), observa-se que o reator apresentou melhor desempenho com TRH 2 dias devido a sua menor carga orgânica hidráulica (Tabela 47). Com TRH 1 dia, a carga orgânica hidráulica é 4,9 L L⁻¹ d⁻¹ e com TRH 2 dias 1,22 L L⁻¹ d⁻¹, segundo Chernicharo (1997) a carga orgânica hidráulica não pode ultrapassar 5,0 L L⁻¹ d⁻¹, pois pode ocorrer perda excessiva de biomassa do sistema.

Como 74,0% é uma boa redução, o reator foi submetido ao TRH de 1 dia, o que resulta em um carga orgânica diária de 5000 mg L⁻¹, ou seja, o dobro da carga com TRH 2 dias. Os resultados encontrados para este TRH são apresentados na Tabela 27.

TABELA 27. Resultados de DQO (mg L⁻¹) e % de redução ao longo dos compartimentos com TRH 1 dia com DQO inicial 5000 mg L⁻¹

Entrada DQO	C 1		C 2		C 3		C 4		C 5		Saída	
	DQO	%	DQO	%								
5100	5490	0,2	4810	5,7	4670	8,4	4450	12,7	4075	20,1	3080	39,6
5550	5190	6,5	4180	24,7	4170	24,9	4130	25,6	4030	27,4	3960	28,6
5230	5190	0,8	4885	6,6	4320	17,4	4270	18,4	3705	29,2	3635	30,5
6780	5690	16,1	5650	16,7	5465	19,4	5385	20,6	4665	31,2	4390	35,3
Médias	5390	5,9	4881	13,4	4656	17,5	4559	19,3	4119	27,0	3766	33,5

Com TRH 1 dia, a velocidade superficial do fluxo ($1,92 \times 10^{-2}$ m/h) é maior que a velocidade dos outros TRH, em consequência disso e devido à sua carga hidráulica volumétrica ($4,9 \text{ L L}^{-1} \text{ d}^{-1}$), como mostra a Tabela 46, ocorreu um grande arraste de lodo, o que ocasionou diversos entupimentos na saída do reator. Devido a isso, foi quase impossível coletar material para análise até que o problema tivesse sido solucionado, já que os mesmos não seriam confiáveis, sendo assim, poucos dados foram coletados para análise deste TRH.

Foi percebido que, apesar do reator ser mantido muito tempo neste TRH, a redução da DQO na saída não aumentou. Resolveu-se, então, partir para a terceira etapa da pesquisa, para que o reator não entrasse em falência. Quando o reator não apresenta boa redução da DQO é sinal de que está ocorrendo um acúmulo de ácidos graxos, o que, segundo Chernicharo (1997), torna inviável o desenvolvimento das bactérias metanogênicas.

Analisando a Tabela 27, é possível observar que no primeiro compartimento, após 4,8 horas, a redução média da DQO foi de apenas 5,9%; no segundo compartimento, após 9,6 horas, a redução foi 13,4%, em média. No terceiro compartimento, após 14,4 horas, a redução média foi 17,5%; no quarto compartimento, após 19,2 horas, a redução foi 19,3%, no quinto compartimento, próximo de 24 horas, a redução foi 27,0% e na saída do reator a redução foi 33,5%.

Comparando os resultados de redução de DQO obtidos durante a primeira e segunda etapa da pesquisa, o reator apresentou seu pior desempenho.

Na Figura 10, são apresentadas as médias do desempenho de redução da DQO de cada compartimento do reator nos três TRH testados para a DQO de entrada de 5000 mg L^{-1} .

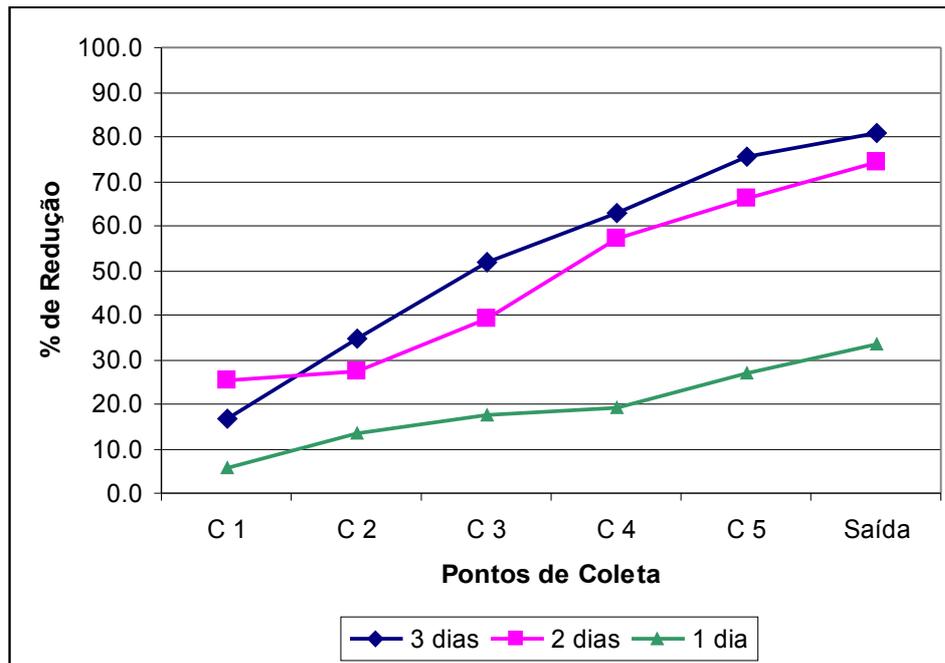


FIGURA 10. Comportamento médio da redução de DQO nos três TRH com DQO 5000 mg L⁻¹

O que pode ser observado na figura é que não houve muita diferença na redução da DQO entre os TRH 3 e 2 dias, e que os dois TRH apresentaram um comportamento muito semelhante, e, é possível observar a queda na redução da DQO quando o reator foi submetido ao TRH 1 dia.

Analisando estatisticamente os resultados obtidos para esta etapa com DQO 5000 mg L⁻¹, foi possível verificar que não houve diferença significativa entre o TRH 3 dias e o TRH 2 dias; e houve diferença significativa entre o TRH 3 dias e o TRH 1 dia, e entre o TRH 2 dias e o TRH 1 dia.

Saritpongteeraka e Chaiprapat (2008), utilizando um reator anaeróbio compartimentado no tratamento de água residuária com alto teor de sulfato, observaram que com TRH 5 dias e 2,5 dias o desempenho dos reatores foi praticamente o mesmo (75%, aproximadamente). Ao diminuir o TRH para 1,25 dias houve uma grande diminuição na redução da DQO (62%, aproximadamente).

Já Langenhoff, Intrachandra e Stuckey (2000) não observaram grandes mudanças na redução de DQO com uma grande diminuição do TRH. Estudando um RAC no tratamento de uma água residuária complexa composta por arroz, leite e ração animal com uma DQO de 500 mg L⁻¹, obtiveram uma redução de 95% da DQO

com TRH de 80 horas, e com TRH para 6 horas, a redução se manteve entre 80 – 90%.

5.3.2. pH, Acidez e Alcalinidade

Os valores de pH para esta etapa da pesquisa são apresentados nas Tabelas 28, 29 e 30.

TABELA 28. Valores de pH ao longo dos compartimentos com TRH 3 dias com DQO inicial 5000 mg L⁻¹

Entrada	C1	C2	pH C3	C4	C5	Saída
4,5	6,4	6,5	7,2	7,7	7,3	7,8
5,8	6,1	6,3	6,8	7,0	7,9	7,7
6,2	6,6	6,8	7,3	7,5	7,9	8,1
6,8	6,2	6,2	6,8	7,0	7,6	8,0
5,7	6,4	6,4	6,9	7,3	7,9	8,3
5,7	6,3	6,4	7,1	7,7	8,0	8,2

C1, C2, C3, C4 e C5 = número do compartimento

TABELA 29. Valores de pH ao longo dos compartimentos com TRH 2 dias com DQO inicial 5000 mg L⁻¹

Entrada	C1	C2	pH C3	C4	C5	Saída
6,6	6,7	6,2	6,3	7,2	7,5	7,7
5,8	6,7	6,6	6,7	6,7	7,2	7,7
5,8	6,5	6,8	6,9	7,0	7,4	7,7
5,1	7,1	7,1	6,9	6,7	7,8	7,9

4,1	5,4	5,6	6,2	6,6	7,4	7,6
4,1	5,4	6,8	7,0	7,4	7,7	7,9
6,6	6,7	6,2	6,3	7,2	7,5	7,7

C1, C2, C3, C4 e C5 = número do compartimento

TABELA 30. Valores de pH ao longo dos compartimentos com TRH 1 dia com DQO inicial 5000 mg L⁻¹

Entrada	C1	C2	pH C3	C4	C5	Saída
4,3	5,2	5,4	5,5	5,6	6,0	6,6
6,5	5,6	6,0	6,8	7,3	7,6	7,9
6,7	7,3	8,0	7,4	7,0	6,9	7,0
7,1	5,8	5,7	5,8	5,9	6,3	7,1

C1, C2, C3, C4 e C5 = número do compartimento

De acordo com a Tabela 28, foi possível observar que para o TRH 3 dias, o pH, de forma geral, foi aumentando ao longo dos compartimentos. Observou-se que em algumas análises ocorreram ligeiras quedas de um compartimento para outro, mas nada que comprometesse o desempenho do reator. O mesmo comportamento ocorreu para o TRH 2 dias, Tabela 29, onde foi possível observar que para esses dois TRH o pH da saída, em todas as análises, foi maior que o da entrada, e que todos os valores foram maiores que 7,0, característica deste tipo de reator. Leite e colaboradores (2004) também encontraram valores de pH próximos a 8,0 quando estudaram o tratamento de resíduos sólidos vegetais e lodo de esgoto sanitário diluídos em um RAC. Pode ser observado, também, que para o TRH 3 dias, a maioria das análises apresentou pH superior a 8,0 e com TRH 2 dias os valores de pH foram maiores que 7,0, mas não chegaram a 8,0. Isto ocorre, porque, com o TRH menor, a velocidade do fluxo é mais alta e, conseqüentemente, diminui o contato microrganismos-substrato.

Com o TRH 1 dia, Tabela 30, foi possível observar que o aumento do pH não ocorreu de forma gradativa através dos compartimentos. Na saída do reator, as análises apresentaram valores maiores que os da entrada. Porém em uma das análises, o pH não chegou a 7,0, em uma outra quase chegou a 8,0 e nas outras duas o pH ficou próximo da neutralidade. Isso ocorreu, pois, segundo Souza (1982) citado por Ramires (2005), o reator não suportou a quantidade de matéria orgânica a

que estava sendo exposto, ocorrendo um acúmulo de ácidos graxos e uma diminuição na atividade das bactérias metanogênicas. Estes valores de pH justificam a pouca redução da DQO que foi apresentada no item anterior.

Na Figura 11 é apresentado o comportamento médio do pH ao longo dos compartimentos do reator para os três TRH.

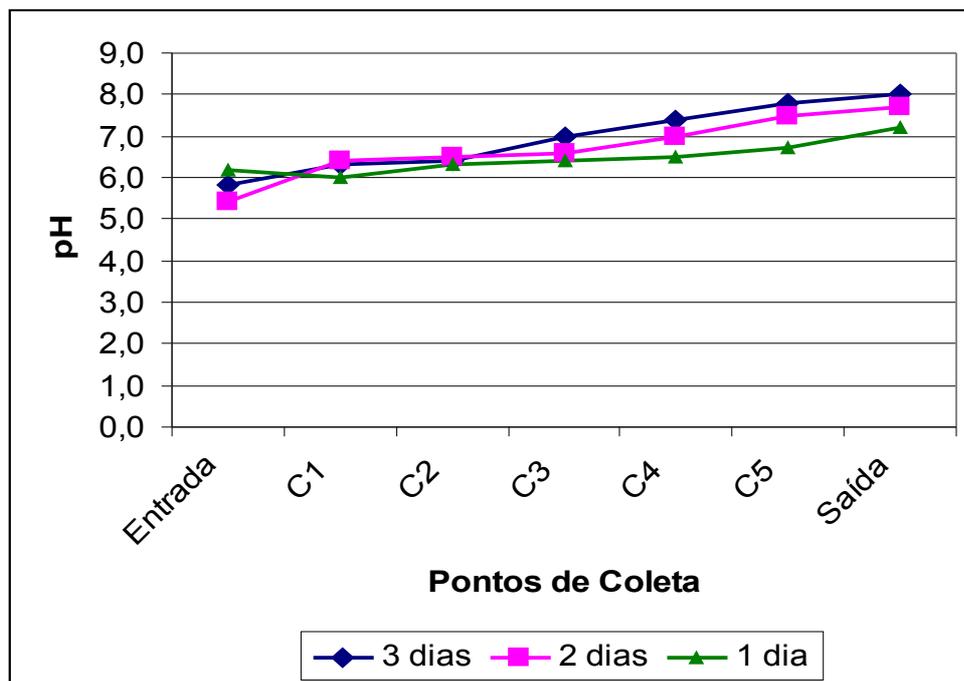


FIGURA 11. Comportamento médio do pH nos três TRH com DQO 5000 mg L⁻¹

Através da Figura 11, pode ser observado que o aumento do pH através dos compartimentos ocorreu nos três TRH e, que para os TRH 3 e 2 dias, o comportamento foi muito semelhante, apesar do pH da saída do reator com TRH 3 dias ter apresentado valor maior. Com TRH 1 dia, ocorreu uma diminuição do pH da entrada para o primeiro compartimento, o que pode ser considerado normal, já que nos primeiros compartimentos as bactérias acidogênicas são maioria, e depois ocorreu aumento normal do pH ao longo dos outros compartimentos. Porém, este aumento foi inferior em comparação aos outros compartimentos e o pH da saída foi menor que o pH da saída dos outros TRH, como já foi explicado anteriormente.

Os resultados obtidos para a acidez são apresentados nas Tabelas 31, 32 e 33.

TABELA 31. Acidez ao longo dos compartimentos com TRH 3 dias com DQO inicial
5000 mg L⁻¹

Entrada	Acidez em termos de mg CaCO ₃ L ⁻¹					Saída
	C1	C2	C3	C4	C5	
785	455	305	235	190	145	105
425	310	260	200	190	110	110
140	170	180	70	50	10	10
300	400	410	390	270	220	190
680	400	370	240	200	170	100
780	350	320	170	190	120	140

C1, C2, C3, C4 e C5 = número do compartimento

TABELA 32. Acidez ao longo dos compartimentos com TRH 2 dias com DQO inicial
5000 mg L⁻¹

Entrada	Acidez em termos de mg CaCO ₃ L ⁻¹					Saída
	C1	C2	C3	C4	C5	
400	440	580	420	380	230	200
400	190	200	180	180	110	40
460	210	200	150	60	40	40
350	70	60	100	90	30	50
1850	680	570	290	150	70	60
1480	510	90	80	60	50	20

C1, C2, C3, C4 e C5 = número do compartimento

TABELA 33. Acidez ao longo dos compartimentos com TRH 1 dia com DQO inicial
5000 mg L⁻¹

Entrada	Acidez em termos de mg CaCO ₃ L ⁻¹					Saída
	C1	C2	C3	C4	C5	
1150	910	820	670	570	330	90
320	630	540	310	210	190	70

190	60	10	70	100	150	160
90	400	400	390	320	170	90

C1, C2, C3, C4 e C5 = número do compartimento

De acordo com as Tabelas 31, 32 e 33, é possível observar que a acidez diminuiu da entrada para a saída do reator. Porém, como ocorreu na primeira etapa da pesquisa, esta redução não ocorreu de forma gradativa ao longo dos compartimentos. Observa-se que, para os três TRH, a acidez da saída foi sempre menor que a da entrada.

A Figura 12 apresenta um gráfico com o comportamento médio da acidez ao longo dos compartimentos para os três TRH.

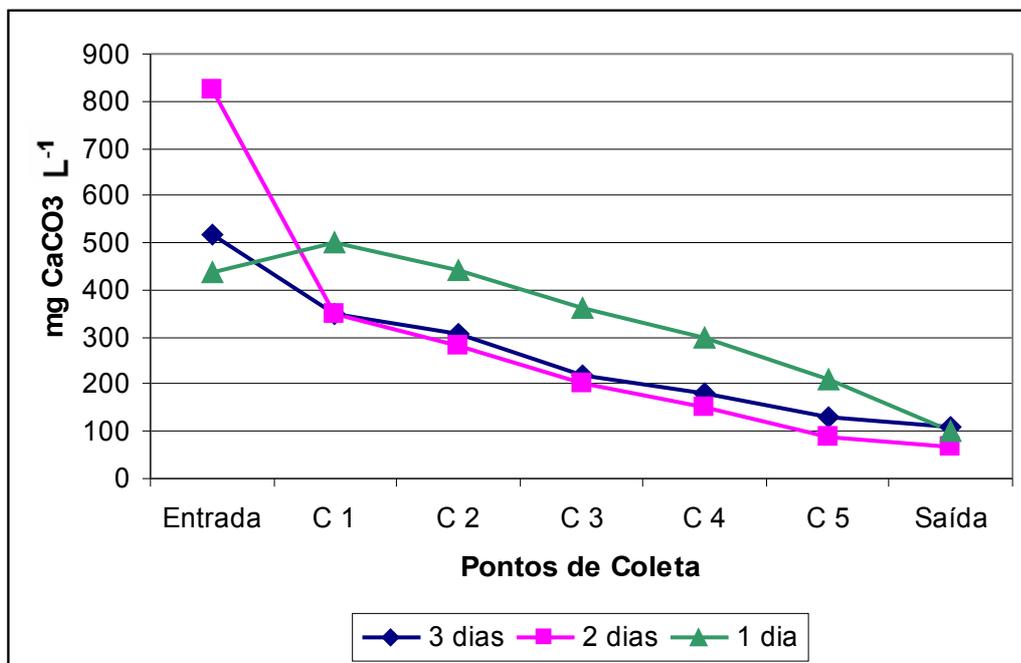


FIGURA 12. Comportamento médio da acidez nos três TRH com DQO 5000 mg L⁻¹

Na Figura 12, pode ser observado que a acidez, em média, diminuiu ao longo dos compartimentos. Os TRH 3 e 2 dias apresentaram praticamente o mesmo comportamento, apesar da acidez da entrada do reator com o TRH 2 dias ter ficado bem acima da entrada com TRH 3 dias. Do primeiro compartimento até o quarto, os valores ficaram bem próximos, e do quinto compartimento à saída do reator, com TRH 2 dias, a acidez ficou menor. A acidez média na saída do reator para o TRH 3 dias foi 109 mg CaCO₃ L⁻¹. Para o TRH 2 dias, a saída do reator apresentou 68 mg

$\text{CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$ de acidez. Para o TRH 1 dia, observou-se um acréscimo na acidez da entrada para o primeiro compartimento, mesmo comportamento observado para a análise de pH. Isto ocorre pela formação de ácidos graxos que acontecem nos primeiros compartimentos do RAC devido à presença das bactérias acidogênicas (FORESTI *et al.*, 1999). Depois do primeiro compartimento, a acidez foi diminuindo, porém, com valores maiores que os dos TRH 3 e 2 dias até o quinto compartimento. Na saída do reator, o valor da acidez foi praticamente o mesmo que os dos outros TRH ($103 \text{ mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$). Pode-se observar que, apesar do aumento da carga orgânica e diminuição do TRH, e independente da acidez da entrada do reator, os valores de acidez na saída para esta e a primeira etapa não variaram muito, ficando entre 103 e $54 \text{ mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$, com exceção do TRH 4 dias da primeira etapa que apresentou valor $130 \text{ mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$.

Nas Tabelas 34, 35 e 36 são apresentados os valores obtidos para a alcalinidade nos três TRH.

TABELA 34. Alcalinidade ao longo dos compartimentos com TRH 3 dias com DQO inicial 5000 mg L^{-1}

Alcalinidade em termos de $\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$						
Entrada	C1	C2	C3	C4	C5	Saída
995	1835	1915	2100	2140	2205	2180
1475	2105	2150	2220	2215	2430	2345
1660	2140	2200	2300	2440	2440	2240
1090	1570	1760	1910	2070	2190	2350
1420	1830	1730	1790	1870	1970	2150
1880	2170	2200	2190	2180	2200	2170

C1, C2, C3, C4 e C5 = número do compartimento

TABELA 35. Alcalinidade ao longo dos compartimentos com TRH 2 dias com DQO inicial 5000 mg L^{-1}

Alcalinidade em termos de $\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$						
Entrada	C1	C2	C3	C4	C5	Saída
2260	1250	1640	1470	1620	1970	2100
1040	1850	1920	2040	1870	1730	1640
1130	1850	1900	1940	1960	1910	1750
780	2470	2440	2080	2080	1930	1540
1070	1880	2060	2090	2140	2190	2220

680	1750	1910	2060	2060	2100	2090
C1, C2, C3, C4 e C5 = número do compartimento						

TABELA 36. Alcalinidade ao longo dos compartimentos com TRH 1 dia com DQO inicial 5000 mg L⁻¹

Entrada	Alcalinidade em termos de mg CaCO ₃ L ⁻¹					Saída
	C1	C2	C3	C4	C5	
420	1200	1290	1460	1650	1630	1680
1010	1200	1790	2470	3220	3660	3700
3900	4500	4700	3200	2800	2300	2000
1250	1990	2100	2140	2090	2160	2230

C1, C2, C3, C4 e C5 = número do compartimento

Observando as Tabelas 34, 35 e 36, é possível observar que a alcalinidade aumentou da entrada para a saída do reator. Porém, como ocorreu com a alcalinidade da primeira etapa da pesquisa, o aumento não ocorreu de forma gradativa através dos compartimentos. De um compartimento para o outro, em algumas análises, a alcalinidade chegou a diminuir um pouco. Como citado anteriormente, isso ocorre devido o acúmulo dos ácidos graxos nos compartimentos.

Os valores da alcalinidade na saída do reator para os TRH 3, 2 e 1 dia, foram, respectivamente, 2250, 1900 e 2400 mg L⁻¹. Em relação à primeira etapa, os valores da alcalinidade obtidos foram maiores. Como já foi citado anteriormente, a alcalinidade de um sistema é a capacidade que ele possui de neutralizar ácidos.

Na Figura 13, é apresentado o comportamento médio da alcalinidade para os três TRH desta etapa.

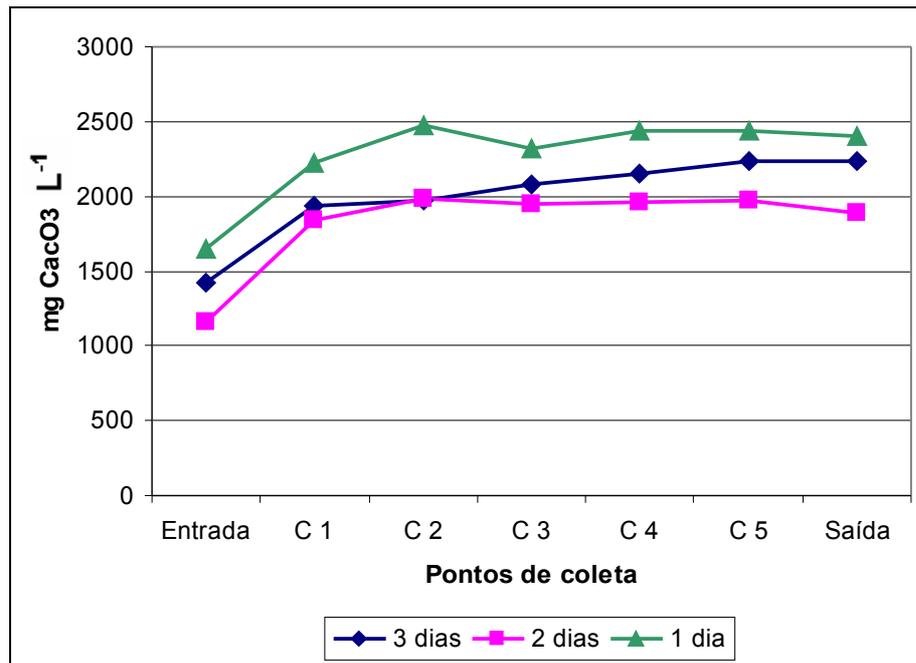


Figura 13. Comportamento médio da alcalinidade nos três TRH com DQO 5000 mg L⁻¹

De acordo com a Figura 13, é possível observar que a alcalinidade para os três TRH aumentou muito da entrada para o primeiro compartimento. Com o TRH 3 dias, ocorreu aumento gradativo discreto ao longo dos outros compartimentos; já com o TRH 2 dias, ocorreu variação da alcalinidade nos outros compartimentos, sendo que do primeiro para o segundo compartimento ocorreu aumento, do segundo para o terceiro ocorreu uma leve diminuição, e depois, até o quinto compartimento a alcalinidade se manteve até a saída do reator, onde ocorreu uma pequena diminuição. Com o TRH 1 dia, também ocorreu um aumento do primeiro para o segundo compartimento, sendo que do segundo para o terceiro compartimento ocorreu uma pequena queda, do terceiro para o quarto compartimento ocorreu um leve aumento, do terceiro compartimento até a saída do reator, a alcalinidade se manteve.

A relação acidez/alcalinidade também foi analisada nesta etapa. Os resultados são apresentados na Tabela 37.

TABELA 37. Médias da relação acidez/alcalinidade para os três TRH com DQO inicial 5000 mg L⁻¹

TRH	C 1	C 2	C 3	C 4	C 5	Saída
3 dias	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1
2 dias	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1
1 dia	0,4	0,3	0,2	0,1	0,1	0,1

C1, C2, C3, C4 e C5 = número do compartimento

Pode ser observado que os resultados da relação acidez/alcalinidade ficaram entre 0,3 e 0,1, e que apenas no primeiro compartimento para o TRH 1 dia, o resultado foi 0,4, o que segundo Barana (2000) demonstra uma certa instabilidade, mas nos outros compartimentos, a relação ficou normal, entre 0,3 e 0,1.

5.3.3. Turbidez, Sólidos Totais e Sólidos Voláteis

Os resultados obtidos para a turbidez são apresentados na Tabela 38.

TABELA 38. Valores de turbidez ao longo dos compartimentos do RAC com DQO

inicial 5000 mg L⁻¹

TRH (dias)	Entrada	C1	Turbidez (FTU*)			C5	Saída
			C2	C3	C4		
3	459	445	431	322	246	181	156
3	572	292	253	261	267	267	154
3	330	301	130	98	87	106	111
3	356	196	138	100	88	101	183
3	423	435	311	80	72	72	100
3	322	367	174	91	67	67	107
2	219	420	418	184	153	134	212
2	334	450	363	321	261	230	216
2	450	449	403	373	408	283	280
2	273	234	193	188	169	151	309
2	460	382	187	149	138	160	139
2	319	149	173	196	202	218	373
2	249	260	187	162	150	235	179
2	245	374	233	196	171	181	141
1	437	384	240	228	234	280	415
1	307	252	210	212	250	224	296
1	454	368	347	306	295	262	228
1	311	379	360	351	334	299	263
1	451	267	182	137	122	119	255

C1, C2, C3, C4 e C5 = número do compartimento

* FTU = *Formazin Turbidity Units*

Como aconteceu na primeira etapa da pesquisa, os valores de turbidez variaram muito ao longo do reator para os três TRH testados, e a turbidez, em média, diminuiu da entrada para a saída do reator, oscilando ao longo dos compartimentos.

Na Figura 14, são demonstradas as reduções da turbidez da entrada para a saída do reator.

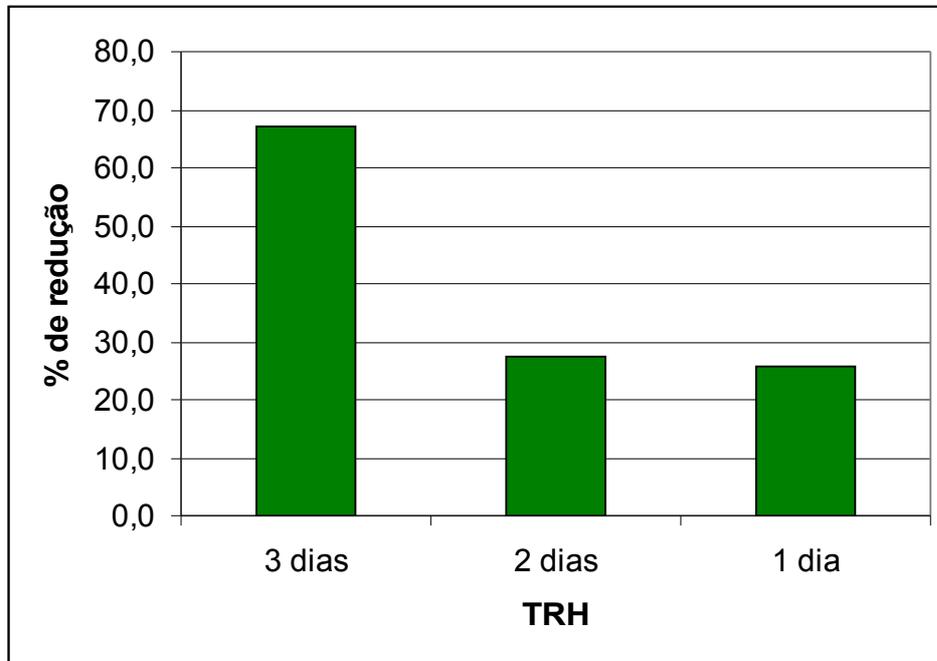


FIGURA 14. Redução média da turbidez na saída do reator, em relação à entrada com DQO 5000 mg L⁻¹

Foi possível observar que, com o TRH 3 dias, ocorreu a maior redução da turbidez, aproximadamente 67%; com o TRH 2 dias e 1 dia, a redução da turbidez, foi bem próxima, 27% e 25%, respectivamente. Assim como ocorreu na primeira etapa da pesquisa, ocorreu maior redução da turbidez com o TRH maior.

Ao comparar os resultados desta segunda etapa com os da primeira, é possível observar que para o TRH 3 dias não houve diferença (67 e 66%), mas houve diferença entre os valores da turbidez para o TRH 2 dias (55 e 27%) e TRH 1 dia (45 e 25%). Isso pode ter ocorrido, devido ao fato de que, com o aumento da carga orgânica há um aumento na quantidade de sólidos, o que provavelmente diminuiu a capacidade do reator em reduzir a turbidez.

Na Tabela 39 são apresentados os valores para os sólidos totais e sólidos voláteis, bem como a porcentagem de redução dos mesmos.

TABELA 39. Sólidos Totais e Sólidos Voláteis da entrada e saída do reator e % de redução com DQO inicial 5000 mg L⁻¹

TRH (dias)	Sólidos Totais (g L ⁻¹)			Sólidos Voláteis (g L ⁻¹)		
	Entrada	Saída	% Redução	Entrada	Saída	% Redução
3	6,09	2,69	55,8	4,56	1,29	71,8
3	5,70	3,94	30,8	4,58	2,02	55,8
3	7,51	4,10	45,4	6,10	2,23	63,5
3	6,59	3,79	42,4	4,52	1,79	60,4
3	6,09	2,69	43,6	4,56	1,29	62,9
2	6,73	3,82	43,2	5,36	2,59	51,7
2	5,55	3,97	28,4	4,37	2,40	45,0
2	4,68	2,76	41,1	3,30	1,54	53,4
2	6,42	4,43	30,9	4,87	2,89	40,7
2	5,19	3,12	39,8	3,64	1,70	53,3
1	5,09	3,82	24,9	4,18	2,70	35,4
1	6,38	4,79	24,8	5,35	3,31	38,1

Nesta segunda etapa da pesquisa, ocorreu aumento da DQO da entrada, de 2500 para 5000 mg L⁻¹, e, com isso, um aumento na quantidade de sólido. É possível observar que, na primeira etapa, a média de sólidos totais na entrada do reator era 2,72 g L⁻¹, e que agora, a média é 5,49 g L⁻¹.

As reduções dos sólidos totais e sólidos voláteis variaram com a diminuição do tempo de residência hidráulico, como pode ser visto na Figura 15.

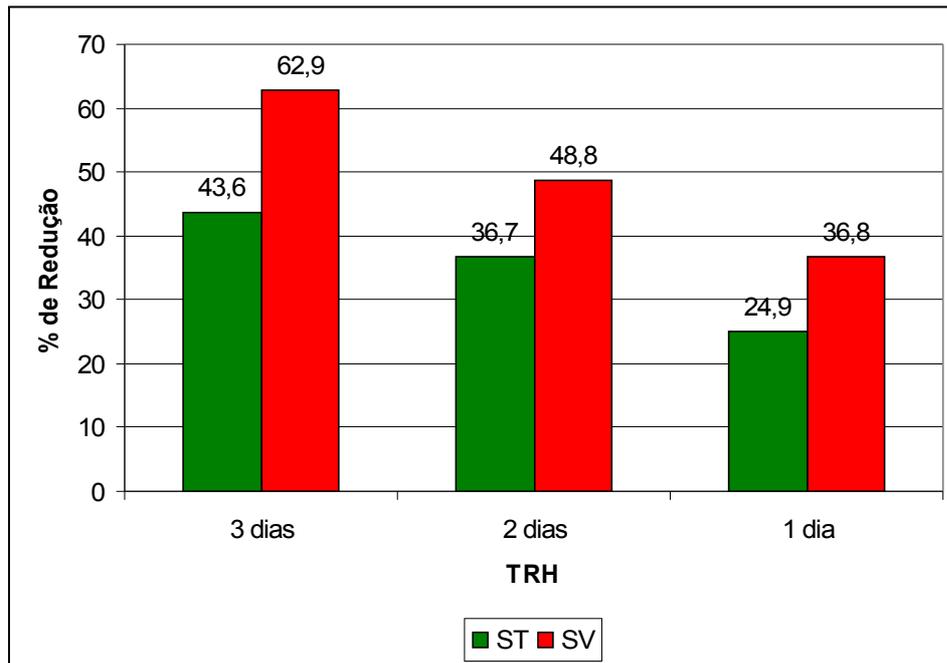


FIGURA 15. Redução média de ST e SV na saída do reator nos diferentes TRH com DQO 5000 mg L⁻¹

Como na primeira etapa da pesquisa, com a diminuição do TRH, houve diminuição na redução de sólidos totais e voláteis.

A redução de sólidos totais com TRH 3 dias foi em média 43,6%, com TRH 2 dias a redução caiu para 36,7%, em média, e com TRH 1 dia a redução foi em média de 24,9%. A redução de sólidos voláteis com TRH 3 dias foi de 62,9%, com TRH de 2 dias de 48,8% e com TRH 1 dia de 36,8%. Fernandes e Oliveira (2006) também observaram que com a diminuição do TRH ocorre uma diminuição na redução dos sólidos.

Com esses resultados, também pode ser observado que não só o TRH, mas também a concentração orgânica influencia a redução dos sólidos, devido ao aumento da quantidade de sólidos, já citado anteriormente. Ao comparar os resultados desta etapa com a etapa anterior, foi possível observar uma diminuição nos valores de redução dos sólidos.

Em relação aos sólidos totais, com TRH 3 dias a redução caiu 2,3% da primeira para a segunda etapa; com TRH 2 dias, 3,2%; com TRH 1 dia 14,1%.

Em relação aos sólidos voláteis, com TRH 3 dias a redução caiu 2,5%; com TRH 2 dias, 5,2%; e com TRH 1 dia, 15,1%.

5.4. Terceira etapa – DQO 10000 mg L⁻¹

Na terceira etapa do experimento, a DQO da entrada do reator foi aumentada para, aproximadamente, 10000 mg L⁻¹. O primeiro TRH a ser testado foi 3 dias, e outros TRH seriam testados dependendo do comportamento do reator.

5.4.1. Desempenho na Redução de DQO

Os resultados de DQO obtidos para a entrada, compartimentos e saída do reator, bem como a porcentagem de redução são apresentados na Tabela 40.

TABELA 40. Resultados de DQO (mg L⁻¹) e % de redução ao longo dos compartimentos com TRH 3 dias com DQO inicial 10000 mg L⁻¹

Entrada DQO	C 1		C 2		C 3		C 4		C 5		Saída	
	DQO	%	DQO	%	DQO	%	DQO	%	DQO	%	DQO	%
11220	10780	3,9	10750	4,2	10540	6,1	9290	17,2	7250	35,4	4820	57,0
12510	12160	2,8	11050	11,7	9820	21,5	9780	21,8	8300	33,7	7920	36,7
9080	7600	16,3	7380	18,7	6890	24,1	6340	30,2	5270	42,0	4070	55,2
11060	10530	4,8	9820	11,2	7350	33,5	5400	51,2	5340	51,7	5300	52,1
11160	10960	1,8	10440	6,5	9070	18,7	7040	36,9	6570	41,1	5120	54,1
11530	10780	6,5	10300	10,7	9360	18,8	8980	22,1	7200	37,6	7030	39,0
11220	9580	14,6	9360	16,6	8980	20,0	8650	22,9	7720	31,2	7160	36,2
11220	10780	3,9	10750	4,2	10540	6,1	9290	17,2	7250	35,4	4820	57,0
12510	12160	2,8	11050	11,7	9820	21,5	9780	21,8	8300	33,7	7920	36,7
Médias												
11279	10592	6,4	10100	10,6	9152	18,9	8283	26,8	7022	38,0	6017	47,1

C1, C2, C3, C4 e C5 = número do compartimento

Com o aumento da DQO para 11.000 mg L⁻¹, o reator foi submetido a uma carga orgânica diária de 3333 mg L⁻¹ d⁻¹. No primeiro compartimento, a média de redução da DQO foi 6,4%; no segundo compartimento, a redução da DQO foi 10,6%, em média, no terceiro compartimento a média de redução da DQO foi 18,9%, em média; no quarto compartimento, a redução foi 26,8%; no quinto compartimento, a redução da DQO foi 38,0% e na saída do reator, a redução média da DQO foi apenas 47,1%.

Foi o pior desempenho do reator comparado ao mesmo TRH 3 dias das outras duas etapas. Devido ao baixo desempenho do reator, resolveu-se encerrar a pesquisa. Este resultado só não foi pior que o desempenho apresentado quando o reator foi submetido ao TRH 1 dia e DQO 5000 mg L⁻¹.

Na Figura 16, é apresentado o comportamento médio da redução da DQO ao longo dos compartimentos.

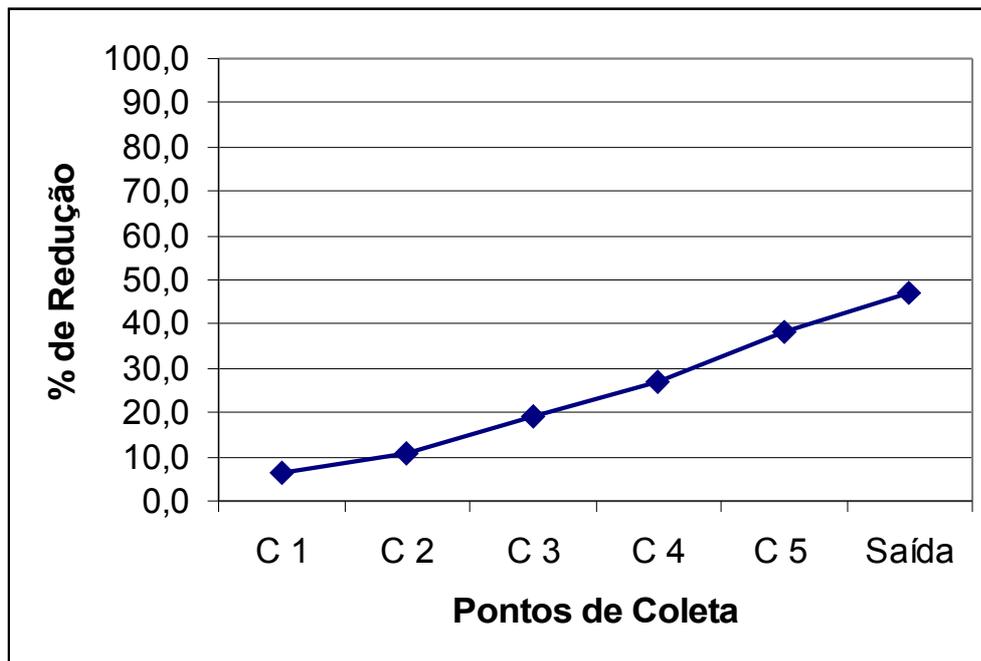


FIGURA 16. Comportamento médio da redução de DQO no TRH 3 dias com DQO 10000 mgL⁻¹

5.5.2. ph, acidez e alcalinidade

Os valores de pH são apresentados na Tabela 41.

TABELA 41. Valores de pH ao longo dos compartimentos com TRH 3 dias com DQO inicial 10000 mg L⁻¹

pH

Entrada	C1	C2	C3	C4	C5	Saída
4,6	4,6	5,6	6,4	7,3	7,8	6,6
6,8	6,1	5,9	6,7	7,3	7,8	8,4
6,6	6,2	5,6	6,1	6,6	7,1	7,4
6,8	7,3	7,4	7,7	7,8	7,8	7,8
4,5	5,5	6,3	6,7	6,7	7,2	8,2
6,1	6,5	6,3	6,9	7,0	7,6	7,8
4,9	6,5	7,0	7,3	7,0	7,3	7,4
6,5	6,9	7,1	7,4	7,5	7,9	7,9
5,1	6,1	6,3	6,8	6,7	7,2	7,7

C1, C2, C3, C4 e C5 = número do compartimento

Pode ser observado que, apesar do baixo desempenho do reator na degradação da matéria orgânica, o pH aumentou da entrada para a saída do reator. Em algumas análises, este aumento não foi gradativo ao longo dos compartimentos, mas o pH da saída sempre foi maior que o da entrada, ficando, em sua maioria maior que 7,0. Da mesma forma, Mazzola, Roston e Valentim (2005) encontraram valores medios de pH na saída de um RAC obteve pH médio de 7,4.

Na Figura 17, é apresentado o comportamento médio do pH com o TRH 3 dias.

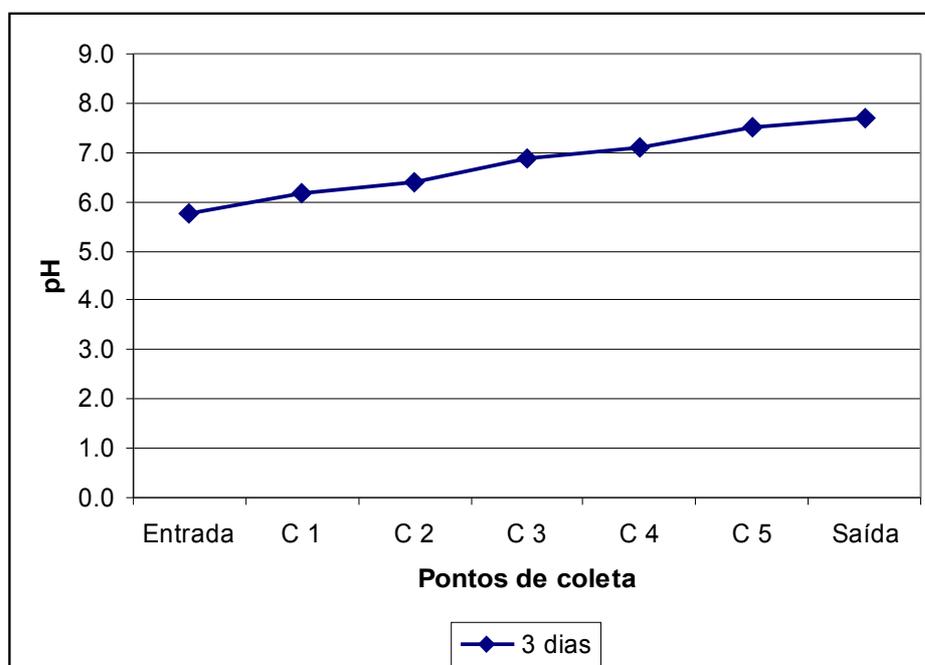


FIGURA 17. Comportamento médio do pH no TRH 3 dias com DQO 10000 mg L⁻¹

É possível observar que ocorreu aumento do pH ao longo do reator, e que apesar do pH da entrada ficar abaixo de 6,0, a saída ficou próximo de 8,0; resultado melhor quando comparado com o TRH 1 dia da etapa anterior da pesquisa.

Na Tabela 42, são apresentados os resultados obtidos para a acidez.

TABELA 42. Acidez ao longo dos compartimentos com TRH 3 dias com DQO inicial 10000 mg L⁻¹

Entrada	Acidez					Saída
	C1	C2	C3	C4	C5	
2990	4650	2280	1090	510	300	150
870	1060	1140	520	340	170	70
870	650	990	520	390	220	90
240	240	250	180	100	50	30
1220	890	330	180	90	60	20
210	210	290	190	110	40	20
1800	400	370	340	210	160	100
400	350	350	280	180	120	60
1030	470	280	220	160	150	30
1160	730	520	440	270	140	70

C1, C2, C3, C4 e C5 = número do compartimento

De acordo com os resultados obtidos, é possível observar que ocorreu diminuição da acidez ao longo dos compartimentos. Em algumas análises, a

diminuição da acidez não ocorreu de forma gradativa, como ocorreu durante toda a pesquisa. A média da acidez na saída do reator é $64 \text{ mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$, resultado que está entre as médias dos outros TRH testados nas outras etapas. Ao analisar as médias dos resultados, foi notado que a diminuição da acidez ocorre de forma gradativa, como é apresentado na Figura 18.

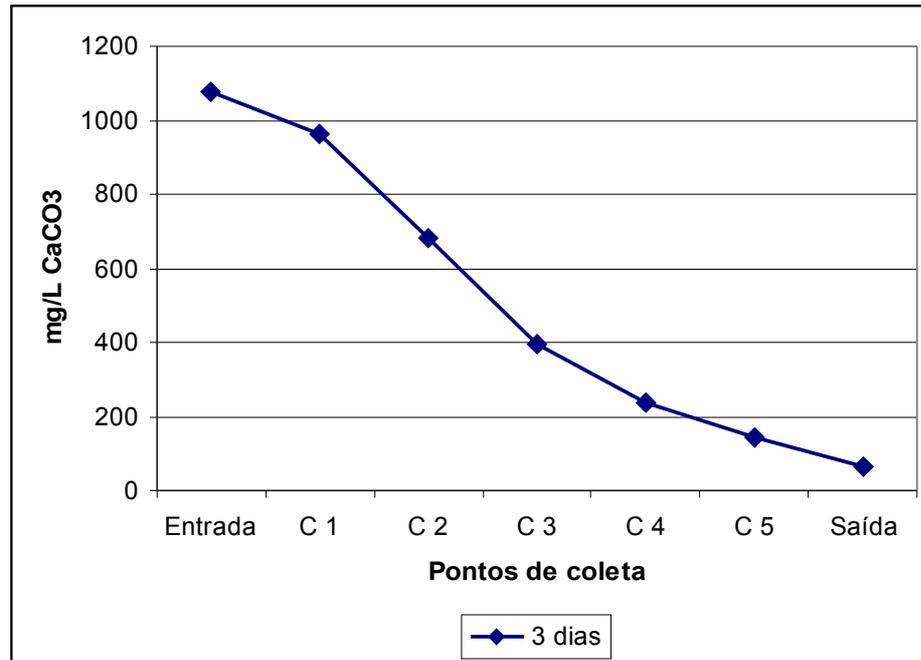


FIGURA 18. Comportamento médio da acidez no TRH 3 dias com DQO 10000 mg L^{-1}

Na Tabela 43, são apresentados os resultados obtidos para a alcalinidade.

TABELA 43. Alcalinidade ao longo dos compartimentos com TRH 3 dias com DQO inicial 10000 mg L^{-1}

Entrada	Alcalinidade					Saída
	C1	C2	C3	C4	C5	
1120	2500	3130	3390	3740	4420	4310
3420	5650	4810	3790	3390	3540	3470
2680	2980	2130	3100	4370	5250	5920
880	2380	3740	4870	6630	6750	7030
1770	4280	3570	4480	5450	6120	6250
990	2620	3580	4770	5160	5290	5300
3850	3530	3190	4010	4830	5100	5180
1170	3720	4980	5580	5330	5100	4840

3520	2810	1400	610	940	2030	3060
410	4130	4440	4560	4780	4940	4700

C1, C2, C3, C4 e C5 = número do compartimento

É possível observar que, de uma forma geral, a alcalinidade teve um aumento da entrada para a saída do reator, e, como ocorreu durante toda a pesquisa, o aumento não foi gradativo ao longo dos compartimentos.

Observou-se, também, que a alcalinidade gerada foi a maior em relação a todos os outros TRH e concentrações orgânicas, com valor de médio de 5006 mg CaCO₃ L⁻¹. Isso pode ter ocorrido, pois, com o aumento da carga orgânica, pode ter ocorrido um aumento dos ácidos graxos voláteis, e, de acordo com Hirata (1999) citado por Barana (2000), a alcalinidade de um sistema é a capacidade que ele possui de neutralizar ácidos.

Na Figura 19, é apresentado o comportamento médio da alcalinidade através dos compartimentos.

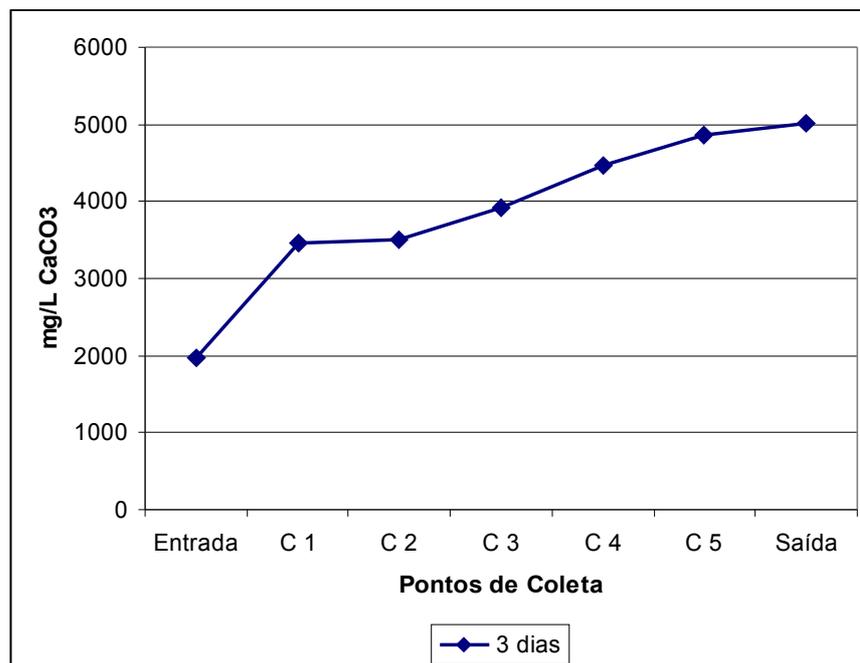


FIGURA 19. Comportamento médio da alcalinidade no TRH 3 dias com DQO 10000 mg L⁻¹

Através da figura, é possível observar que ocorreu geração de alcalinidade através dos compartimentos. A geração de alcalinidade só não foi muito expressiva do primeiro compartimento para o segundo, pois, nos primeiros compartimentos do

RAC, ocorre maior desenvolvimento de bactérias acidogênicas, ou seja, aquelas que transformam materiais mais complexos em materiais mais simples, como os ácidos graxos. Pode-se observar, ainda, que apesar do baixo desempenho do reator, nesta etapa, ocorreu o desaparecimento da acidez e a geração da alcalinidade.

Na Tabela 44 é apresentada a relação acidez/alcalinidade para o TRH 3 dias desta etapa.

TABELA 44. Médias da relação acidez/alcalinidade para os três TRH com DQO inicial 10000 mg L⁻¹

TRH	C 1	C 2	C 3	C 4	C 5	Saída
3 dias	0,3	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1

C1, C2, C3, C4 e C5 = número do compartimento

Apesar do reator não apresentar um bom desempenho, a relação acidez/alcalinidade ficou sempre dentro da normalidade.

5.5.3. Turbidez, Sólidos Totais e Sólidos Voláteis

Na Tabela 45 são apresentados os valores obtidos para a turbidez com TRH 3 dias.

TABELA 45. Valores de turbidez ao longo dos compartimentos do RAC com DQO inicial 10000 mg L⁻¹

TRH (dias)	Entrada	Turbidez (FTU*)					Saída
		C1	C2	C3	C4	C5	
3	448	365	135	128	140	111	153
3	280	271	241	201	268	299	305
3	430	449	227	176	181	278	225
3	260	441	325	210	160	206	182
3	459	405	252	205	171	191	256
3	246	347	305	282	272	244	199
3	297	449	310	273	253	224	281
3	448	442	320	276	254	242	282
3	450	449	449	397	306	225	198
3	173	410	259	220	205	299	401

C1, C2, C3, C4 e C5 = número do compartimento

É possível observar que, como ocorreu nas etapas anteriores, de uma forma geral, a turbidez diminuiu da entrada para a saída do reator, porém, essa diminuição não aconteceu de forma gradativa ao longo dos compartimentos.

A redução da turbidez foi, em média, 28%. Se comparado com os resultados obtidos nas outras etapas para o TRH 3 dias, pode-se notar que foi o pior resultado obtido. Em relação aos outros resultados, com DQO inicial de 2500 mg L⁻¹, todos os outros TRH apresentaram melhor desempenho, já quando comparado com os outros TRH, 2 e 1 dias, com DQO inicial 5000 mg L⁻¹, o resultado desta etapa ficou praticamente igual, 27% e 25%, respectivamente.

Na Tabela 46, são apresentados os resultados obtidos para sólidos totais e sólidos voláteis, bem como a porcentagem de redução dos mesmos, da entrada para a saída do reator.

TABELA 46. Sólidos Totais e Sólidos Voláteis da entrada e saída do reator e % de redução com DQO inicial 10000 mg L⁻¹

TRH (dias)	Sólidos Totais (g L ⁻¹)			Sólidos Voláteis (g L ⁻¹)		
	Entrada	Saída	% Redução	Entrada	Saída	% Redução
3	10,86	8,67	20,2	8,92	5,46	38,8
3	9,48	7,30	23,1	7,73	4,16	46,2
3	11,47	9,08	20,8	9,15	5,21	46,0
3	16,70	11,08	33,6	11,22	5,40	51,9
3	12,48	10,44	16,4	11,43	5,80	49,3
3	11,91	10,35	13,1	8,89	5,80	34,7
3	9,73	8,88	8,7	8,72	5,57	36,2

É possível observar que a redução dos sólidos, tanto totais quanto voláteis diminuiu em relação às outras etapas da pesquisa. Isso se deve ao fato de que aumentando a carga orgânica da entrada do reator também ocorre aumento na quantidade de sólidos. Como já citado anteriormente, na primeira etapa da pesquisa, a quantidade de sólidos totais presente na alimentação do reator era 2,72 g L⁻¹, na segunda etapa era 5,49 g L⁻¹ e agora este número dobrou, ou seja 11,80 g L⁻¹.

Na Figura 20, é possível observar a porcentagem de redução dos sólidos totais e voláteis na saída do reator.

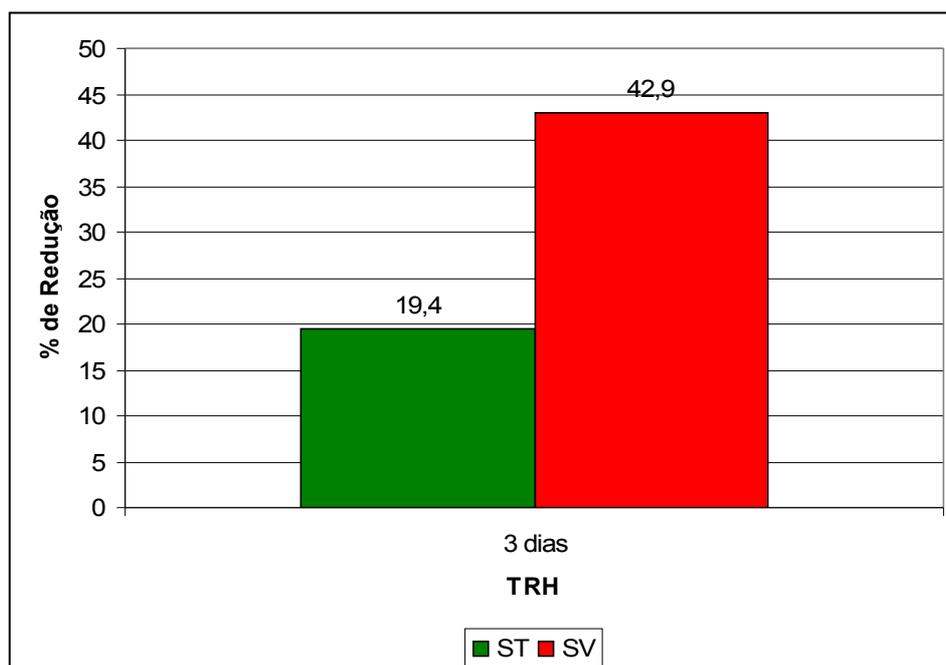


FIGURA 20. Redução média de ST e SV na saída do reator, nos diferentes TRH com DQO 10000 mg L⁻¹

É possível observar que foram reduzidos apenas 19,4% dos sólidos totais e 42,9% dos sólidos voláteis, estas porcentagens de redução são menores que as das outras etapas.

5.6. Análise geral

Ao analisar estatisticamente todos os resultados de redução de DQO obtidos em todas as etapas verificou-se que:

- Não houve diferença significativa (5%) entre a redução da DQO entre o TRH 4 dias com DQO 2500 mg L⁻¹ e as duas partes do TRH 3 dias e o TRH 2 dias com a mesma DQO, porém, se a análise estatística fosse feita ao nível de 1%, haveria diferença significativa entre o TRH 4 dias e a segunda parte do TRH 3 dias.

- Não houve diferença significativa ao nível de 5% entre a primeira parte da pesquisa com TRH 3 dias e DQO 2500 mg L⁻¹ e a segunda parte do TRH 3 dias e o TRH 2 dias com a mesma DQO, mas com 1%, haveria diferença significativa.

- Não houve diferença significativa ao nível de 5% entre a segunda parte da pesquisa com o TRH 3 dias e DQO 2500 mg L⁻¹ e o TRH 2 dias com a mesma DQO e o TRH 3 dias com DQO 5000 mg L⁻¹.

- Não houve diferença significativa ao nível de 5% entre o desempenho do reator com TRH 2 dias e DQO 2500 mg L⁻¹ e o TRH 3 dias e DQO 5000 mg L⁻¹.

- Não houve diferença significativa ao nível de 5% entre o resultado obtido com TRH 1 dia e DQO 2500 mg L⁻¹ e o TRH 3 dias com DQO 10000 mg L⁻¹.

- Não houve diferença significativa ao nível de 5% entre o resultado obtido com TRH 3 dias e DQO 5000 mg L⁻¹ e o TRH 2 dias e mesma DQO.

A Tabela 47 apresenta os resultados medidos obtidos em relação à carga orgânica volumétrica, carga hidráulica volumétrica, velocidade superficial do fluxo, redução de DQO e DQO reduzida por dia, para as três etapas da pesquisa.

TABELA 47. Resultados relacionados à DQO para todos os tratamentos

DQO entrada (mg L ⁻¹)	TRH (dias)	Carga orgânica volumétrica (mg L ⁻¹ d ⁻¹)	Carga hidráulica volumétrica (L L ⁻¹ d ⁻¹)	Velocidade superficial do fluxo (m h ⁻¹)	Redução de DQO (%)	DQO reduzida por dia (mg L ⁻¹ d ⁻¹)
2500	4	625	0,31	1,46 x 10 ⁻²	96,3	597
2500	3 (1ª parte)	833	0,54	1,92 x 10 ⁻²	97,3	810
2500	3 (2ª parte)	833	0,54	1,92 x 10 ⁻²	89,4	745
2500	2	1250	1,22	2,92 x 10 ⁻²	89,5	1119
2500	1	2500	4,9	5,83 x 10 ⁻²	47,9	599
5000	3	1667	0,54	1,92 x 10 ⁻²	80,7	1345
5000	2	2500	1,22	2,92 x 10 ⁻²	74,0	1850
5000	1	5000	4,9	5,83 x 10 ⁻²	33,5	1675
10000	3	3333	0,54	1,92 x 10 ⁻²	47,1	1570

Analisando a Tabela 47, é possível observar que para a primeira etapa, DQO 2500 mg L⁻¹, o reator apresentou a maior porcentagem de redução de DQO na a

primeira parte do TRH 3 dias (97,3%), mas a maior redução de DQO por dia ocorreu com o TRH 2 dias ($1119 \text{ mg L}^{-1} \text{ d}^{-1}$).

Já para a segunda etapa, DQO 5000 mg L^{-1} , o reator apresentou a maior porcentagem de redução de DQO com o TRH 3 dias (80,7%), mas, como ocorreu na primeira etapa, foi com o TRH 2 dias que ocorreu a maior redução de DQO por dia ($1850 \text{ mg L}^{-1} \text{ d}^{-1}$).

6. CONCLUSÕES

- Esta configuração de reator anaeróbio compartimentado apresentou um excelente desempenho na redução de DQO para alimentação de 2500 mg L^{-1} , e 5000 mg L^{-1} . Em relação à DQO de alimentação de 10000 mg L^{-1} , o reator não obteve um bom desempenho para os TRH testados.
- Em relação à primeira etapa da pesquisa, com DQO de entrada 2500 mg L^{-1} , o melhor tratamento foi a primeira parte do TRH 3 dias, pois apresentou uma redução da DQO de 97,3%.
- Em relação à segunda etapa da pesquisa, com DQO de entrada 5000 mg L^{-1} , o melhor tratamento foi o TRH 3 dias, com redução de 80,7% da DQO.
- Em relação a terceira etapa da pesquisa, com DQO de entrada 10000 mg L^{-1} , o reator não apresentou um bom desempenho na redução da DQO.

- O sistema apresentou uma capacidade tamponante, possibilitando observar a separação das fases acidogênicas e metanogênicas.
- A diminuição da acidez independeu do TRH ou da carga orgânica, pois, os valores da acidez na saída do reator foram bem próximos.
- Em relação à alcalinidade, é possível concluir que, com o aumento da concentração orgânica, ocorreu aumento da alcalinidade na saída do reator.
- O pH apresentou o mesmo comportamento em todos os tratamentos.
- A redução de sólidos totais e voláteis diminuiu com a diminuição do TRH e com o aumento da carga orgânica.
- A turbidez diminuiu da entrada para saída do reator, mas não de forma gradativa ao longo dos compartimentos.

7. SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS

- Efetuar o estudo da geração de biogás (quantidade produzida e composição), conforme a variação da carga orgânica e TRH.
- Transformar em aeróbio o último compartimento do reator para verificar a melhoria da redução da DQO.
- Verificar a influência da temperatura no tratamento através do RAC.
- Utilizar o reciclo do efluente na alimentação do reator.
- Realizar análises de cinética para o RAC nas condições estudadas.
- Realizar testes com a utilização de enzimas.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, C. B. **Tratamento aeróbio, anaeróbio e misto de manipueira em reatores sob diferentes características.** 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências de Alimentos) – Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas da UNESP, Campus de São José do Rio Preto, São José do Rio Preto, 2005.

APHA – AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION; AWWA – AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION; WEF – WATER ENVIRONMENT FEDERATION. **Standard methods for the examination of water and wastewater.** 19th ed, Washington, 1995.

AQUINO, S. F. de; CHERNICHARO, C. A. L.; Acúmulo de ácidos graxos voláteis (AGVs) em reatores anaeróbios sob estresse: causas e estratégias de controle. **Engenharia Sanitária Ambiental**, v. 10, n. 2, p. 152-161, 2005.

BARANA, A. C. **Avaliação de tratamento de manipueira em biodigestores fase**

acidogênicas e metanogênicas. 95 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP, Campus de Botucatu, Botucatu, 2000.

BARBER, W. P.; STUCKEY, D. C. The use of the anaerobic baffled reactor (ABR) for wastewater treatment: a review. **Wat. Res.**, v. 33, n. 7, p. 1559-1579, 1999.

BARKER, D. J.; MANNUCCHI, G. A.; SALVI, S. M. L.; STUCKEY, D. C. Characterization of soluble residual chemical oxygen demand (COD) in anaerobic wastewater treatment effluents. **Wat. Res.**, v. 33, n. 11, p. 2499-2510, 1999.

BOOPATHY, R. Biological treatment of swine waste using anaerobic baffled reactors. **Bioresource Technology**, v. 64, p. 1-6, 1998.

BODÍK, I.; KRATOCHVÍL, K.; GA ŠPARIKOVÁ, E. HUTŇAN, M. Nitrogen removal in an anaerobic baffled filter reactor with aerobic post-treatment. **Bioresource Technology**, v. 86, p. 79-84, 2003.

CHERNICHARO, C. A. L. de. **Reatores anaeróbios: princípios do tratamento biológico de águas residuárias.** Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental-UFMG, Belo Horizonte, 1997.

CORDEIRO, G. Q. **TRATAMENTO DE MANIPUEIRA EM REATOR ANAERÓBIO COMPARTIMENTADO.** 88 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências de Alimentos) – Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas da UNESP, Campus de São José do Rio Preto, São José do Rio Preto, 2006.

DOMINGUES, L.; LIMA, N.; TEIXEIRA, J. A. Novas metodologias para o tratamento biotecnológico do soro de queijo. Disponível em <<http://sbbq.iq.usp.br/arquivos/regional/2002/cdresumo/Palestras/018.pdf>>. Acesso em 29 jun. 2007.

FAISAL, M.; UNNO, H. Kinetic analysis of palm oil Mill wastewater treatment by a modified anaerobic baffled reactor. **Biochemical Engineering Journal**, v. 9, p. 25-

31, 2001.

FERNANDES, C. Digestão Anaeróbia. Disponível em <<http://www.dec.ufcg.edu.br/saneamento/DigeAnae.html>>. Acesso em 21 jun. 2007.

FERNANDES, G. F. R.; OLIVEIRA, R. A. de; Desempenho de processo anaeróbio em dois estágios (reator anaeróbio compartimentado seguido de reator UASB) para tratamento de águas residuárias de suinocultura. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 26, n. 1, p. 243-256, 2006.

FORESTI, E.; FLORÊNCIO, L.; VAN HAANDEL, A.; ZAIAT, M.; CAVALCANTI, P. F. F. Fundamentos do Tratamento Anaeróbio. In: **Tratamento de Esgotos Sanitários por Processo Anaeróbio e Disposição Controlada no Solo (PROSAB)**. p 29-52, 1999.

GHALY, A. E. A comparative study of anaerobic digestion of acid cheese whey and dairy manure in a two-stage reactor. **Bioresource Technology**, v. 58, p. 61-72, 1996.

GROVER, R.; MARWAHA, S. S.; KENNEDY, J. F. Studies on the use of an anaerobic baffled reactor for the continuous anaerobic digestion of pulp and paper mill black liquors. **Process Biochemistry**, v. 34, p. 653-657, 1999.

KOETZ, P. R.; FARIA, O. L. V.; NUNES, W. A. Tratamento de efluentes homogeneizados de curtume por digestão anaeróbia em reatores de fluxo ascendente. **Revista Brasileira de Agrocências**, v. 1, n. 1, p. 23-29, 1995.

KUŞÇU, O. S.; SPONZA, D. T. Performance of anaerobic baffled reactor (ABR) treating synthetic wastewater containing *p*-nitrofenol. **Enzyme and Microbial Technology**, v. 36, p. 888-895, 2005.

LAGENHOFF, A. A. M.; STUCKEY, D. C. Treatment of dilute wastewater using an anaerobic baffled reactor: effect of low temperature. **Wat. Res.**, v. 34, n. 15, p. 3867-3875, 2000.

LANGENHOFF, A. A. M.; INTRACHANDRA, N.; STUCKEY, D. C. Treatment of dilute soluble and colloidal wastewater using an anaerobic baffled reactor: influence of hydraulic retention time. **Wat. Res.**, v. 34, n. 4, p.1307-1317, 2000.

LEITE, V. D.; LOPES, W. S.; SOUSA, J. T.; PRASAD, S. Tratamento anaeróbio de resíduos orgânicos com baixa concentração de sólidos. **Engenharia Sanitária e Ambiental**. v. 9, n. 4, p. 280-284, 2004.

MALASPINA, F.; CELLAMARE, C. M.; STANTE, L.; TILCHE, A. Anaerobic treatment of cheese whey with a downflow-upflow hybrid reactor. **Bioresource Technology**, v. 55, p. 131-139, 1996.

MAZZOLA, M.; ROSTON, D. M.; VALENTIM, A. A. Uso de leitos cultivados de fluxo vertical por batelada no pós-tratamento de efluente de reator anaeróbio compartimentado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 9, n. 2, p. 276-283, 2005.

McHUGH, S.; COLLINS, G.; O'FLAHERTY, V. Long-term, high-rate anaerobic biological treatment of whey wastewaters at psychrophilic temperatures. **Bioresource Technology**, v. 97, p. 1669-1678, 2006.

NACHAIYASIT, S.; STUCKEY, D. C. The effect of shock loads on the performance of an anaerobic baffled reactor (ABR). 1. Step changes in feed concentration at constant retention time. **Wat. Res.**, v. 31, n. 11, p. 2737-2746, 1997.

NACHAIYASIT, S.; STUCKEY, D. C. The effect of shock loads on the performance of an anaerobic baffled reactor (ABR). 2. Step and transient hydraulic shocks at constant feed strength. **Wat. Res.**, v. 31, n. 11, p. 2747-2754, 1997.

PATEL, P.; DESAI, M.; MADAMWAR, D. Biomethanation of cheese whey using anaerobic upflow fixed film reactor. **Journal of Fermentation and Bioengineering**, v.79, n.4, p. 398-399, 1995.

PATEL, P.; MADAMWAR, D. Surfactants in anaerobic digestion of salty cheese whey using upflow fixed film reactor for improved biomethanation. **Process Biochemistry**, v. 33, n. 2, 199-2003, 1998.

PAULA JUNIOR, D. R. Processos anaeróbios para tratamento de efluentes: fundamentos e aplicações. In: IV SEMINÁRIO DE HIDRÓLISE ENZIMÁTICA DE BIOMASSAS. Anais. Maringá, p. 127-141, 1996.

RAMIRES, R. D. A. **Produção de metano e remoção de material orgânico, nutrientes e microrganismos patogênicos em reatores anaeróbios de fluxo ascendente com manta de lodo (UASB) em dois estágios tratando águas residuárias de suinocultura.** 136 f. Dissertação (Mestrado em Microbiologia Agropecuária) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias - UNESP, Campus de Jaboticabal, Jaboticabal, 2005.

RÉVILLION, J. P.; BRANDELLI, A.; AYUB, M. A. Z. Produção de extratos de leveduras de uso alimentar a partir do soro de queijo: abordagem de elementos técnicos e mercadológicos relevantes. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 20, n. 2, 2000.

SALLIS, P. J.; UYANIK, S. Granule development in a split-feed anaerobic baffled reactor. **Bioresource Technology**, v. 89, p. 255-265, 2003.

SANTANA, A. M.; OLIVEIRA, R. A. Desempenho de reatores anaeróbios de fluxo ascendente com manta de lodo em dois estágios tratando águas residuárias de suinocultura. **Eng. Agríc.**, v. 25, n. 3, p. 817-830, 2005.

SARITPONGTEERAKA, K.; CHAIPRAPAT, S. Effects of pH adjustment by parawood ash and effluent recycle ratio on the performance of anaerobic baffled reactors treating high sulfate wastewater. **Bioresource Technology**, v. 99, n. 18 p. 8987-8994, 2008.

SCOTTI, R. (1998), **Cheesemaking practice**. Ed. Aspen Publishers, Gaithersburg, p. 320-321.

SILVA, A. J. **Remoção de sulfato de água residuária industrial utilizando reator anaeróbio de leito fixo**. 81 f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 1999.

SHE, Z.; ZHENG, X.; YANG, B.; JIN, C.; GAO, M. Granule development and performance in sucrose fed anaerobic baffled reactors. **Journal of Biotechnology**, v. 122, p. 198-208, 2006.

SQUILASSI, K. M. B. S.; OLIVEIRA, M. A. B.; NICOLARU, E. S.; MESQUITA, A. J. Soro de queijo – alternativas para o aproveitamento na alimentação humana. Disponível em <http://www.laticinio.net/inf_tecnicas.asp?cod=40>. Acesso em 04 jul. 2007.

UYANIK, S.; SALLIS, P. J.; ANDERSON, G. K. The effect of polymer addition on granulation in an anaerobic baffled reactor (ABR). Part II: compartmentalization of bacterial populations. **Water Research**, v.36, p. 944-955, 2002.

VOSSOUGH, M.; SHAKERI, M.; ALEMZADEH, I. Performance of anaerobic baffled reactor treating synthetic wastewater influenced by decreasing COD/SO₄ ratios. **Chemical Engineering and Processing**, v. 42, p. 811-816, 2003.

WANG, J.; HUANG, Y.; ZHAO, X. Performance and characteristics of an anaerobic baffled reactor. **Bioresource Technology**, v. 93, p. 205-208, 2004.

ZAIAT, M. **Desenvolvimento de reator anaeróbio horizontal de leito fixo (RAHLF) para tratamento de águas residuárias**. 157 f. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1996.